

10. Електрически Филтри

1. Определение

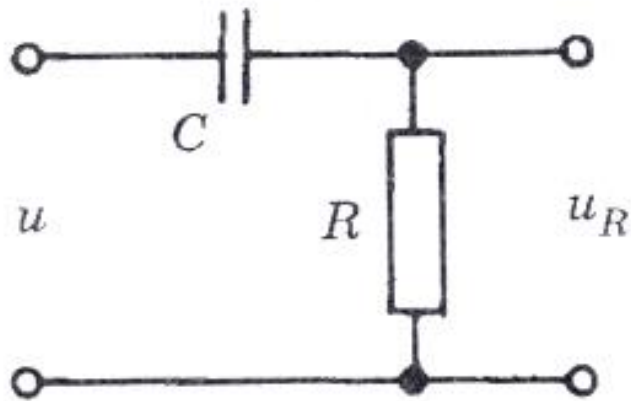
Електрическите филтри са вериги, които пропускат електрически сигнали в определена честотна област (*лента на пропускане*) и не пропускат сигнали с честоти извън нея (*лента на задържане*).

Обикновено те представляват **четириполюсници**, включени между източник на сигнали с вътрешно съпротивление R_r и товарно съпротивление R_T .



10. Електрически Филтри

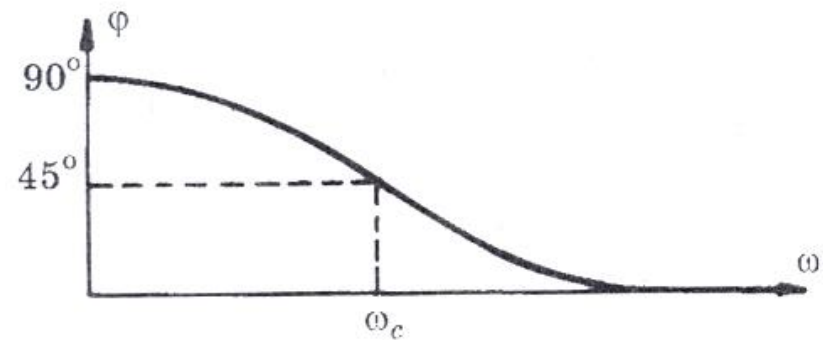
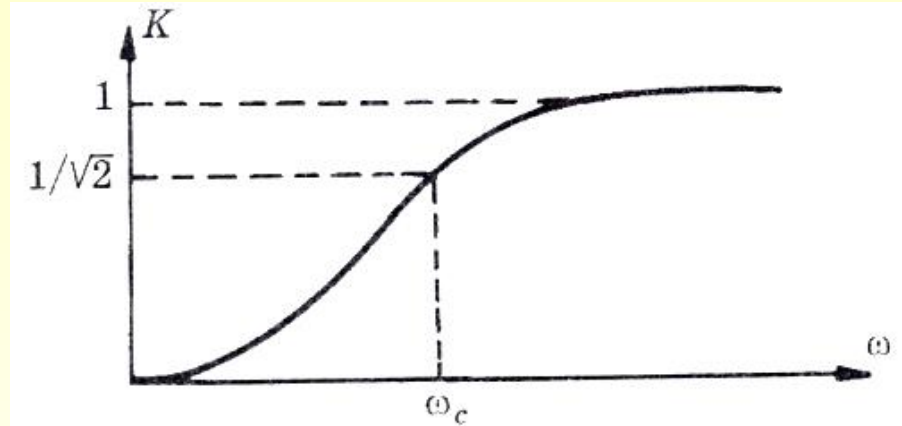
Пример:



$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$K(\omega) = U_R(\omega) / U(\omega)$$

$$\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)$$



10. Електрически Филтри

2. Основни характеристики на филтрите.

Комплексният коефициент на предаване на филтъра е отношението на изходното към входното напрежение

1.
$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = K \cdot e^{j\phi} = \dot{K}(\omega)$$
 Амплитудно-фазова характеристика на филтъра
 $\phi = \phi_2 - \phi_1$ - фазова разлика м/у изходното и входно U

2.
$$K(\omega) = \frac{U_{2m}(\omega)}{U_{1m}(\omega)}$$
 Амплитудно-честотна характеристика (АЧХ)

3.
$$\phi(\omega) = \phi_2 - \phi_1$$
 Фазово-честотна характеристика (ФЧХ)

Идеален филтър: $K(\omega) = 1, \phi(\omega) = 0$ в лентата на пропускане

$K(\omega) \ll 1, \phi(\omega) = \pi / 2$ в лентата на непропускане

За честотната лентата на пропускане филтърът трябва да има малко съпротивление, а извън нея - много високо.

10. Електрически Филтри

$$K = \ln \frac{U_{2m}}{U_{1m}} (Np) \quad \equiv \quad K = 20 \cdot \lg \frac{U_{2m}}{U_{1m}} (dB)$$

$$K = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} (dB)$$

$$1 Np = 8.68 dB$$

↑
Непер

↑
Децибел

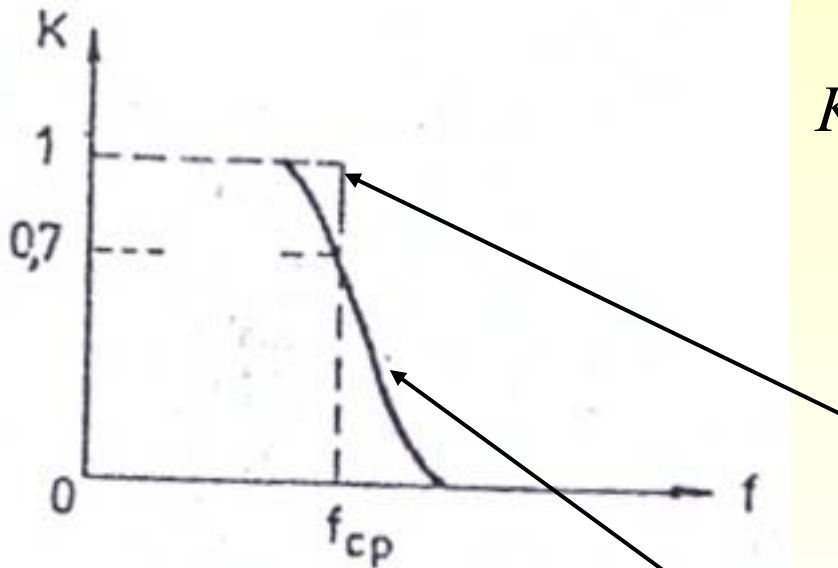
Коефициент на предаване по напрежение и по мощност!

Зад.1 Филтър $f=100$ MHz $U_{2m}=0.2$ V, $U_{1m}=20$, $K=?$ (dB)

Зад.2 Телефонът ви приема 5G сигнал с $P_2=1$ pW а излъчената мощност от базовата станция е 20 W, колко е коефициентът на предаване (затихване) в на сигнала по мощност в (dB)?

10. Електрически Филтри

НЧ филтър- пропуска ниски честоти



$$K(f) = \frac{U_{2m}(f)}{U_{1m}(f)} \quad - \text{ Амплитудно-честотна характеристика (АЧХ)}$$

идеален филтър (пунктирана линия)

реален филтър

$$K(f_H) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

f_C – гранична честота (честота на срязване) е тази, за която $K = 0.707 K_0$ (горна гранична - f_H или долна гранична f_L честота).
Лента на пропускане $\rightarrow 0$ до f_H , непропускане $f_H - \infty$ (безкрайност)

10. Електрически Филтри

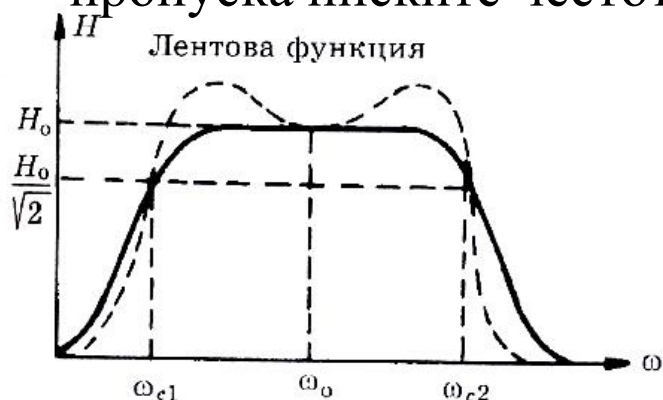
3. Видове филтри

приемаме $H(\omega) = K(\omega)$

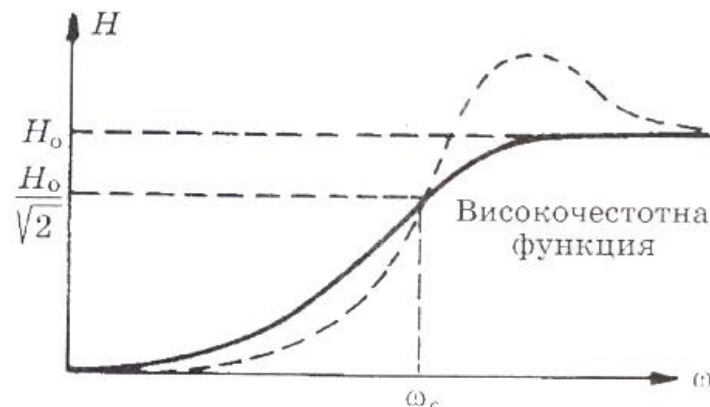


- **нискочестотен (Low Pass)**

пропуска ниските честоти

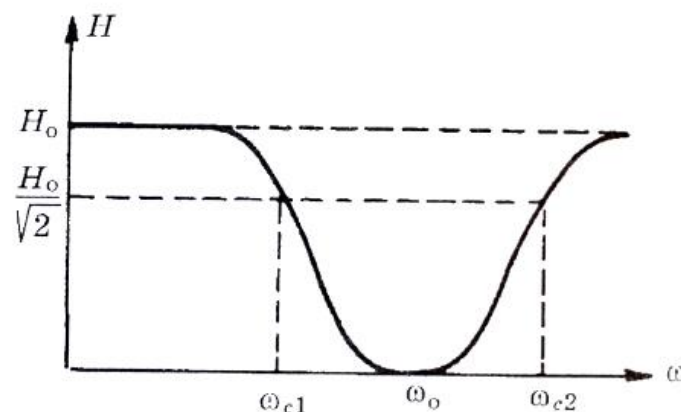


- **лентов (Band Pass)**



- **високочестотен (High Pass)**

пропуска високите честоти



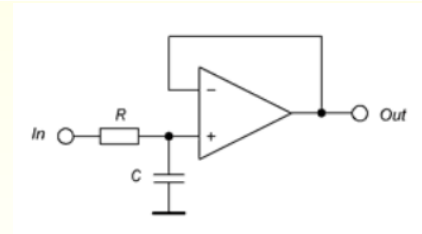
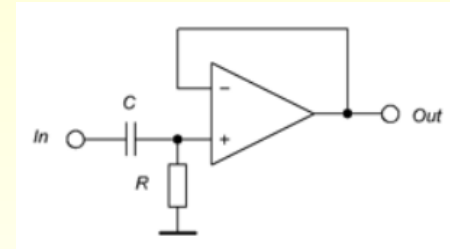
- **заграждащ филтър (Notch, band-rejection)**

Непрекъснатата линия - **RC-филтър** , пунктирна линия - **LC-филтър**

10. Електрически Филтри

- **Пасивни филтри** - използват само пасивни елементи (RC, LC):
- -НЧ филтър- пропуска сигнали с ниски честоти;
- -ВЧ филтър- пропуска сигнали с високи честоти;
- -Лентов филтър- пропуска сигнали в дадена честотна лента;
- -Лентов заграждащ филтър- не пропуска в дадена лента.

- **Активни филтри** - филтър + ОУ (ОЕ-II)



- Според съставните им елементи филтрите са:

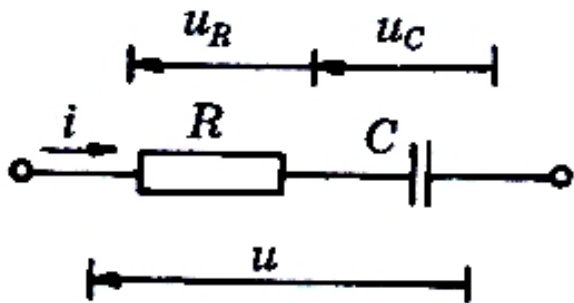
- **RC филтри** – съставните им елементи са резистори и кондензатори –най-голямо приложение в интегралната електроника.
- **LC филтри** – съставните им елементи са бобини и кондензатори

10. Електрически Филтри

4. Пасивни RC схеми

RC - веригите са части от сложни схеми, съдържащи последователно или паралелно свързани един или повече резистори и кондензатори.

4.1 Последователна схема



RC -веригата, се разглежда като
двуполюсник, включен към източник
на напрежение U

Токът през веригата i се определя от комплексния импеданс на схемата:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} \quad , \quad \text{където} \quad \dot{Z} = R - jX_C = R - j1/(\omega C)$$

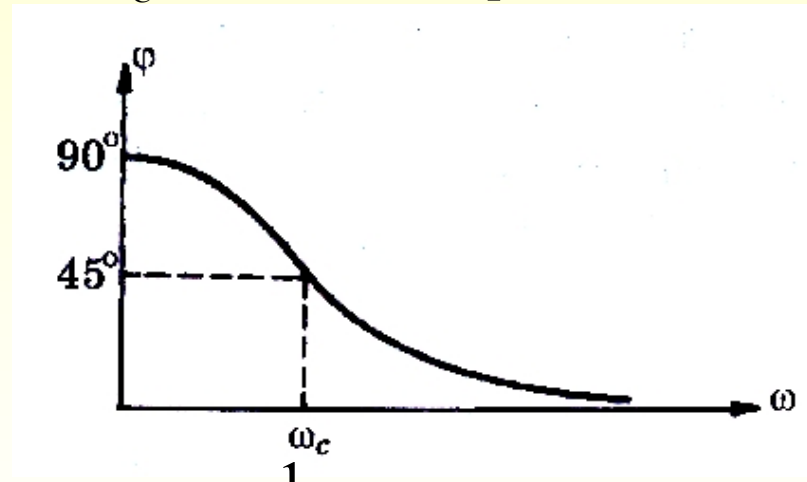
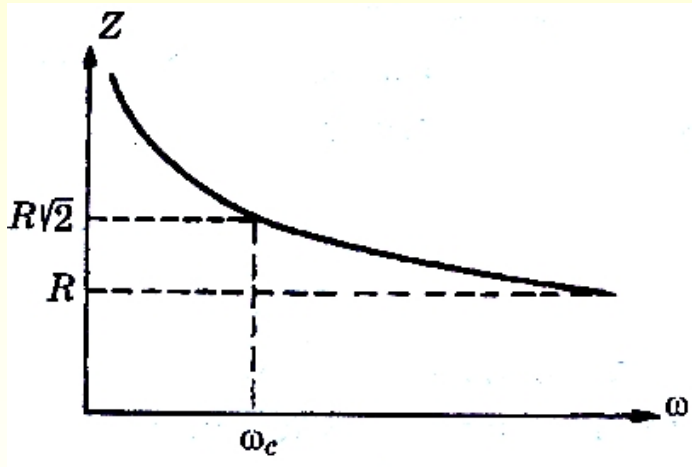
10. Електрически Филтри

Модулът и фазата на импеданса са:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-1}{\omega C.R}\right)$$

U_C - закъснява спрямо тока



При ниски честоти $(1/\omega C) \gg R$

При високи честоти $(1/\omega C) \ll R$

$$\longrightarrow Z \cong \frac{1}{\omega.C} \quad \varphi \approx 90^\circ$$

$$\longrightarrow Z \cong R \quad \varphi \approx 0^\circ$$

При $\omega = \omega_c$ $R = X_C$

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \Rightarrow Z(\omega) = R\sqrt{2} \quad \varphi(\omega_c) = 45^\circ$$

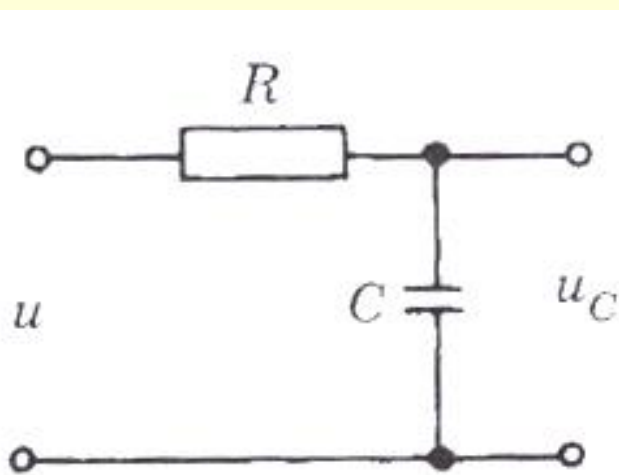
10. Електрически Филтри

- Нискочестотен филтър-НЧФ

Разглеждаме RC -веригата като четириполъусник

$U_1 = u$ – входно напрежение

$U_2 = u_C$ – изходно напрежение



$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{X}_C \cdot i}{\dot{Z} \cdot i} = \frac{1/j\omega C}{(1/j\omega C + R)} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$K(\omega) = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\operatorname{Im} \dot{K})^2}$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{arctg}(\operatorname{Im} \dot{K} / \operatorname{Re} \dot{K})$$

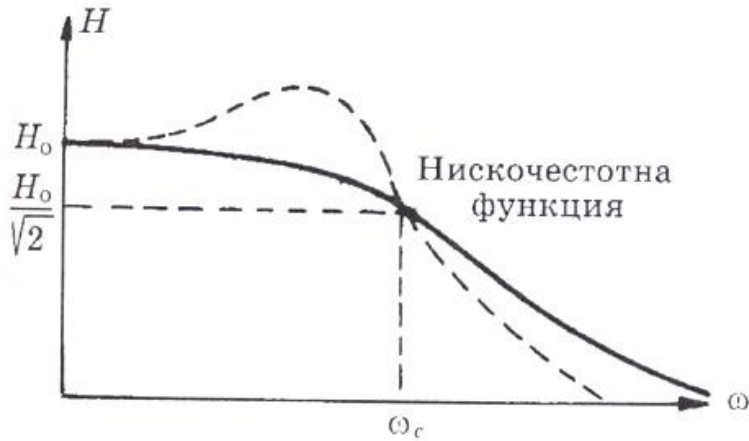
$$\text{При НЧ} \Rightarrow R \ll \frac{1}{\omega C} \Rightarrow U_2 = U_C \approx U_1$$

$$\text{При ВЧ} \Rightarrow R \gg \frac{1}{\omega C} \Rightarrow U_2 = U_C \ll U_1$$

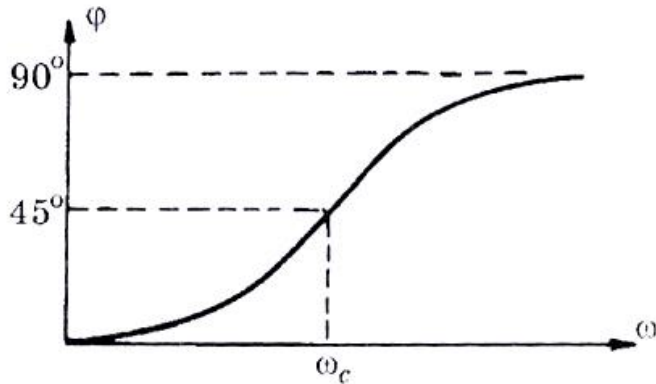
При ниски честоти токът се определя от C , той изпреварва напрежението U на 90° . Изходното напрежение е $U_R = iR$ и неговата фаза се определя от $i(\omega)$!

10. Електрически Филтри

АЧХ



ФЧХ



НЧФ (LOWPASS)

Пропуска сигнали с ниска честота и не пропуска сигнали с висока честота

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}(-\omega RC)$$

$$K = 0.707 = 1/\sqrt{2} \rightarrow \omega RC = 1$$

$$\omega_c = \frac{1}{R.C} = 2\pi \cdot f_c \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi.R.C}$$

ω_c, f_c – горна гранична честота

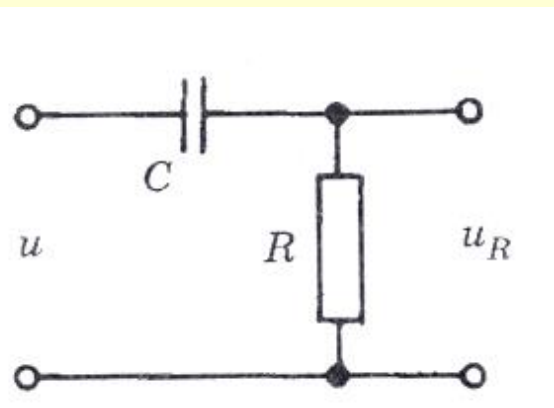
$\Delta\omega = 0 \div \omega_c$ – лента на пропускане

от ω_c до ∞ – лента на непропускане

Зад. Определете ω_c, f_c и лентата на пропускане на НЧ филтър ако $R=100\Omega, C=2\mu F$

10. Електрически Филтри

- Високочестотен филтър - ВЧФ



$$U_2 = u_R \quad - \text{изходно напрежение}$$

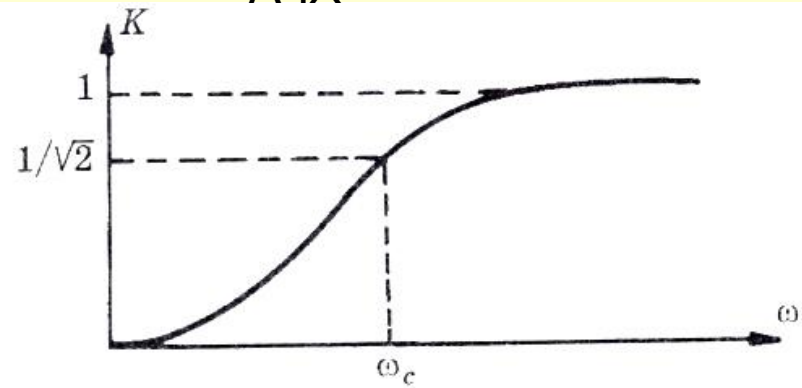
$$\dot{K} = \frac{R \cdot I}{\dot{Z} \cdot I} = \frac{1}{1 + j \frac{1}{1 + \omega RC}}$$

$$\text{При НЧ} \Rightarrow R \ll \frac{1}{\omega C} \Rightarrow U_2 = U_R \ll U_1$$

$$\text{При ВЧ} \Rightarrow R \gg \frac{1}{\omega C} \Rightarrow U_2 = U_R \approx U_1$$

10. Електрически Филтри

АЧХ

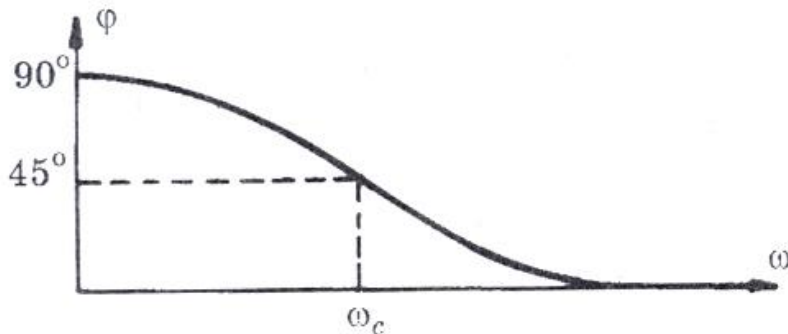


ВЧФ (HIGHPASS)

Пропуска сигнали с висока честотта и не пропуска сигнали с ниска честота

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R^2 C^2}}}$$

ФЧХ



$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{\omega RC}$$

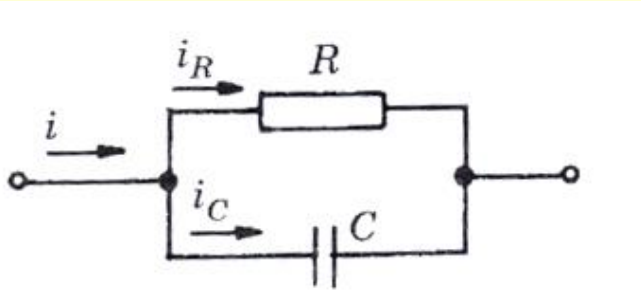
$\Delta\omega = \omega_c \div \infty$ – лента на пропускане
 от 0 до ω_c – лента на непропускане
 ω_c – долна гранична честота

Зад. Определете ω_c , f_c и лентата на непропускане на ВЧ филтър ако $R=1\text{k}\Omega$, $C=2\text{ nF}$.
 Начертайте АЧХ и ФЧХ като отбележите ω_c .

10. Електрически Филтри

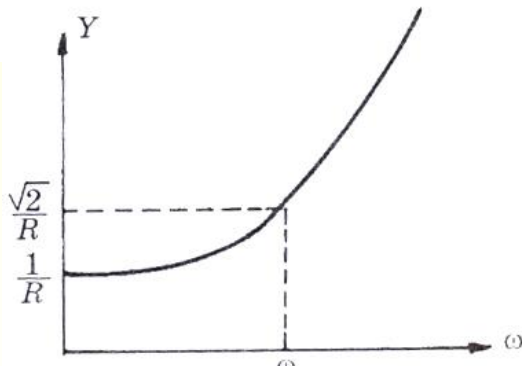
4.2 Паралелна схема

(използва се само като двуполусник – честотно зависимо съпротивление)



$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{1}{R} + j\omega C$$

– основен параметър е адмитанса

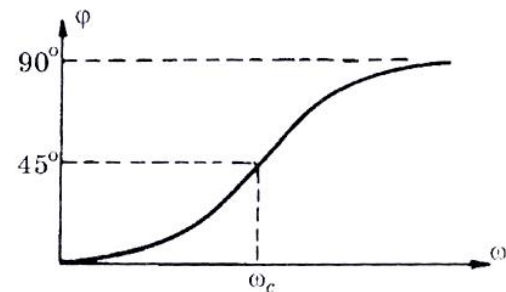


$$Y(\omega) = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2} \quad \omega_c = \frac{1}{RC}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg(\omega RC)$$

При ниски честоти – $Y(\omega) \cong \frac{1}{R}$

При високи честоти – $Y(\omega) \cong \omega C$

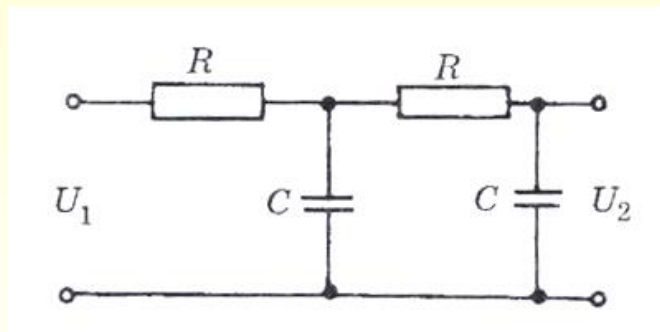


10. Електрически Филтри

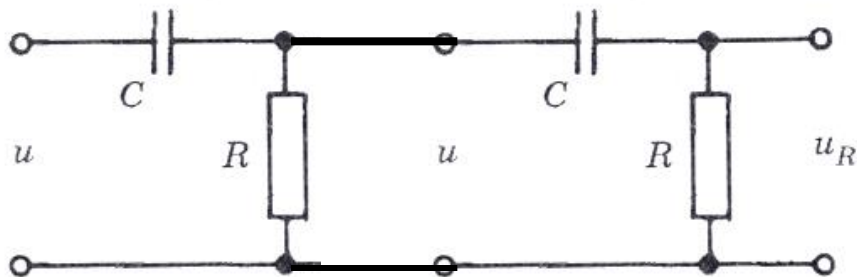
4.3 Г – образни филтри

Съдържат Г- образни RC-звена. Броят на звената води до увеличаване на **стръмността** на АЧХ в зоната на непропускане.

- Нискочестотни – Г – образни филтри

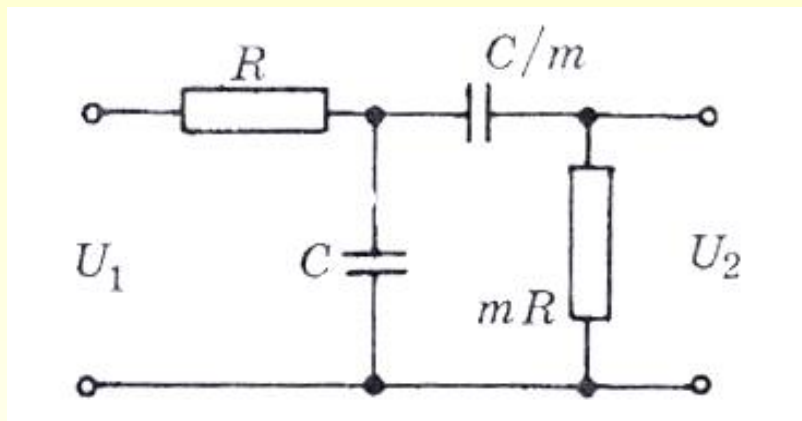


- Високочестотни – Г – образни филтри



10. Електрически Филтри

- Лентови – Г – образни филтри (НЧ + ВЧ звена)



Първото звено не пропуска ВЧ а второто не пропуска НЧ.

Нека $m = 1, 2, 3, \dots$

$$\omega_{C1,2} = \frac{1}{RC} \sqrt{3 + \frac{2}{m} + \frac{1}{2m} \pm \left(2 + \frac{1}{m}\right) \sqrt{2 + \frac{1}{m} + \frac{1}{4m^2}}}$$

10. Електрически Филтри

$$m = 1$$

$$\omega_1 = \frac{1}{RC} \sqrt{3 + 2 + \frac{1}{2} - 3\sqrt{2 + 1 + 0.5}} = \frac{0.3}{RC}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{RC} \sqrt{5.5 + 3\sqrt{3.25}} = \frac{3.3}{RC}$$

$$m = 2$$

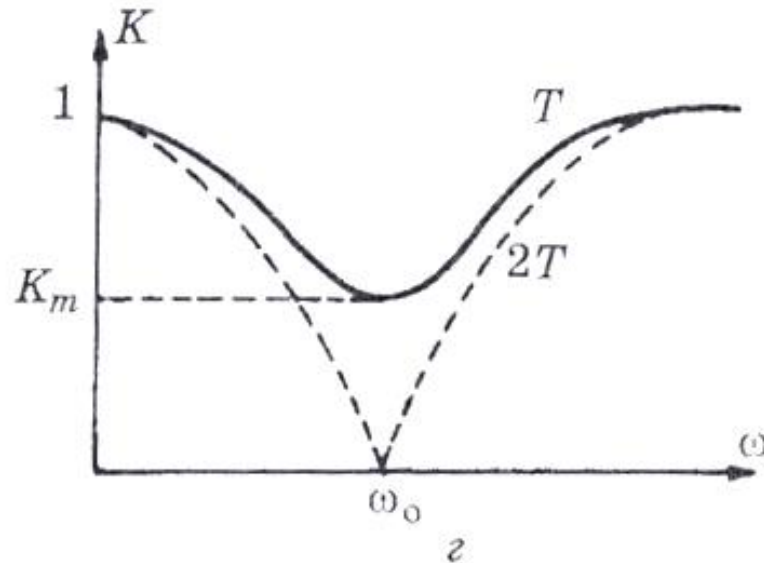
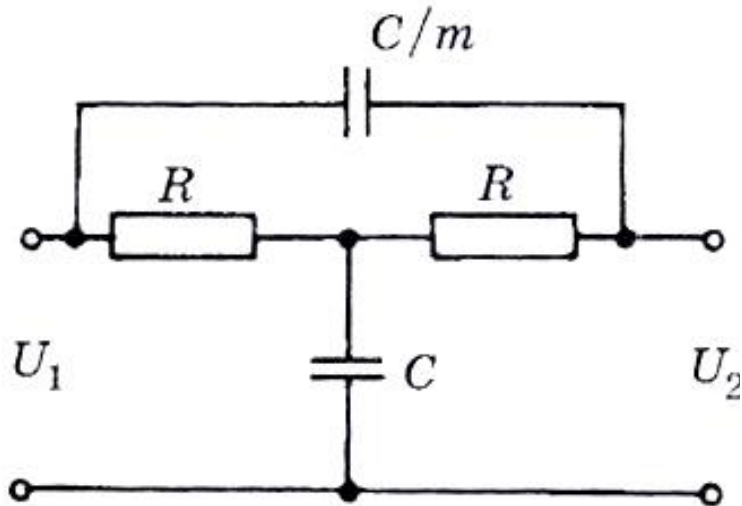
$$\omega_1 = \frac{1}{RC} \sqrt{3 + 1 + \frac{1}{4} - 1.5\sqrt{2 + 0.5 + 0.0625}} = \frac{1.36}{RC}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{RC} \sqrt{4.25 + 1.5\sqrt{1.6}} = \frac{2.58}{RC}$$

10. Електрически филтри

4. 4 Други лентови филтри

- замостено Γ – звено (мост на Вин)

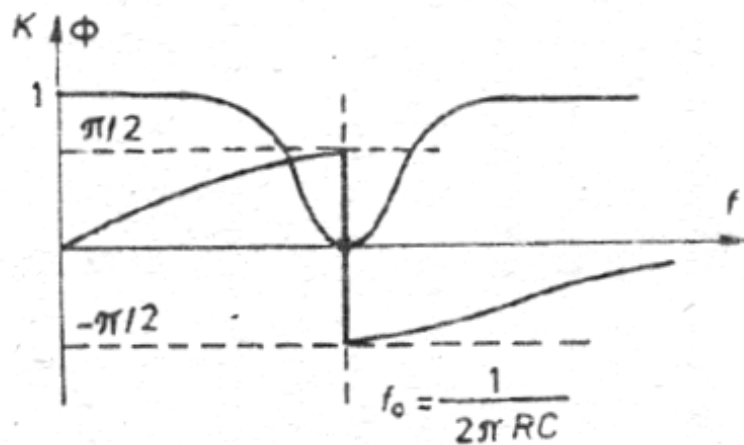
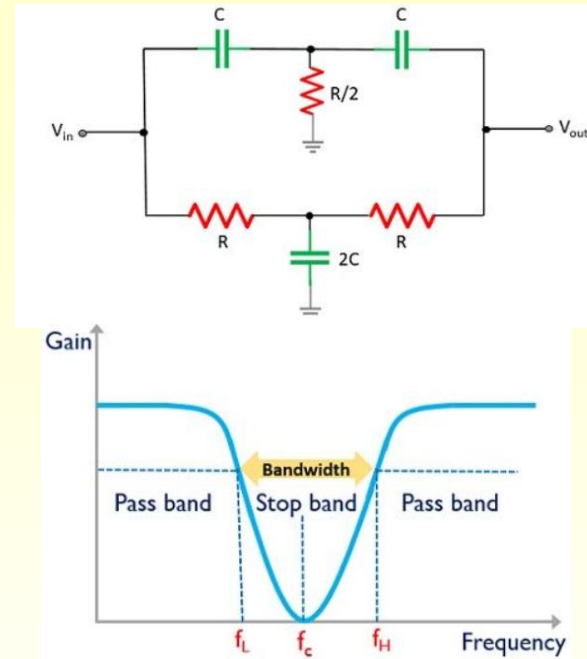
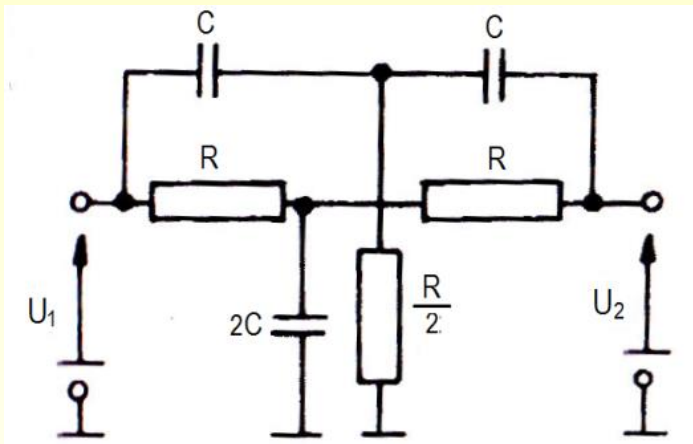


Нека $m = 1, 2, \dots$ $\omega_0 = \frac{m}{R \cdot C}$, $K_m = \frac{2}{m + 2}$

$$\omega_{C1,2} = \frac{m}{RC} \sqrt{3 + \frac{m}{2} + \frac{2}{m} \mp \sqrt{\left(3 + \frac{m}{2} + \frac{2}{m}\right)^2 - 1}}$$

Електрически филтри

Двоен-Т мост-К намалява до 0



$$K = \left[1 + \left(\frac{8\pi fCR}{1 - 16\pi^2 f^2 C^2 R^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\phi = \arctg \frac{8\pi fCR}{1 - 16\pi^2 f^2 C^2 R^2}$$

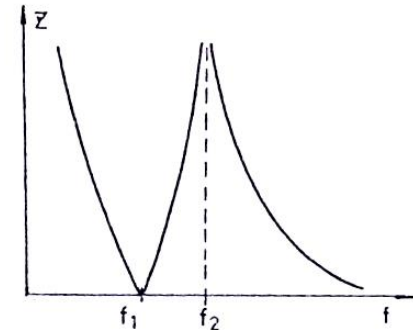
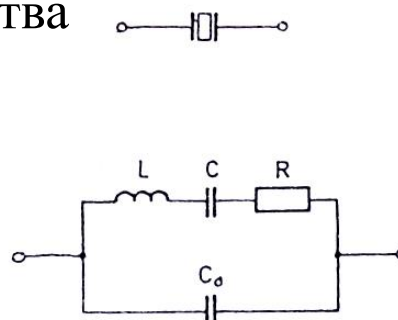
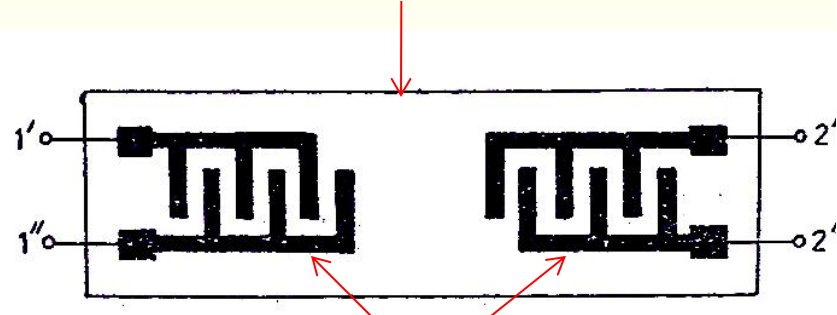
10. Електрически Филтри

Електроакустични филтри – преобразуване на електричните сигнали в акустични, разпространяване на акустичните сигнали с ултразвукова скорост в подходяща среда и обратното им преобразуване в електрични сигнали

- Основно изискване към тези филтри е преобразуването на сигналите от електрически към акустични (и обратно) да се извършва в същата среда, където става и разпространението на акустичния сигнал

Пиезоелектричен резонатор

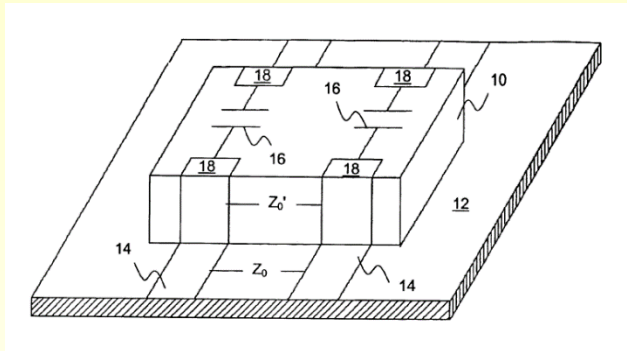
подложка с пиезоелектрични свойства



филтър с повърхнинни акустични вълни – широчината на шините и разстоянието между тях определят вида на АЧХ на филтъра

10. Електрически Филтри

5. Комерсиални реализации на филтри



Филтър за повърхностен (SMD) монтаж



Керамични Band Pass филтри



10. Електрически Филтри

5. LC-филтри

LC филтрите съдържат бобини и кондензатори.

След появата на интегралните схеми, LC- филтрите са приложими предимно в силовата и високочестотната електроника (бобините по-трудно се миниатюризират).



10. Електрически Филтри

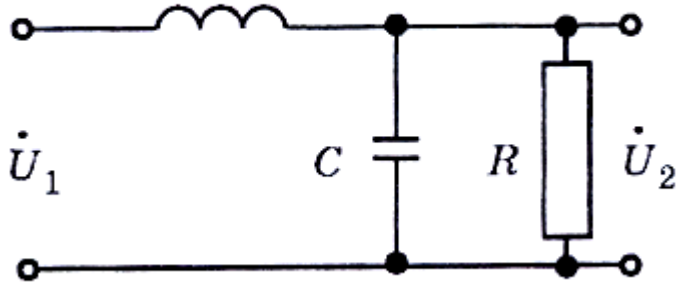
5.1 Нискочестотни LC Филтри

- Нискочестотен Г - филтър

- При ниски честоти индуктивното съпротивление X_L е много по-малко от товарното съпротивление R и от X_C :

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, X_L = \omega L$$

$$K = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = 1 \quad \text{- коефициент на предаване по напрежение}$$



- при високи честоти:

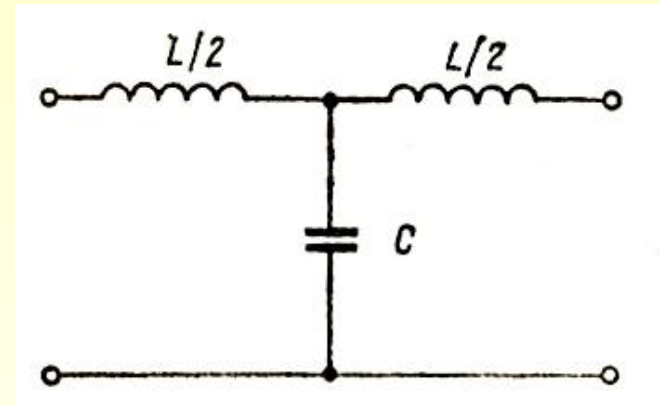
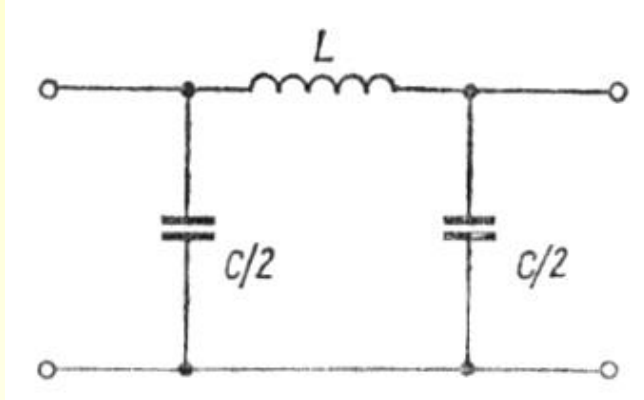
$$X_L \gg (X_C || R) \text{ и } K_{НЧФ} \rightarrow 0$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- характеристично съпротивление на филтъра, който е товарен импеданс за източника на сигнал.

10. Електрически Филтри

- Нискочестотен П-филтър и нискочестотен Т-филтър



$$\dot{Z}_1 = j\omega L, \quad 2\dot{Z}_2 = 2 / j\omega C$$

$$-1 \leq \frac{\dot{Z}_1}{4\dot{Z}_2} \leq 0 \text{ — лента на пропускане}$$

$$-1 \leq \frac{j\omega L}{4 / j\omega C} \leq 0 \text{ или } 0 \leq \frac{\omega^2 LC}{4} \leq 1 \quad \text{Условие за прозрачност на филтъра}$$

- честоти на срязване ' $\omega_c' = 0$ и $\omega_c'' = \frac{2}{\sqrt{LC}}$

10. Електрически Филтри

- Филтърът ще пропуска сигнали с честоти от 0 до

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

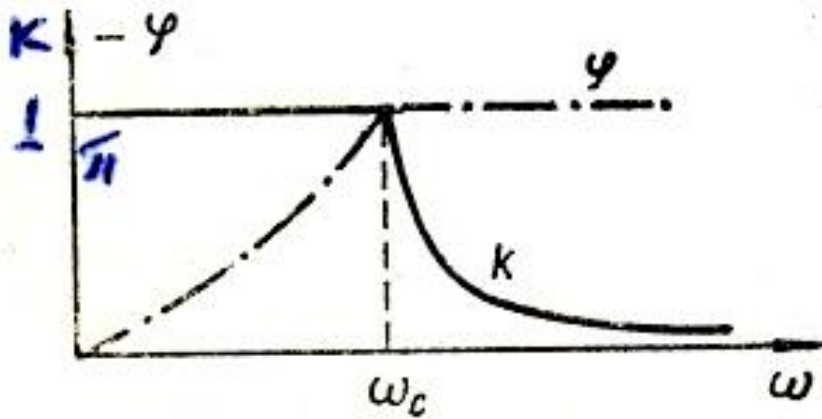
- Вълново съпротивление

$$\rho = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

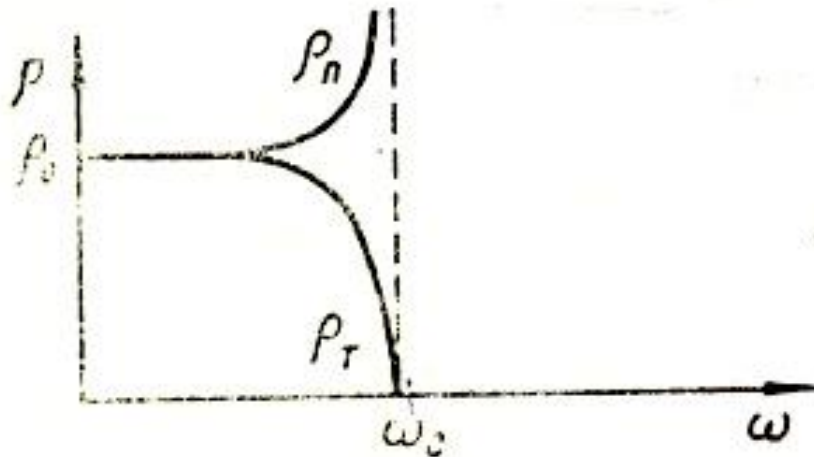
$$\rho_T = \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega^2 LC}{4} \right)} = \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right)},$$

$$\rho_{\Pi} = \sqrt{\frac{L}{C} \left(\frac{1}{1 - \omega^2 / \omega_c^2} \right)}$$

10. Електрически Филтри



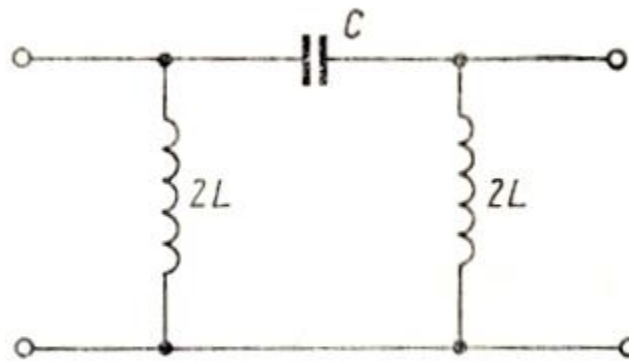
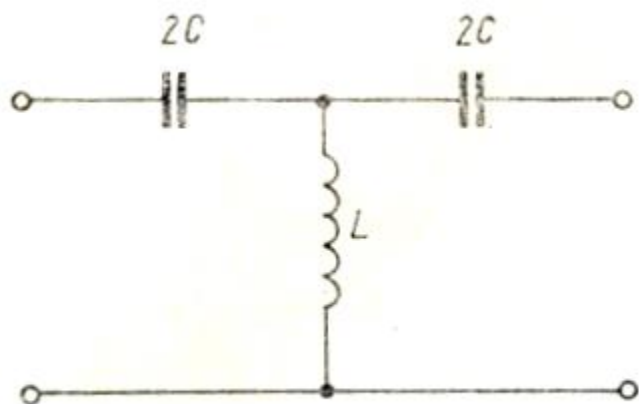
АЧХ и ФЧХ на П-
и Т-образен
нискочестотен филтър



10. Електрически Филтри

5.2 Високочестотни LC Филтри

- Високочестотен Т-филтър и високочестотен П-филтър



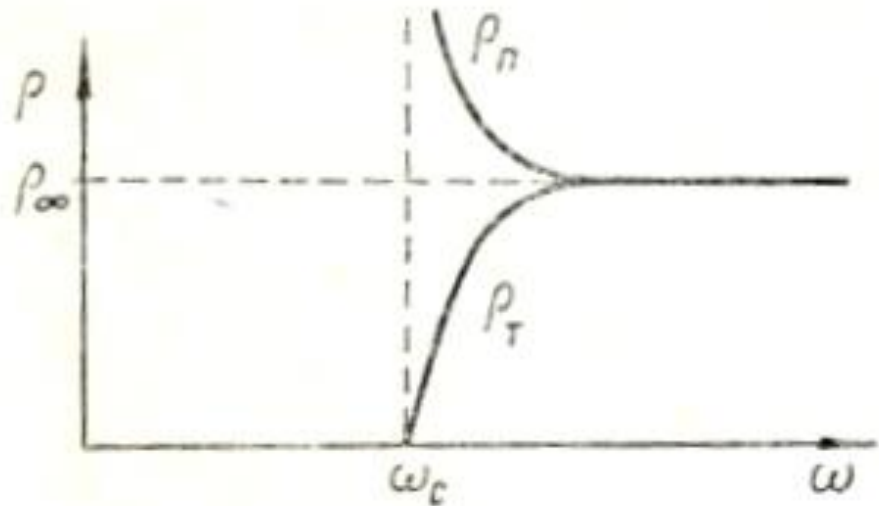
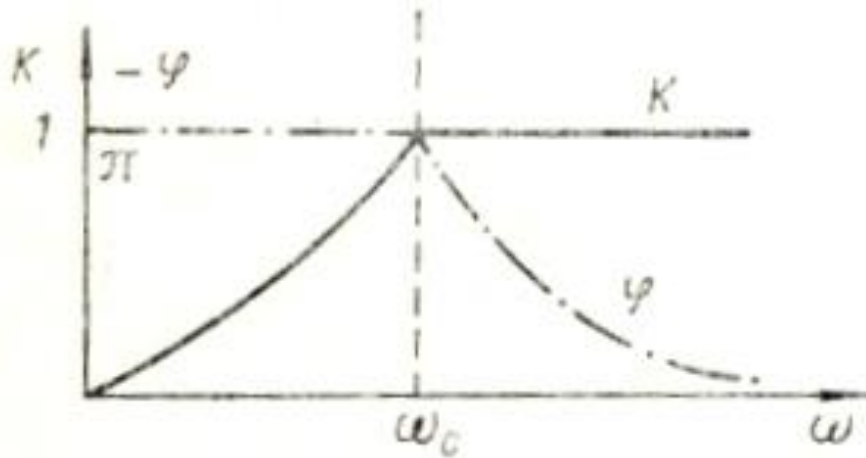
$$0 \leq \frac{1}{4\omega^2 LC} \leq 1$$

Условие за
прозрачност
на филтъра

- честоти на срязване

$$\omega_C' = \infty \text{ и } \omega_C'' = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$$

10. Електрически Филтри



АЧХ и ФЧХ на П-
и Т-образен филтър

10. Електрически Филтри

5.3 Лентови филтри (последователен+паралелен трептящ кръг)

