

Лекция 13

Свободные колебания в LC -контуре. Затухание колебаний при наличии активного сопротивления. Вынужденные колебания. Резонанс напряжений. Резонанс токов. Трансформатор.

Свободные колебания в LC -контуре

Простейшей колебательной системой является цепь, состоящая из катушки индуктивности L и емкости C , а омическое сопротивление цепи пренебрежимо мало. Такая цепь называется идеальным колебательным контуром (рисунок). Если с помощью ключа K_1 зарядить конденсатор зарядом от источника, а затем, отсоединив источник, замкнуть другой ключ K_2 , то в контуре возникнут колебания заряда на обкладках конденсатора и тока в цепи.

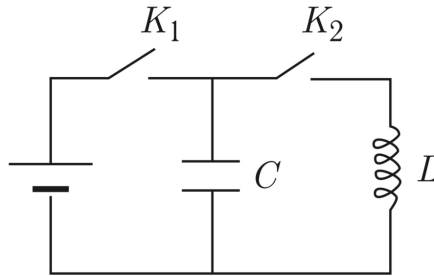


Рисунок 1

Уравнение, описывающее эти процессы, определяется равенством нулю суммы падений напряжения на емкости и индуктивности в любой момент времени: $U_C(t) + U_L(t) = 0$, или $\frac{q}{C} + L \frac{dI}{dt} = 0$. Если учесть, что $I = \frac{dq}{dt}$, то можно записать уравнение для изменяющегося во времени заряда:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0$$

Это уравнение незатухающих (собственных) гармонических колебаний, а его решение имеет вид

$$q(t) = q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- угловая частота, q_0 и φ_0 - амплитуда и начальная фаза колебаний заряда, определяемые начальными условиями.

Наряду с угловой частотой, используется частота $\nu_0 = \omega_0/(2\pi)$ и период колебаний $T = 1/\nu_0$.

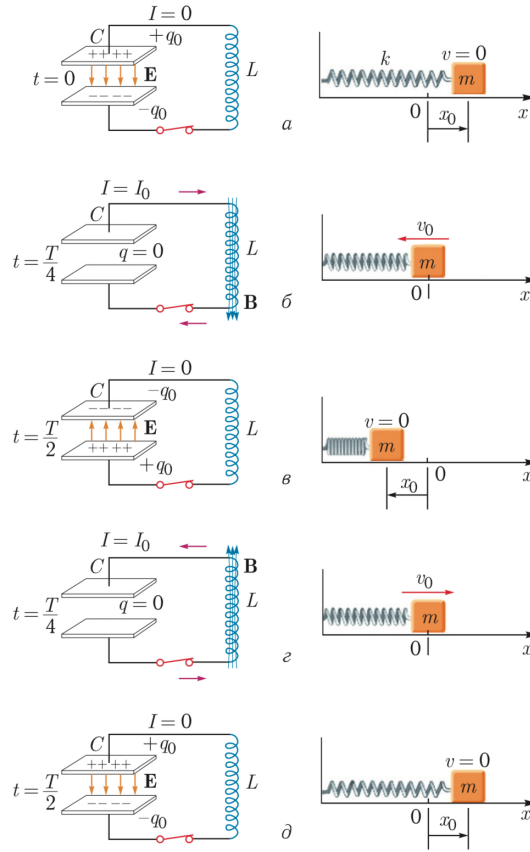


Рисунок 2: Фазы колебаний заряда и тока в контуре и (по аналогии) фазы колебаний координаты и скорости пружинного маятника

| Электромагнитные колебания | | Механические колебания |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| заряд q | \Leftrightarrow | координата x |
| ток $I = \frac{dq}{dt}$ | \Leftrightarrow | скорость $v = \frac{dx}{dt}$ |
| индуктивность L | \Leftrightarrow | масса m |
| обратная емкость $1/C$ | \Leftrightarrow | жесткость k |
| энергия конденсатора $\frac{q^2}{2C}$ | \Leftrightarrow | энергия пружины $\frac{kx^2}{2}$ |
| энергия катушки $\frac{LI^2}{2}$ | \Leftrightarrow | кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$ |

Рисунок 3: Аналогия между электромагнитными колебаниями в LC -цепи и колебаниями пружинного маятника в отсутствие трения

Затухание колебаний при наличии активного сопротивления

Реальный контур обладает омическим сопротивлением R , обусловленным сопротивлением катушки и утечкой конденсатора. Поэтому в уравнение $L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{C}q = 0$ следует добавить падение напряжения $U_R = IR = R(dq/dt)$, и оно примет вид:

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

Его решение описывает затухающие колебания:

$$q(t) = q_0 \exp(-\delta t) \sin(\omega^* t + \varphi_0)$$

где $\delta = R/(2L)$ — коэффициент, или показатель, затухания, $\omega^* = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота затухающих колебаний. Поскольку в контуре $\delta \ll \omega_0$, то аperiodический режим не рассматривается.

По аналогии с механикой, логарифмический декремент затухания $\theta = \delta T$, а добротность контура

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Типичное значение собственной частоты распространенных колебательных контуров лежит в диапазоне $\nu_0 \sim (10^5 \div 10^8)$ Гц. Добротность контура ограничена омическими потерями и составляет $Q \sim 10^2$. Эта величина на много порядков меньше добротности высокодобротных механических маятников.

Вынужденные колебания. Резонанс напряжений

Введем в контур источник с переменной ЭДС, меняющейся по гармоническому закону: $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ (рисунок). Источник подсоединен к элементам цепи последовательно, значит, сумма падений напряжений на всех трех элементах контура в любой момент времени должна равняться внешней ЭДС:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

Если ЭДС начинает действовать в момент времени $t = 0$, то колебания величины заряда начнут устанавливаться в соответствии с соотношением

$$q(t) = q_0^* \exp(-\delta t) \sin(\omega^* t + \varphi_*) + q_0 \sin(\omega t + \varphi_q).$$

Это соотношение представляет собой суперпозицию собственных затухающих колебаний на частоте ω^* и незатухающих вынужденных колебаний на частоте ω . Таким образом, колебания установятся по истечении времени

$$t \geq \Delta t_{\text{уст}} = \tau = \frac{1}{\delta}.$$

В установившемся режиме амплитуда колебания напряжения на емкости $U_{C0} = q_0/C$, подобно амплитуде смещения в механике, зависит от частоты внешней ЭДС:

$$U_{C0} = \frac{\mathcal{E}_0}{LC \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}.$$

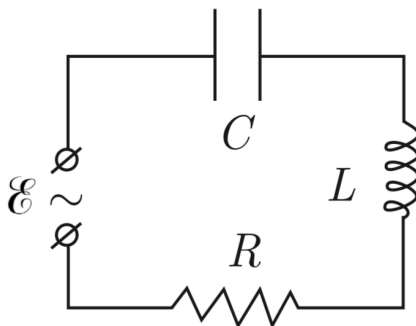


Рисунок 4

График этой зависимости аналогичен амплитудной характеристике маятника и изображен на рисунке (а).

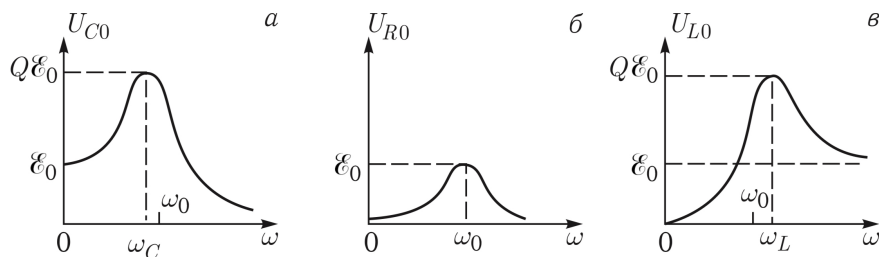


Рисунок 5

Резонанс напряжения на емкости происходит на частоте $\omega_C = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \approx \omega_0$, практически совпадающей с собственной частотой ω_0 колебательного контура. Вблизи этой частоты выражение $U_{C0}(\omega)$ можно упростить, если использовать приближенные равенства:

$$\begin{aligned} (\omega_0^2 - \omega^2)^2 &= (\omega_0 - \omega)^2 (\omega_0 + \omega)^2 \approx (\omega_0 - \omega)^2 \cdot 4\omega_0^2, \\ 4\delta^2\omega^2 &\approx 4\delta^2\omega_0^2. \end{aligned}$$

С учетом этих приближенных равенств получаем

$$U_{C0} = Q \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 / \delta^2 + 1}}.$$

При резонансе амплитуда напряжения на конденсаторе в Q раз превышает величину \mathcal{E}_0 . Ширина $\Delta\omega$ резонансной кривой, как и в механике, определяется из условия убывания вдвое энергии конденсатора, пропорциональной квадрату напряжения на нем:

$$\frac{1}{\sqrt{(\Delta\omega/2\delta)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7.$$

Отсюда ширина резонансной кривой, или полоса пропускания контура, получается равной

$$\Delta\omega = 2\delta = \frac{\omega_0}{Q}.$$

В радиоприемных устройствах при частоте радиопередатчика $\nu_0 \sim 10^6$ Гц полоса пропускания контура, настроенного на эту частоту, при добротности $Q \sim 10^2$ будет составлять большую величину $\Delta\nu = \nu_0/Q \sim 10^4$ Гц. Если разность частот двух радиостанций меньше полосы пропускания, то контур не позволит выделить по отдельности эти радиосигналы. Поэтому чтобы уменьшить полосу пропускания, частоту высокочастотного радиосигнала вначале преобразуют до более низкой (промежуточной) частоты $\nu_{\text{П}} \sim 10^3$ Гц. Тогда и полоса пропускания уменьшится на три порядка.

Амплитуда напряжения на резисторе $U_{R0} = I_0 R = q_0 \omega R$ зависит от частоты так же, как и амплитуда скорости (рисунок (б)). При частоте $\omega = \omega_0$ должно выполняться равенство $L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0$. Это означает, что уравнение

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

примет вид

$$R \frac{dq}{dt} = \mathcal{E}_0 \sin \omega_0 t.$$

Таким образом, на резонансной частоте сумма падений напряжений на емкости и индуктивности равна нулю, а напряжение на резисторе равно величине внешней ЭДС.

Амплитуда напряжения на индуктивности (аналог амплитуды ускорения) $U_{L0} = I_0 \omega L = q_0 \omega^2 L$ зависит от частоты так, как показано на рисунке (в). При резонансе $U_{L0} = Q \mathcal{E}_0$.

Фазовая характеристика - зависимость $\varphi_q(\omega)$ - задается формулой

$$\text{tg } \varphi_q = \frac{2\delta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

и изображена на рисунке. При резонансе колебания заряда и напряжения на емкости отстают по фазе от колебаний внешней ЭДС на величину $\pi/2$: $\varphi_q = \varphi_C = -\pi/2$, а колебания напряжения на индуктивности, как нетрудно убедиться, опережают колебания ЭДС на такую же величину: $\varphi_L = \pi/2$.

Возрастание напряжения на емкости и индуктивности до величины $U_{C0} = U_{L0} = Q \mathcal{E}_0$ носит название резонанс напряжений. Напряжение на резисторе (и ток в цепи) при резонансе колеблется в фазе с внешней ЭДС: $\varphi_R = \varphi_I = 0$

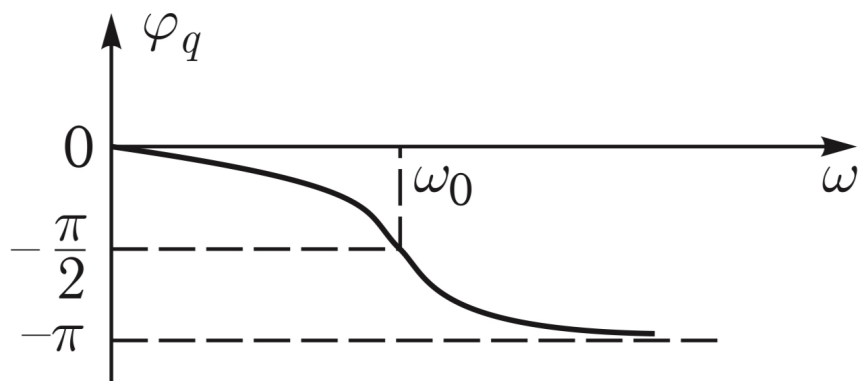


Рисунок 6: Фазовая характеристика - зависимость $\varphi_q(\omega)$

Резонанс токов

Рассмотрим протекание тока через элементы контура, подключенного параллельно к внешней переменной ЭДС: $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t)$ (рисунок).

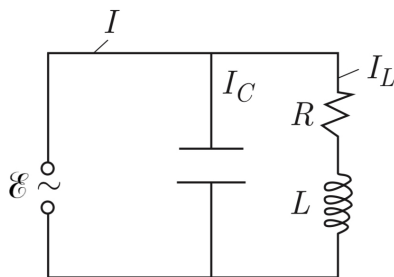


Рисунок 7

Для расчета тока I_L в катушке, тока I_C , текущего через емкость, и тока I , втекающего в контур, построим векторную диаграмму токов, в которой в качестве опорного используем вектор \mathcal{E}_0 (рисунок (а)).

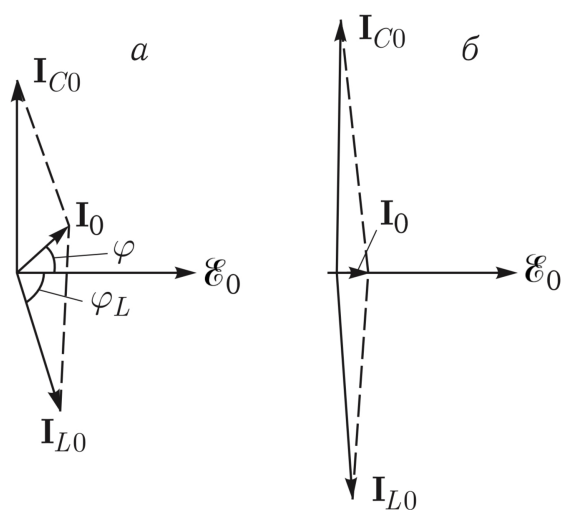


Рисунок 8

Ток в последовательно соединенных резисторе и индуктивности отстает по фазе от напряжения на величину φ_L , которая определяется при нулевом емкостном сопротивлении: $\operatorname{tg} \varphi_L = U_{L0}/U_{R0} =$

$\omega L/R$. Поэтому вектор \mathbf{I}_{L0} повернут по часовой стрелке относительно вектора \mathcal{E}_0 на угол φ_L . Вектор \mathbf{I}_{C0} повернут против часовой стрелки на 90° , поскольку ток через емкость опережает на $\pi/2$ приложенное напряжение. Вектор полного тока равен $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_{L0} + \mathbf{I}_{C0}$ и составляет с вектором \mathcal{E}_0 некоторый угол φ .

Если сопротивление $R \rightarrow 0$, то $\varphi_L \rightarrow \pi/2$, векторы \mathbf{I}_{L0} и \mathbf{I}_{C0} направлены практически в противоположные стороны, а полный ток (ток в подводящих проводах) $\mathbf{I}_0 \rightarrow 0$. Токи I_L и I_C изменяются в противофазе и могут достигать при этом весьма больших значений.

В реальном контуре $R \ll \omega L$, поэтому $\varphi_L \leq \pi/2$. При некоторой частоте внешней ЭДС сдвиг фазы $\varphi = 0$, а токи I_L и I_C , находясь почти в противофазе, достигают максимальных значений (рисунок (б)). Это явление называется резонансом токов.

Частота, при которой наступает резонанс токов, определяется из соотношений

$$I_{C0} = I_{L0} \sin \varphi_L, \quad I_{C0} = \omega C \cdot \mathcal{E}_0, \quad I_{L0} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi_L = \frac{\omega L}{R}.$$

Отсюда получаем

$$\sin \varphi_L = \omega C \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_L}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_L}} = \frac{\omega L/R}{\sqrt{1 + (\omega L/R)^2}}.$$

Если учесть что $R \ll \omega L$, то резонансная частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

На этой частоте

$$I_{C0} = \omega_0 C \cdot \mathcal{E}_0, \quad I_{L0} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{(\omega_0 L)^2 + R^2}} \approx \frac{\mathcal{E}_0}{\omega_0 L} = I_{C0}$$

Ток в подводящих проводах

$$I_0 = I_{C0} \cos \varphi_L = \frac{\omega_0 C \cdot \mathcal{E}_0}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_0}} = \frac{\omega_0 C \cdot \mathcal{E}_0}{\sqrt{1 + (\omega_0 L/R)^2}} \approx \frac{I_{C0}}{Q} = \frac{\mathcal{E}_0}{RQ^2}.$$

Таким образом, токи в контуре в Q раз превышают ток в подводящих проводах, а сопротивление контура на этой частоте максимально и равно $Z = RQ^2$. Контур при этом ведет себя как активное сопротивление ($\varphi = 0$).

Это позволяет использовать резонанс токов в приемных устройствах для выделения электромагнитного сигнала в узком спектральном интервале частот вблизи резонансной частоты.

В индукционных печах параллельно катушке, создающей переменное магнитное поле, подключают емкость. Если условия резонанса выполняются, то ток в катушке увеличивается во много раз, а разностный ток в подводящих проводах при этом относительно невелик.

Трансформатор

Трансформатор (от лат. «transformo» - преобразовывать) - устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции переменного тока или напряжения. Преобразователем современного трансформатора является катушка Румкорфа, названная по имени ее изобретателя немецкого физика Г. Румкорфа (рисунок). На цилиндрический железный стержень намотана первичная обмотка из толстой проволоки с небольшим количеством витков, а поверх нее - вторичная обмотка из очень тонкой проволоки, имеющая несколько тысяч витков.

Первичная обмотка соединялась через прерыватель с источником постоянной ЭДС. Когда ток в первичной обмотке достигал определенной величины, подвижный контакт прерывателя притягивался к стержню (электромагниту), контакт разрывался и ток прекращался. Этот процесс периодически повторялся. При протекании по первичной обмотке последовательности импульсов тока появляется периодически изменяющееся магнитное поле. Это поле приводит к появлению во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции, которая пропорциональна числу витков вторичной обмотки и может достигать величины порядка десятков киловольт. При небольшом расстоянии между выходными контактами вторичной обмотки происходит пробой воздуха.

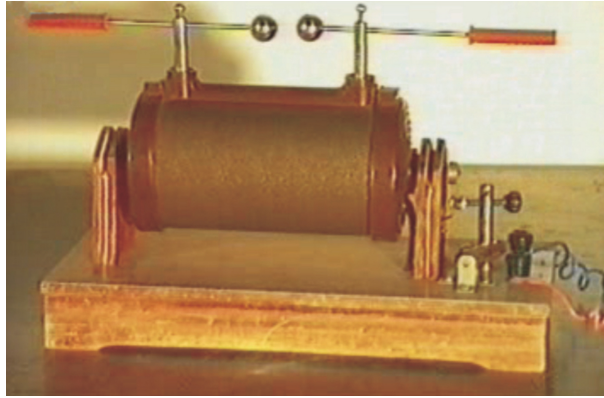


Рисунок 9: Катушка Г. Румкорфа

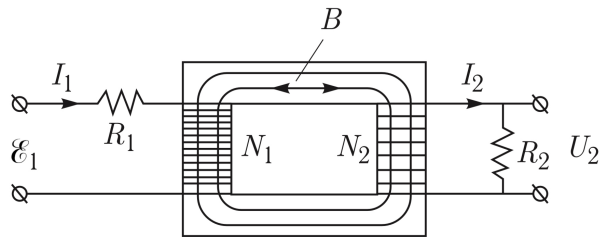


Рисунок 10: Схема трансформатора

Изобретателем трансформатора является русский физик П. Яблочков, получивший патент на изобретение в 1876 г. Современный трансформатор состоит из замкнутого сердечника, на который намотаны первичная и вторичная обмотки. Замкнутый сердечник является магнитопроводом, по которому передается магнитный поток, связывающий обе обмотки. Чтобы уменьшить потери на перемагничивание сердечник изготавливается из магнитомягкого ферромагнитного материала. Обычно используется трансформаторная сталь с добавками кремния, повышающими удельное сопротивление стали. Для устранения токов Фуко магнитопровод выполнен в виде набора пластин, изолированных друг от друга.

Рассмотрим принцип действия трансформатора. Пусть сначала вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а на первичную подается переменное синусоидальное напряжение. Это режим холостого хода. Как и всякую катушку индуктивности, первичную обмотку трансформатора можно рассматривать как последовательно соединенные индуктивность L и активное сопротивление R . Напряжение U_L на индуктивном сопротивлении $X_L = \omega L$ первичной обмотки опережает по фазе ток и, следовательно, напряжение U_R на ее активном сопротивлении на угол, равный $\pi/2$. Поэтому амплитудные значения поданного на первичную обмотку напряжения U_{01} и напряжений на R и L связаны соотношением

$$U_{01} = \sqrt{U_{0R}^2 + U_{0L}^2}$$

Разумеется, непосредственно измерить U_L и U_R по отдельности невозможно, так как первичная обмотка, строго говоря, не есть последовательно соединенные индуктивность L и активное сопротивление R : каждый элемент обмотки обладает одновременно индуктивностью и сопротивлением. Это так называемая цепь с распределенными параметрами. Но при расчете можно заменить реальную обмотку на цепь с сосредоточенными параметрами - катушку индуктивности и резистор, соединенные последовательно, поскольку через каждый элемент исходной цепи идет один и тот же ток.

Напряжение на индуктивности U_L в каждый момент времени компенсирует возникающую в первичной обмотке ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_1 , поэтому

$$U_L = -\mathcal{E}_1.$$

Если весь магнитный поток, создаваемый током первичной обмотки, целиком, т. е. без рассеяния, пронизывает вторичную обмотку, то индуцируемая в каждом витке вторичной обмотки ЭДС будет

такой же, как и в каждом витке первичной обмотки. Поэтому отношение электродвижущих сил в первичной и вторичной обмотках равно отношению чисел витков:

$$\mathcal{E}_1/\mathcal{E}_2 = n_1/n_2$$

На выходе разомкнутой вторичной обмотки существует напряжение, равное индуцируемой в ней ЭДС:

$$U_2 = \mathcal{E}_2$$

Получаем:

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} \mathcal{E}_1 = -\frac{n_2}{n_1} U_L$$

Значение напряжения на **разомкнутой** вторичной обмотке трансформатора пропорционально не подаваемому на первичную обмотку напряжению U_1 , а лишь напряжению на индуктивном сопротивлении первичной обмотки U_L . Отсюда сразу становится ясна роль сердечника трансформатора. В самом деле, напряжение на индуктивности U_L будет тем ближе к подаваемому на вход трансформатора напряжению U_1 , чем больше будет индуктивное сопротивление первичной обмотки ωL по сравнению с ее активным сопротивлением R . Наличие сердечника из материала с высокой магнитной проницаемостью приводит к многократному увеличению индуктивности L . У такого трансформатора на холостом ходу

$$U_2 \approx -\frac{n_2}{n_1} U_1$$

Знак минус означает, что эти напряжения находятся в противофазе. Благодаря большому индуктивному сопротивлению первичной обмотки ток в ней при разомкнутой вторичной цепи мал.

При замыкании вторичной цепи трансформатора на некоторую нагрузку во вторичной обмотке появляется ток. Создаваемый этим током магнитный поток направлен так, что, согласно закону Ленца, препятствует изменению магнитного потока, создаваемого током в первичной обмотке. Если бы при этом ток в первичной обмотке остался неизменным, то это привело бы к уменьшению магнитного потока. Значит, включение нагрузки во вторичную цепь эквивалентно уменьшению индуктивности первичной цепи. Но уменьшение индуктивного сопротивления немедленно приводит к увеличению тока в первичной обмотке, к уменьшению сдвига по фазе между напряжением и током и, следовательно, к увеличению потребляемой от внешней цепи мощности. Таким образом, если на холостом ходу трансформатор представляет собой почти чисто индуктивное сопротивление, то по мере увеличения нагрузки трансформатора, т. е. тока во вторичной цепи, характер сопротивления первичной обмотки трансформатора становится ближе к активному. Если потери энергии в самом трансформаторе малы, то на основании закона сохранения энергии потребляемая трансформатором мощность целиком передается нагрузке.

В реальном трансформаторе всегда имеются потери, связанные с выделением джоулевой теплоты в обмотках, с токами Фуко, с необратимыми явлениями при перемагничивании сердечника и с рассеянием магнитного потока. Но в современных трансформаторах суммарные потери не превышают нескольких процентов от передаваемой мощности. Коэффициент полезного действия трансформаторов очень высок и лежит в пределах 95-99,5 %.

На практике используются разнообразные трансформаторы: силовые трансформаторы, автотрансформаторы, трансформаторы тока и напряжения, согласующие трансформаторы, импульсные трансформаторы, разделительные трансформаторы и др.

Силовой трансформатор применяется для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. Поскольку потери на нагревание провода пропорциональны квадрату тока через провод, при передаче электроэнергии на большое расстояние выгодно использовать очень большие напряжения и небольшие токи. Поэтому для транспортировки электроэнергии сначала повышают напряжения на электростанциях до нескольких сотен киловольт и затем транспортируют электроэнергию по высоковольтным линиям электропередач (ЛЭП). На трансформаторных подстанциях, находящихся вблизи потребителей электроэнергии, напряжение понижают до требуемых величин.

В очень мощных трансформаторах электросетей даже при высоком коэффициенте полезного действия выделяется большая мощность в виде тепла. Поэтому трансформатор помещается в емкость, заполненную маслом. Масляные трансформаторы применяются при передаче мощности в несколько мегаватт и более.

Автотрансформатор - электрический трансформатор, обмотки которого гальванически соединены друг с другом (рисунок). Механически перемещая выходной контакт от одной обмотки к другой, можно получать различные напряжения на выходе трансформатора.

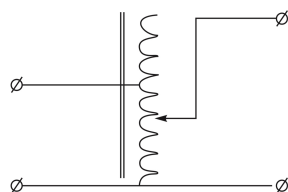


Рисунок 11: Схема автотрансформатора

Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, меньший расход стали для сердечника, меди для обмоток, меньший вес и габариты и в итоге - меньшая стоимость. К недостаткам относится отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепями. Поэтому применение автотрансформаторов оправдано для соединения эффективно заземленных сетей при небольших коэффициентах трансформации.

Трансформатор напряжения применяется для преобразования высокого напряжения в низкое в измерительных цепях. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

Трансформатор тока применяется для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную цепь включаются измерительные приборы.

Подготовка к контрольной работе №2

ЗАДАЧА 1

В цепи, схема которой показана на рисунке, заряд верхнего конденсатора равен q , а нижний не заряжен. В момент $t = 0$ ключ замыкают. Найти зависимость от времени заряда $q_1(t)$ верхнего конденсатора и тока $I(t)$ в катушке.

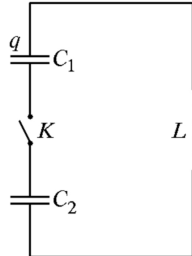


Рисунок 12

Ответ:

$$q_1(t) = q \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \cos \omega_0 t \right)$$
$$I(t) = q \sqrt{\frac{C_2}{L(C_1 + C_2)C_1}} \sin \omega_0 t.$$

ЗАДАЧА 2

На рисунке показана простейшая схема сглаживающего фильтра. На вход подается напряжение $U(t) = (1 + \cos \omega t)$. Найти выходное напряжение $U'(t)$.

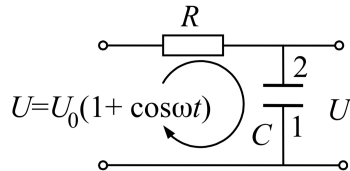


Рисунок 13

Ответ: $U' = U_0 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \cos(\omega t - \varphi) \right], \quad \operatorname{tg} \varphi = \omega RC$

ЗАДАЧА 3

Колебательный контур содержит катушку с индуктивностью L и конденсатор с утечкой. Емкость конденсатора C , его активное сопротивление R . Найти частоту затухающих колебаний такого контура, пренебрегая сопротивлением катушки.

Ответ: $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4R^2C^2}}$

Контрольные вопросы

1. Почему аналогом жесткости k пружинного осциллятора является величина $1/C$, а аналогом массы m - индуктивность L ?
2. Приведите обоснование вывода выражения для собственной частоты электромагнитных колебаний в контуре из аналогии с механическим пружинным осциллятором.
3. Гармонические колебания в LC -контуре характеризуются амплитудой, частотой, периодом, фазой колебаний, начальной фазой. Какие из этих величин определяются свойствами самого колебательного контура, а какие зависят от способа возбуждения колебаний?
4. Докажите, что средние значения электрической и магнитной энергий при собственных колебаниях в контуре равны между собой и составляют половину полной электромагнитной энергии колебаний.
5. Как применить законы квазистационарных явлений в электрической цепи для вывода дифференциального уравнения гармонических колебаний в LC -контуре?
6. Какому дифференциальному уравнению удовлетворяет сила тока $I(t)$ в LC -контуре?
7. Проведите вывод уравнения для скорости убывания энергии электромагнитных колебаний при малом затухании (наличии последовательно соединенного активного сопротивления R в контуре) аналогично тому, как это было сделано для механического осциллятора с трением, пропорциональным скорости, и покажите, что для промежутков времени, значительно превосходящих период колебаний, это убывание происходит по экспоненциальному закону.
8. Поясните вывод уравнения для вынужденных колебаний заряда конденсатора колебательного контура. Что такое установившиеся колебания?
9. Получите выражение для амплитуды и сдвига фазы установившихся вынужденных колебаний заряда конденсатора методом векторных диаграмм.
10. Объясните, почему резонансные явления возможны только в электрических цепях, содержащих оба вида реактивных элементов, т. е. и конденсаторы, и катушки индуктивности.
11. На что расходуется поступающая в колебательную систему энергия внешнего источника при установившихся колебаниях и в процессе их раскачки?
12. При собственных колебаниях в контуре средние значения электрической энергии конденсатора и магнитной энергии катушки равны между собой. Что можно сказать об этих средних значениях при установившихся вынужденных колебаниях?
13. Почему при установившихся вынужденных колебаниях мощность, поступающая в контур от внешнего источника, равна мощности джоулевых потерь лишь в среднем за период, а не в каждый момент времени?