

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (1)

Переменным током называются вынужденные колебания тока в цепи, совпадающие с частотой вынуждающей ЭДС.

Пусть переменная ЭДС (или переменное напряжение) имеет вид:

$$U = U_m \cos \omega t,$$

где U_m – амплитуда напряжения.

Тогда на участке цепи, имеющей сопротивление R , ёмкость C и индуктивность L , закон Ома будет иметь вид:

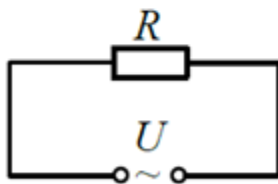
$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t$$

или

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = U_m \cos \omega t.$$

Рассмотрим частные случаи цепи.

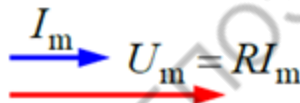
(1) $R \neq 0$, $C \rightarrow 0$, $L \rightarrow 0$: переменное напряжение приложено к сопротивлению R . Закон Ома:



$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \text{ Амплитуда силы тока: } I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Колебания тока происходят в одной фазе с напряжением.

Для наглядности воспользуемся **методом векторных диаграмм** и будем изображать векторами, угол между которыми равен разности фаз.

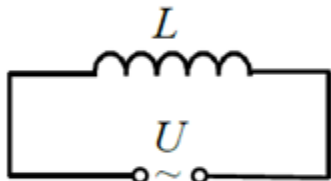


ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (2)

(2) $R \rightarrow 0$, $C \rightarrow 0$, $L \neq 0$: переменное напряжение приложено к катушке индуктивности.

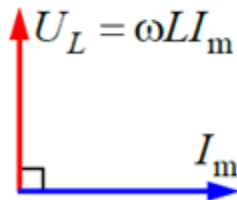
ЭДС самоиндукции в катушке: $\Theta_s = -L \frac{dI}{dt}$.

Закон Ома $L \frac{dI}{dt} = U_L = U_m \cos \omega t$, откуда после интегрирования получим:



$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$.



Таким образом, **падение напряжения U_L опережает по фазе ток I , текущий через катушку, на $\frac{\pi}{2}$.**

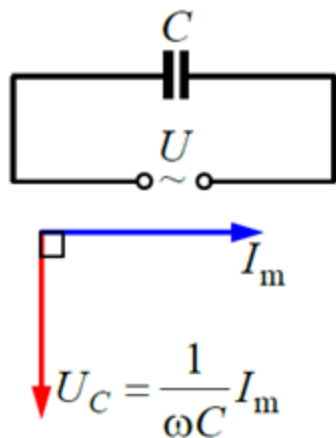
Величина

$$R_L = \omega L$$

называется **реактивным индуктивным сопротивлением**. Для постоянного тока ($\omega = 0$) катушка индуктивности не имеет сопротивления.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (3)

(3) $R \rightarrow 0$, $C \neq 0$, $L \rightarrow 0$: переменное напряжение приложено к конденсатору.



$$\frac{q}{C} = U_C = U_m \cos \omega t.$$

Сила тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$.

Таким образом, **падение напряжения U_C отстаёт по фазе от текущего через конденсатор тока I на $\frac{\pi}{2}$.**

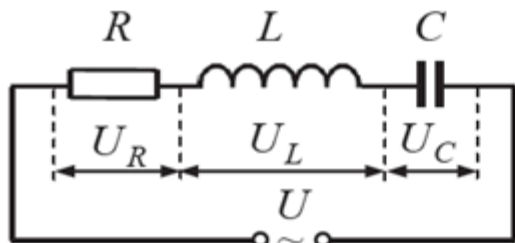
Величина

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

называется **реактивным ёмкостным сопротивлением**. Для постоянного тока ($\omega = 0$) $R_C = \infty$, т. е. постоянный ток через конденсатор течь не может.

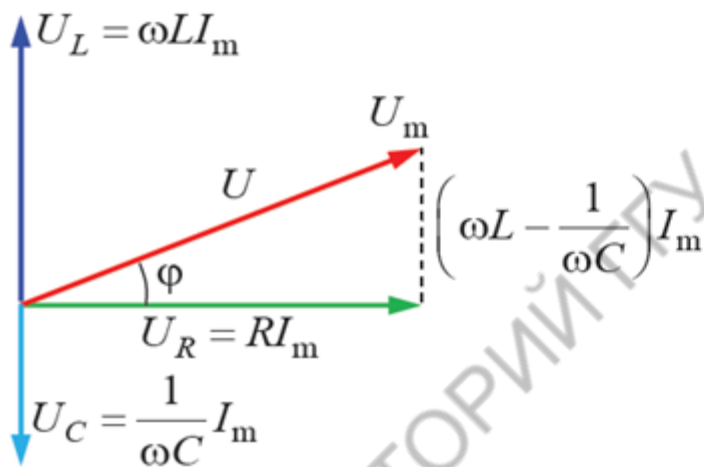
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (4)

(4) В общем случае $R \neq 0$, $C \neq 0$, $L \neq 0$. Если напряжение в цепи изменяется по закону $U = U_m \cos \omega t$, то в цепи течёт ток $I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$, где I_m и φ определяются формулами:



$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$



Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}$$

называется **полным сопротивлением цепи**.

Величина $X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$

называется **реактивным сопротивлением**.

Таким образом, $I_m = \frac{U_m}{Z}$, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$,

причём $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$, $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Если $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то $\varphi = 0$ – *изменения тока и напряжения происходят*

синфазно. В этом случае $Z = R$ и ток определяется только активным сопротивлением и достигает максимально возможного значения. Падение напряжения на конденсаторе U_C и на катушке индуктивности U_L одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе. Это явление называется **резонансом напряжений (последовательным резонансом)**.

Частота

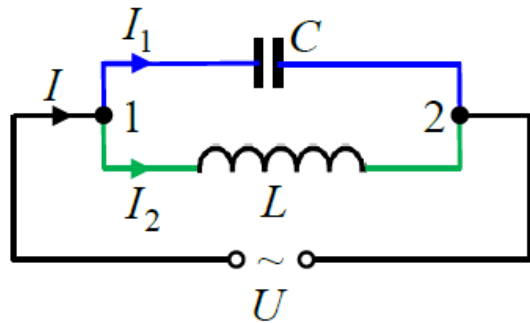
$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

называется **резонансной**.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. РЕЗОНАНС ТОКОВ

К цепи переменного тока, содержащей параллельно включённые конденсатор ёмкостью C и катушку индуктивностью L , приложено напряжение $U = U_m \cos \omega t$.

Токи в ветвях $1C2$ ($R=0, L=0$) и $1L2$ ($R=0, C=\infty$) равны



$$I_{m1} = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}, \quad I_{m2} = \frac{U_m}{\omega L}$$

и противоположны по фазам. Амплитуда силы тока во внешней (неразветвленной) цепи:

$$I_m = |I_{m1} - I_{m2}| = U_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|.$$

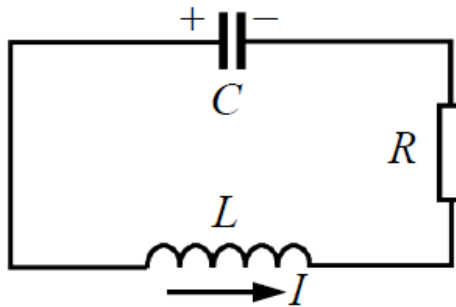
Если $\omega = \omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то $I_{m1} = I_{m2}$ и $I_m = 0$. Явление резкого

уменьшения амплитуды силы тока во внешней цепи, питающей параллельно включённые конденсатор и катушку индуктивности, при приближении частоты ω приложенного напряжения к резонансной частоте $\omega_{рез}$ называется **резонансом токов (параллельным резонансом)**.

В реальных цепях $R \neq 0$, поэтому сила тока $I_m > 0$, но принимает наименьшее возможное значение.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Электрическим колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из включённых последовательно катушки индуктивностью L , конденсатора ёмкостью C и резистора сопротивлением R .



По закону Ома для участка цепи:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_c \quad \text{или} \quad IR = -\frac{q}{C} - L \frac{dI}{dt},$$

где q и $(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{q}{C}$ – заряд конденсатора и

разность потенциалов его обкладок в произвольный момент времени t ; R – электрическое сопротивление колебательного контура; Θ_c – ЭДС само-

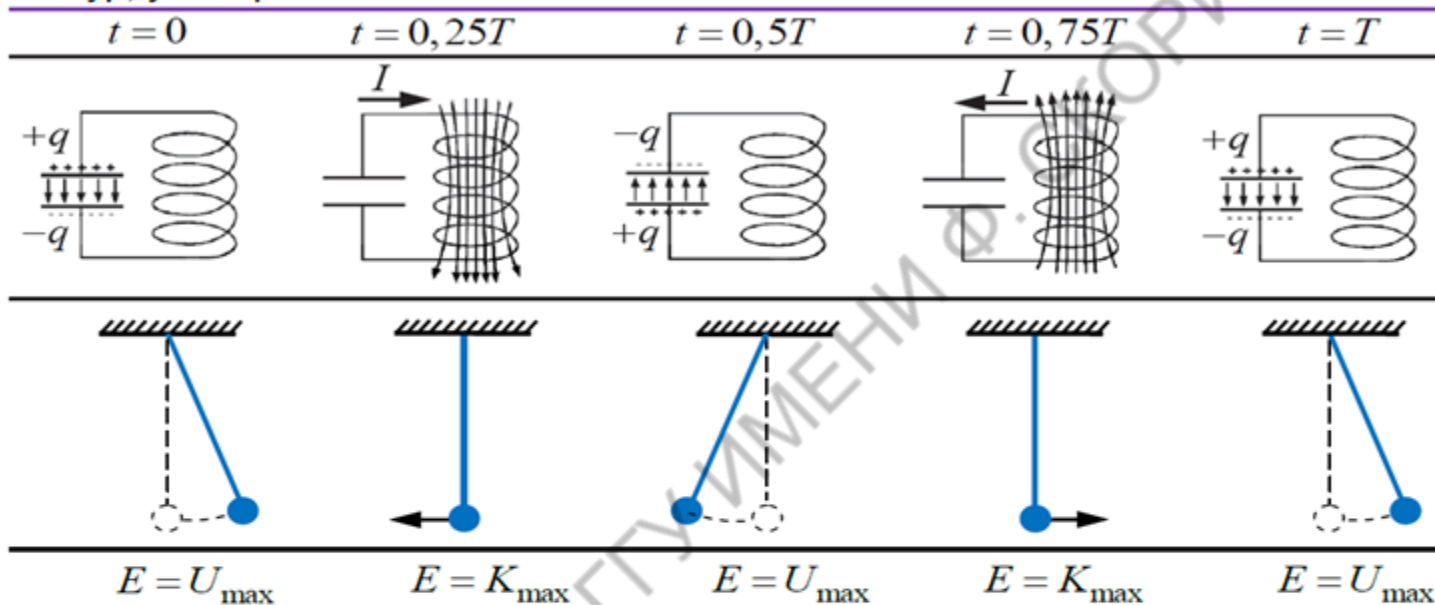
индукции в катушке. Сила тока $I = \frac{dq}{dt}$, поэтому **дифференциальное**

уравнение колебаний заряда в колебательном контуре

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Идеализированный колебательный контур – это колебательный контур, у которого $R = 0$.



Пусть **в начальный момент времени** $t = 0$ конденсатор заряжен зарядом q . Тогда **энергия электрического поля** между обкладками конденсатора $W_e = \frac{q^2}{2C}$. При замыкании конденсатора на катушку индуктивности, в контуре потечёт возрастающий ток I . **Энергия электрического поля** начнёт **уменьшаться**, а **энергия магнитного поля** катушки $W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{L\dot{q}^2}{2}$ будет **возрастать**. Поскольку потерь в контуре нет ($R = 0$), то **полная энергия** $W = W_e + W_m$ **сохраняется**.

АНАЛОГИЯ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА А И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА (1)

В момент времени $t = \frac{1}{4}T$ (T – период колебаний), когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля (а, следовательно, и ток) достигает наибольшего значения.

Стадии колебаний в контуре можно сопоставить с аналогичными стадиями механических колебаний, например, математического маятника, который в момент времени $t = 0$ смещён из положения равновесия и имеет максимальную потенциальную энергию $E = U_{\max}$. В момент времени $t = \frac{1}{4}T$ смещение маятника равно нулю, скорость – максимальна, и потенциальная энергия полностью переходит в кинетическую энергию маятника $E = K_{\max}$.

Начиная с момента времени $t = \frac{1}{4}T$, ток в контуре будет убывать, следовательно, магнитное поле катушки начнёт ослабевать. Изменение магнитного поля вызовет индукционный ток, который, по правилу Ленца, будет иметь то же направление, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начинает перезаряжаться и **к моменту времени** $t = \frac{1}{2}T$ заряд на обкладках конденсатора достигнет максимума, ток в цепи прекратится, и энергия контура снова будет равна энергии электрического поля в конденсаторе.

Для маятника это будет соответствовать максимальному смещению в направлении, противоположном первоначальному, остановке маятника в крайнем положении ($v = 0$) и обратному превращению кинетической энергии в потенциальную.

АНАЛОГИЯ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА А И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА (2)

Далее, все процессы в колебательном контуре будут протекать в обратном направлении и система к моменту времени $t = T$ придёт в первоначальное состояние.

Таким образом, в колебательном контуре происходят периодические изменения заряда q на обкладках конденсатора и силы тока I . Эти электрические колебания сопровождаются превращением энергий электрического и магнитного полей.

Из сравнения электрических колебаний с механическими колебаниями следует, что:

- энергия электрического поля конденсатора аналогична потенциальной энергии маятника;
- энергия магнитного поля катушки аналогична кинетической энергии маятника;
- сила тока в контуре аналогична скорости движения маятника;
- индуктивность L выполняет функцию массы;
- сопротивление R играет роль силы трения, действующей на маятник.

ЭМИССИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Работа выхода электронов из металла – работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла в вакуум.

Работа выхода зависит от химической природы металлов и от чистоты их поверхности. Подобрав определённым образом покрытие поверхности, можно значительно изменить работу выхода.

Работа выхода выражается в **электрон-вольтах** (эВ): 1 эВ равен работе, которую совершают силы поля при перемещении элементарного электрического заряда между точками, разность потенциалов между которыми равна 1 В.

Так как $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Электронная эмиссия – явление испускания электронов из металлов при сообщении электронам энергии, равной или большей работы выхода.

1. **Термоэлектронная эмиссия** – это испускание электронов нагретыми металлами. Пример использования – электронные лампы.
2. **Фотоэлектронная эмиссия** – это эмиссия электронов из металла под действием электромагнитного излучения. Пример использования – фотодатчики.
3. **Вторичная электронная эмиссия** – это испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников или диэлектриков при бомбардировке их пучком электронов. Отношение числа вторичных электронов n_2 к числу первичных n_1 , вызвавших эмиссию, называется **коэффициентом вторичной электронной эмиссии** $\delta = n_2/n_1$. Пример использования – фотоэлектронные умножители.

ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ (1)

Под действием **ионизатора** (сильный нагрев, жёсткое излучение, потоки частиц) нейтральные молекулы (атомы) газа расщепляются на ионы и свободные электроны – происходит **ионизация** газа.

Энергия ионизации – это энергия, которую надо затратить, чтобы из молекулы (атома) выбить один электрон.

Рекомбинацией называется процесс обратный ионизации: положительные и отрицательные ионы, положительные ионы и электроны, встречаясь, воссоединяются между собой с образованием нейтральных атомов и молекул.

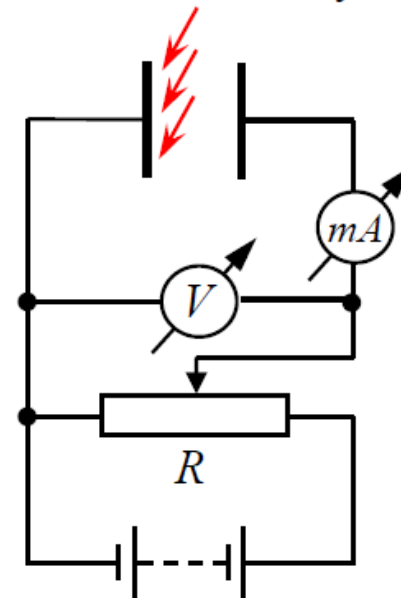
Прохождение электрического тока через ионизированный газ называется **газовым разрядом**.

Разряд, существующий только под действием внешних ионизаторов, называется **несамостоятельным газовым разрядом**.

Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным газовым разрядом**.

Рассмотрим цепь, содержащую газовый промежуток (см. рисунок), подвергающийся непрерывному, постоянному по интенсивности воздействию ионизатора.

В результате действия ионизатора газ приобретает некоторую электропроводность и в цепи потечёт ток, зависимость которого от приложенного напряжения (**вольт-амперная характеристика**) представлена на следующем рисунке.

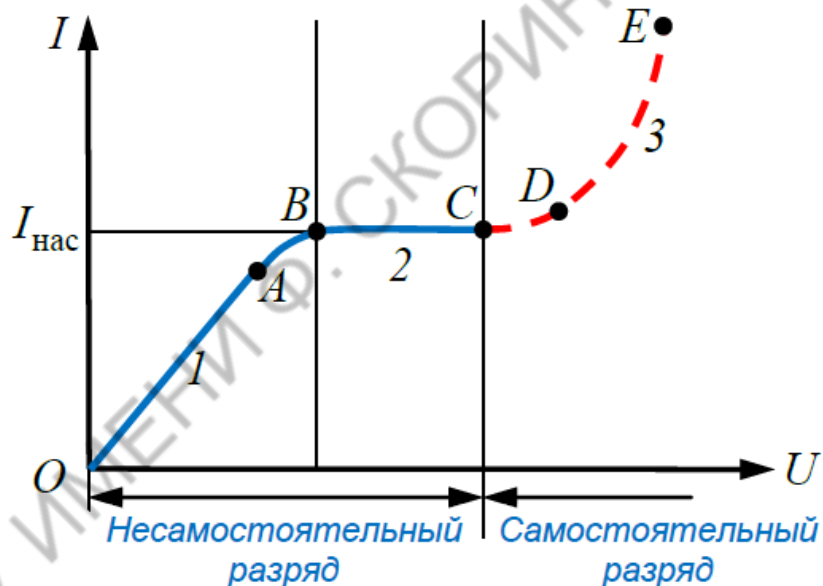


ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ (2)

На участке OA выполняется закон Ома. Затем (участок AB) рост силы тока замедляется, а затем (участок BC) прекращается совсем. В этом случае число ионов и электронов, создаваемых внешним ионизатором равно числу ионов и электронов достигающих электродов (и нейтрализующихся на электродах). Ток $I_{\text{нас}}$, соответствующий участку BC называется **током насыщения** и его величина определяется мощностью ионизатора.

При увеличении напряжения, первичные электроны (созданные ионизатором), ускоренные электрическим полем, в свою очередь начинают ударно ионизовать молекулы газа, образуя вторичные электроны и ионы. Общее количество электронов и ионов будет возрастать по мере приближения электронов к аноду лавинообразно. Это является причиной увеличения тока на участке CD . Описанный процесс называется **ударной ионизацией**.

И, наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка положительные ионы, ускоренные электрическим полем, также приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа, что порождает ионные лавины. Когда возникают кроме электронных лавин ещё и ионные, сила тока растёт уже практически без увеличения напряжения (участок DE).



ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ (3)

Лавинообразное размножение электронов и ионов приводит к тому, что разряд становится самостоятельным, т. е. сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора. Напряжение, при котором возникает самостоятельный газовый разряд, называется **напряжением пробоя**.

В зависимости от давления газа, конфигурации электродов, параметров внешней цепи можно говорить о **четырёх** типах самостоятельного разряда.

1. **Тлеющий разряд** – возникает при низком давлении.
2. **Искровой разряд** – возникает при большой напряжённости электрического поля в газе, находящимся под давлением порядка атмосферного.
3. **Дуговой разряд** – возникает: а) если после зажигания искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами; б) минуя стадию искры, если электроды (например, угольные) сблизить до соприкосновения, а потом развести.
4. **Коронный разряд** – возникает при высоком давлении в резко неоднородном поле вблизи электродов с большой кривизной поверхности.

Для возникновения самостоятельного газового разряда **необходимо**, чтобы **концентрация** и **энергия** вторичных ионов и электронов, образовавшихся под действием ионизатора, были достаточны для **лавинного размножения** носителей (число вторичных носителей должно превышать число носителей, покидающих газовый разряд вследствие рекомбинации или нейтрализации на поверхностях, окружающих газовый разряд).