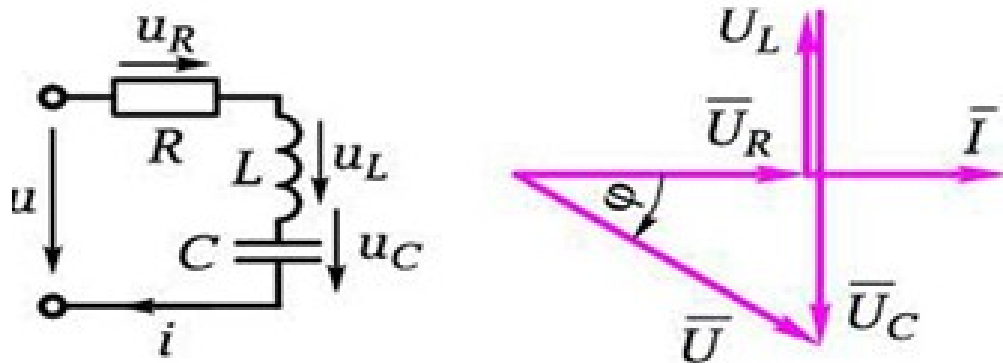


## Последовательное включение катушки индуктивности и конденсатора.

Для неразветвленной, содержащей катушку индуктивности с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  и конденсатор с емкостью  $C$  (рис),



полное сопротивление определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Характер нагрузки зависит от величины и знака угла  $\varphi$ , определяемого соотношением индуктивного  $X_L$  и емкостного  $X_C$  сопротивлений. В общем случае угол  $\varphi$  может изменяться от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ .

Если  $X_L < X_C$ , то цепь носит емкостной характер и угол  $\varphi < 0$ . Если  $X_L > X_C$ , то цепь носит индуктивный характер и угол  $\varphi > 0$ .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенных значений напряжений справедливо выражение

$$u = u_R + u_C + u_L$$

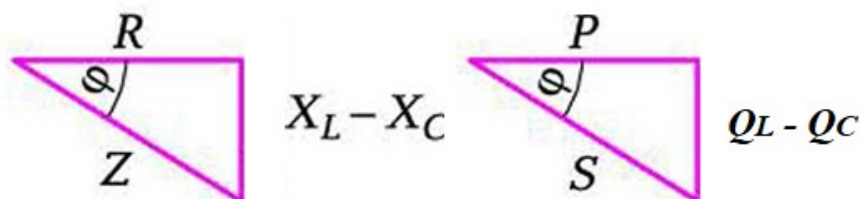
для векторов

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Согласно векторной диаграмме напряжение питания цепи может быть определено

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Векторная диаграмма напряжений построена относительно общего для всех элементов цепи тока  $I$  (рис). Треугольник сопротивлений и треугольник мощностей принимает вид.



Из треугольников определяются полное сопротивление и полная, активная и реактивная мощности

## Резонанс напряжений

Практический интерес представляет случай, когда  $\varphi = 0$ . Это может иметь место, если  $X_L = X_C$ . При этом  $U = IR$ , т. е. сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует. Ток  $I = U/R$  максимален, так как минимально полное сопротивление цепи ( $Z = R$ ). В связи с этим напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе равны ( $U_L = IX_L = U_C = IX_C$ ), максимальны и могут значительно превышать напряжение питания.

В технике явление увеличения напряжения на отдельных элементах цепи по отношению к напряжению источника питания получило название *резонанс напряжений*.

Резонансная частота в электрической цепи с катушкой индуктивности и конденсатором, называемой в радиотехнике LC-контуром, равна частоте напряжения, подводимого к цепи.

Из условия

$$X_L = X_C, \text{ или } 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

может быть получено выражение для резонансной частоты:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 LC}$$

Поскольку при резонансе напряжений ток в цепи определяется только лишь активной составляющей сопротивления цепи, обмен реактивной мощностью между цепью и источником отсутствует. Реактивная мощность циркулирует внутри контура от катушки индуктивности к конденсатору и обратно. При этом энергия электрического поля конденсатора переходит в энергию магнитного поля катушки индуктивности, и наоборот. Коэффициент мощности  $\cos\varphi = P/S = 1$ .

При рассмотрении колебательного контура используют также такие понятия, как характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Ом,}$$

добротность контура

$$Q = U_L/U_R = \rho/R.$$

При резонансе

$$\rho = X_L = X_C = X \quad \text{и} \quad Q = X/R,$$

т. е. чем больше реактивное сопротивление  $X$  по отношению к активному  $R$ , тем выше добротность контура.

Таким образом, *условием* резонанса напряжений является равенство реактивных сопротивлений конденсатора и катушки индуктивности:  $X_L = X_C$ .

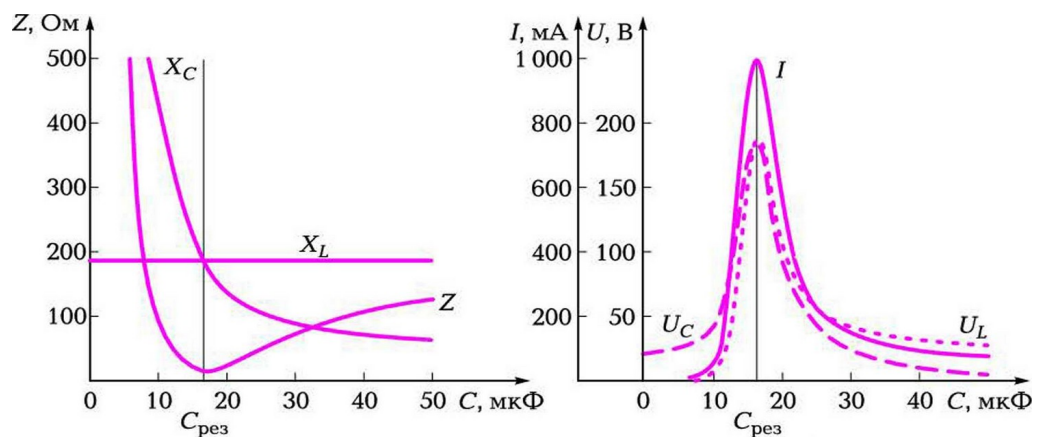
Следствием резонанса являются:

- минимальное значение полного сопротивления цепи ( $Z = R$ );
- максимальное значение тока в цепи ( $I = U/R$ );
- потребление цепью чисто активного тока ( $\varphi = 0$ ,  $\cos\varphi = P/S = 1$ );
- равенство напряжений на реактивных элементах ( $U_L = U_C$ ) и воз-

возможность значительного превышения ими напряжения источника питания.

Получение резонанса напряжений возможно либо за счет изменения частоты источника питания, либо за счет изменения собственной частоты контура путем изменения индуктивности  $L$  или емкости  $C$ .

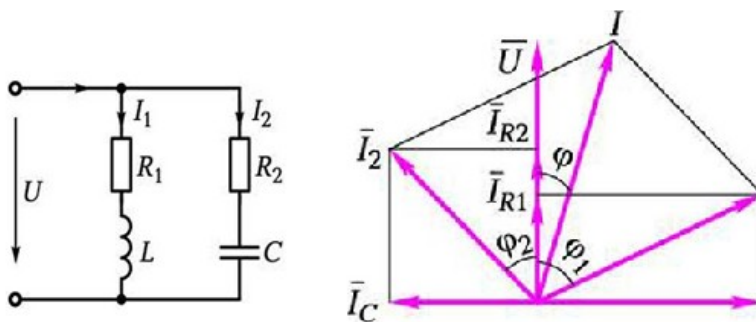
На практике чаще используют конденсаторы переменной емкости, изменение которой позволяет настроить контур в резонанс. При этом индуктивное сопротивление остается неизменным, а емкостное изменяется по гиперболическому закону. В результате изменяется полное сопротивление  $Z$ , что ведет к изменению потребляемого тока  $I = U/Z$  и напряжений на элементах цепи  $U_L = IX_L$  и  $U_C = IX_C$  (рис.).



Резонанс напряжений — явление опасное и вредное, поскольку возможен пробой изоляции проводов и конденсаторов. В то же время в радиотехнике это явление нашло широкое применение для построения резонансных контуров в приемопередающих устройствах.

### Электрическая цепь переменного тока с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности.

#### Понятие проводимостей на переменном токе



активную ( $q$ ) и реактивную ( $b$ ).

Пусть для цепи, схема которой приведена на рисунке, известны параметры

По аналогии с постоянным током при параллельном соединении элементов цепи переменного тока анализ проще вести, пользуясь понятием проводимостей. В цепях переменного тока различают проводимости трех видов — полную ( $y$ ),

$U$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L$  и  $C$ . Для определения токов в ветвях и построения векторной диаграммы воспользуемся следующими выражениями:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}; I_2 = \frac{U}{Z_2}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \sin\varphi_1 = \frac{X_L}{Z_1}; \sin\varphi_2 = \frac{X_C}{Z_2}$$

В этом случае активные и реактивные составляющие токов

$$I_{R1} = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{U R_1}{Z_1^2} = U q_1; I_{R2} = U q_2;$$

$$I_L = I_1 \sin\varphi_1 = \frac{U X_L}{Z_1^2} = U b_L; I_C = U b_C$$

где  $q_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$  и  $q_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$  - активные составляющие проводимостей;

$b_L = \frac{X_L}{Z_1^2}$  и  $b_C = \frac{X_C}{Z_2^2}$  - реактивные составляющие проводимостей (соответственно индуктивная и емкостная);

$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}$ ;  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2}$  — полные сопротивления параллельных ветвей.

Полная проводимость — это величина, обратная полному сопротивлению:  
 $y = 1/Z$ .

Построение векторной диаграммы удобно начать с вектора напряжения  $U$ , так как напряжение является общим для двух параллельных ветвей.

Векторы составляющих токов откладываем под соответствующими углами: для активных составляющих  $\varphi = 0$ , для реактивных  $\varphi_1 = 90^\circ$  (индуктивная составляющая) и  $\varphi_2 = -90^\circ$  (емкостная составляющая).

Получив векторы активных и реактивных составляющих токов, строим векторы токов в ветвях  $I_1$  и  $I_2$ . Далее по правилу параллелограмма находим вектор общего тока  $I$ , потребляемого цепью, и угол сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi$ .

### Резонанс токов.

При параллельном соединении элементов  $L$  и  $C$  в цепях переменного тока может иметь место явление резонанса токов.

В общем случае угол  $\varphi$  между векторами общего тока цепи и напряжения может изменяться от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ . Значение угла  $\varphi$  зависит от соотношения реактивных проводимостей ветвей с индуктивностью и емкостью.

Практический интерес представляет равенство реактивных проводимостей ( $b_L = b_C$ ) — условие возникновения резонанса токов. В этом случае  $\varphi = 0$ , общий ток  $I$  совпадает по фазе с напряжением источника  $U$ . При этом ток  $I$  имеет только активную составляющую и определяется лишь активной проводимостью  $q = R/Z^2$ .

В идеальном случае при  $R_1 = R_2 = 0$  активная проводимость  $q$  равна нулю и общий потребляемый ток  $I = Uq$  также равен нулю. Однако реактивные токи в ветвях  $I_L$  и  $I_C$  отличаются от нуля, равны по величине и противоположны по фазе. При  $b_L = b_C \gg q$  реактивный ток может достигать весьма больших значений, т. е. имеет место резонанс токов.

Энергетические процессы при резонансе токов аналогичны процессам при резонансе напряжений. Полная мощность равна активной мощности ( $S = P$ ), реактивная мощность от источника не потребляется ( $Q = 0$ ), коэффициент мощности равен единице ( $\cos \varphi = 1$ ).

Явление резонанса токов широко используется в технике, например в технике связи и автоматике. В энергетических устройствах резонанс токов в отличие от резонанса напряжений — явление безопасное, так как совпадение частоты питания с собственной частотой контура не приводит к нежелательным последствиям.

### Пути повышения коэффициента мощности

Большинство промышленных потребителей переменного тока имеют активно-индуктивный характер и, следовательно, потребляют значительную реактивную мощность. К ним в первую очередь относятся асинхронные двигатели (приводные двигатели металлорежущих станков), установки электросварки, высокочастотной заковки.

Потребление реактивной мощности ведет к снижению коэффициента мощности  $\cos \varphi = P/S$ , что обуславливает недоиспользование мощности генераторов, линий передачи и трансформаторов. Они бесполезно загружаются реактивным током индуктивного характера. Кроме того, низкий коэффициент мощности требует большей площади поперечного сечения подводящих проводов.

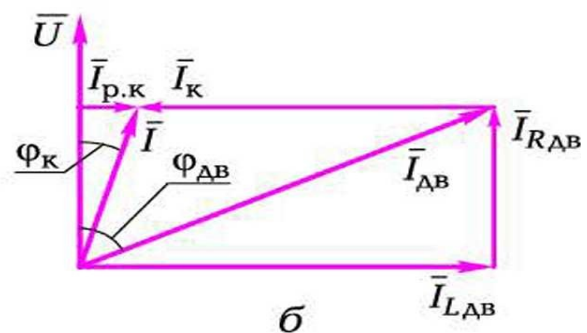
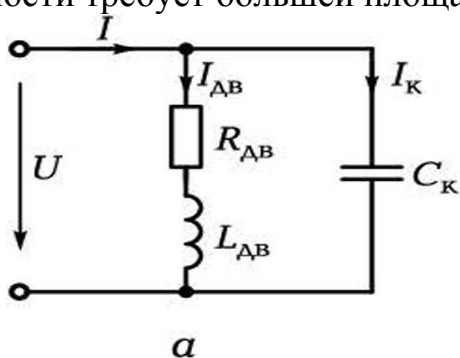


Схема ЭЦ с обмоткой двигателя и параллельно включенной батареей конденсаторов [а] и векторная диаграмма (б)

Использование резонанса токов дает возможность избавить источники энергии и передающие устройства от бесполезных колебаний энергии, замкнув их в контуре, образуемом катушкой индуктивности и конденсатором.

Так, подключение параллельно обмотке двигателя батареи конденсаторов  $C_K$  (рис. а) позволяет уменьшить реактивную составляющую тока, а следовательно, снизить реактивную мощность  $Q = Q_L - Q_C$ , потребляемую из сети,

и тем самым повысить коэффициент мощности  $\cos\varphi$ . На представленной на рис. б векторной диаграмме  $I_{L_{дв}}$  — реактивный ток до компенсации;  $I_{p_{к}}$  — реактивный ток после компенсации;  $I_{к}$  — реактивный ток в ветви с конденсатором;  $\varphi_{дв}$  — угол сдвига фаз между током и напряжением до компенсации;  $\varphi_{к}$  — угол сдвига фаз между током и напряжением после компенсации.

Предприятиям устанавливают вполне определенное значение  $\cos\varphi$  (от 0,95 до 0,98). За более низкий  $\cos\varphi$  предприятия штрафуют, поэтому главные энергетики борются за повышение коэффициента мощности даже на сотые доли.