

63-64 Резонанс напряжений

Явление резкого увеличения амплитуды колебаний при совпадении частоты вынуждающих колебаний с собственной частотой системы называется резонансом.

В электрических цепях также возможны резонансные явления. Цепь, содержащая электрическую емкость и индуктивность, может являться колебательным контуром (рис. 10.5).

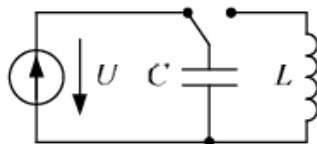


Рис. 10.5. Схема колебательного контура

Если конденсатор зарядить до некоторого напряжения U , а затем замкнуть на индуктивность L , то в контуре возникает постепенно увеличивающийся разрядный ток. По мере увеличения силы тока в магнитном поле индуктивности L накапливается энергия $\frac{Li^2}{2}$. Благодаря этому ток в контуре не прекращается, когда емкость конденсатора полностью разряжается, поскольку ЭДС самоиндукции противодействует уменьшению тока. Она поддерживает ток в том же направлении, в каком он протекал при разряде кон-

денсатора, но уже за счет энергии магнитного поля индуктивности. Этот ток для электрической емкости становится током, заряжающим ее в обратном направлении, т. е. в обкладке, имевшей вначале положительный заряд, теперь сообщается отрицательный заряд. Если в колебательном контуре нет потерь, перезарядка конденсатора будет продолжаться до тех пор, пока он не зарядится до первоначального напряжения U . При этом вся энергия из магнитного поля индуктивности вернется в электрическое поле конденсатора, после чего начнется разряд его на индуктивность при обратном направлении тока и т. д. В идеальном контуре (активное сопротивление контура $R = 0$) эти колебания будут незатухающими.

Таким образом, колебания тока в рассматриваемом контуре связаны с периодическим преобразованием энергии электрического поля $W_e = \frac{Cu^2}{2}$ в энергию магнитного поля $W_m = \frac{Li^2}{2}$ и обратно.

Обмен энергиями происходит с некоторой частотой, которая называется частотой свободных колебаний, так как в цепи нет источника. Колебания, которые возникают под действием внешних сил, называются вынужденными. В электрических цепях к таким внешним силам относятся источники ЭДС и источники тока. При наличии колебательного контура и вынужденной силы в электрической цепи могут возникнуть резонансные явления. Характеризовать интенсивность колебаний можно по различным проявлениям, например по наибольшему возможному амплитудному значению напряжения на конденсаторе (амплитудный критерий).

Рассматривая электрические цепи с одним источником питания, в качестве критерия режима резонанса принимают совпадение по фазе тока и напряжения на входе электрической цепи. Это так называемый фазовый резонанс.

Резонанс в электрической цепи – явление, при котором разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю, хотя она содержит участки с индуктивными и емкостными элементами. То есть это режим работы электрической цепи, когда при наличии емкости и индуктивности входное реактивное сопротивление цепи или входная реактивная проводимость цепи равны нулю.

Электрический резонанс имеет большое практическое значение. Электрические резонансные контуры широко используются в

радиотехнике, измерительной технике, телеуправлении, различных схемах автоматики, рентгеноסקопии. Явления резонанса применяются для изменения (компенсации) параметров линии электропередачи. То, что при резонансе токов колебания больших магнитных и электрических полей поддерживаются при относительно малом токе в неразветвленной цепи, широко используется для повышения коэффициента мощности промышленных установок.

Однако в некоторых случаях резонансные явления могут быть очень опасными как для жизни обслуживающего персонала, так и для целостности электрического оборудования. Особенно опасны резкие увеличения напряжения на реактивных элементах при резонансе напряжения: может нарушиться электрическая прочность изоляции конденсатора и катушки. Характерным примером служит включение кабельной линии на генераторное напряжение. Кабель обладает большой электрической емкостью, а генератор индуктивным сопротивлением, может создаться резонансный контур.

В простейших электрических цепях различают резонанс напряжений и резонанс токов.

Простейшая электрическая цепь, в которой может возникнуть резонанс напряжений, состоит из последовательно соединенных конденсатора и индуктивной катушки (рис. 10.6).

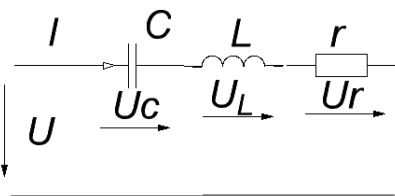


Рис. 10.6. Цепь последовательного соединения R, L, C

Подключив колебательный контур к внешнему источнику, ЭДС которого изменяется по синусоидальному закону, можно возбудить вынужденные электрические колебания в цепи. При приближении частоты внешней ЭДС к частоте собственных колебаний колебательного контура резко возрастают амплитуды вынужденных колебаний тока и напряжений – в цепи возникает электрический резонанс.

Условие резонанса вытекает из определения резонанса. Так как для рассматриваемой цепи полное сопротивление

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

то для условия резонанса необходимо иметь реактивное сопротивление, равное нулю, т. е.

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

из чего следует, что **условием резонанса напряжений является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений**:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (10.8)$$

При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений полное сопротивление становится равным активному сопротивлению: $Z = R$, т. е. принимает минимальное из всех возможных значение, что приведет к **максимальному значению тока**. Ток в режиме резонанса будет ограничиваться только активным сопротивлением:

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R}.$$

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах будут равны, но противоположны по фазе, причем эти напряжения **могут достигать достаточно больших значений** (при малом активном сопротивлении цепей) и превышать напряжение источника, поэтому резонанс в рассматриваемой цепи носит название **резонанса напряжений**. Ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе (рис. 10.7), $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

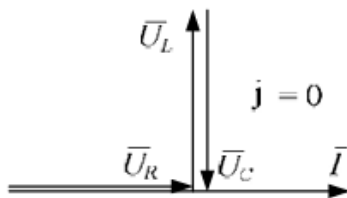


Рис. 10.7. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Из условия резонанса напряжений можно определить **угловую частоту ω_0** , при которой **наступает резонанс** при неизменных параметрах L и C , $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, откуда

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

Угловая частота $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ **есть частота собственных колебаний последовательного колебательного контура**. Следовательно, **можно получить резонанс напряжения, изменяя частоту вынужденных колебаний, т. е. частоту источника ЭДС, либо изменяя параметры колебательного контура L и C** .

Перенапряжения на элементах электрической цепи при резонансе возможны, **когда** активное сопротивление R меньше индуктивного: $R < \omega L$, а следовательно, и емкостного: $R < \frac{1}{\omega C}$. Поскольку при резонансе напряжение источника $U = IR$, то при выше принятых условиях

$$U = IR < U_L = I\omega_0 L; \quad (10.9)$$

$$U = IR < U_C = I \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (10.10)$$

Подставив в неравенства (10.9) и (10.10) $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получим одно общее **условие возникновения повышенных напряжений**:

$$R < \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (10.11)$$

Величина $\sqrt{\frac{L}{C}}$ **имеет размерность сопротивления**, она именуется **характеристическим или волновым сопротивлением колебательного контура** и обозначается ρ .

Отношение волнового сопротивления к активному сопротивлению колебательного контура характеризует важные резонансные свойства контура и называется *добротностью контура*:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{L}}{R \sqrt{C}}.$$

Добротность контура показывает, во сколько раз резонансные индуктивные и емкостные напряжения больше входного напряжения.

Подбор параметров цепи с целью получить в цепи резонанс называют *настройкой цепи в резонанс*.

При резонансе ω , L и C связаны соотношением, вытекающим из условия резонанса напряжений (10.8): $\omega^2 LC = 1$. Таким образом, настройку цепи в резонанс можно осуществить по-разному. Например, меняя угловую частоту ω источника энергии при неизменных L и C , меняя индуктивность L при неизменных ω и C , меняя емкость C при неизменных ω и L и т. д.

Так как при резонансе напряжения U_C и U_L равны по величине и находятся в противофазе, то в любой момент времени равны по величине и противоположны по знаку *мгновенные мощности на элементах L и C* , т. е.

$$p_L = -p_C.$$

Поэтому *накопление энергии магнитного поля происходит только за счет энергии электрического поля, и наоборот. Вся энергия, получаемая цепью от генератора, преобразуется в теплоту в активном сопротивлении.*