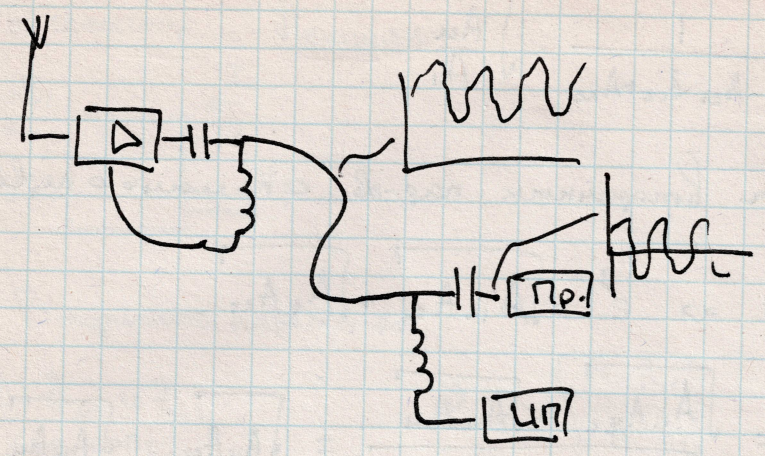
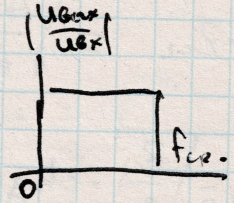


Электрические фильтры

Фильтр – это устройство, предназначенное для пропускания сигналов в определённой полосе частот и непропускания сигналов в других частот

Полоса пропускания фильтра – полоса прозрачности

Полоса заграждения (непрозрачности) – полоса непропускаемых частот



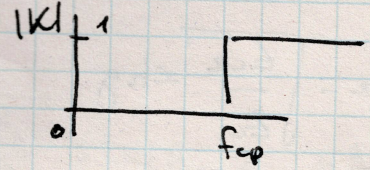
[1] Фильтры нижних частот

Задача – пропускать диапазон, начиная с постоянного и до частоты среза

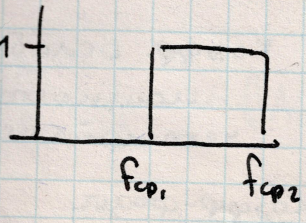
Частота среза – ① граничная частота полосы прозрачности
② частота, напряжение сигнала на которой уменьшается в $\sqrt{2}$ раз при прохождении через фильтр

[2] Фильтр верхних частот

от $f_{ср}$ до ∞



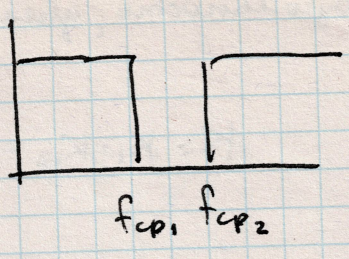
[3] Полосовой фильтр



(связанные контура)

Имеет две частота среза

4 Заградительный фильтр



Фильтры по конструктивному исполнению

1) Пассивный фильтр не требуется источник питания

2) Активный нужен ист. пит.

3) Цифровые

RC, RL простота, но потери мощности

LC нет потери мощности → специальные фильтры

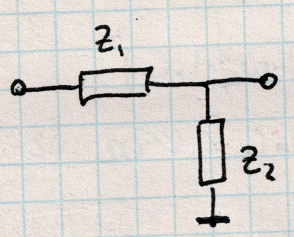
К

m

волноводы

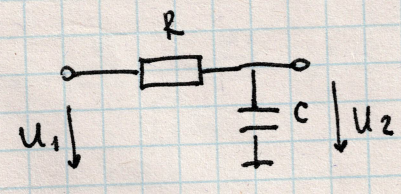
фильтры на поверхностных резонансах

RRC:

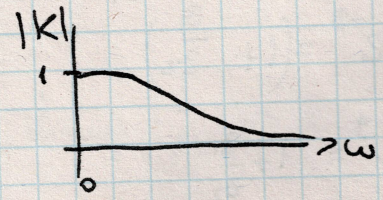


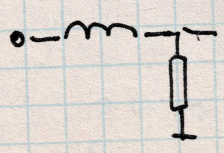
$$A = \begin{pmatrix} 1+\frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 \\ 1/Z_2 & 1 \end{pmatrix}$$

RC:

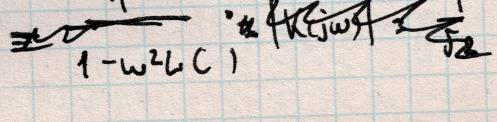


$$K(j\omega) = \frac{1}{A_{11}} = \frac{Z_c}{Z_c+R} = \frac{1/j\omega C}{1/j\omega C+R} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

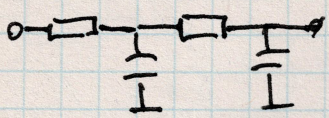




$$K = \frac{R}{R+Z_L} = \frac{1}{1+j\omega L/R}$$



Увеличить прямоугольность, увеличивая число каскадов



$$K = K_1 \cdot K_{12} = \left(\frac{1}{1+j\omega RC}\right)^2$$

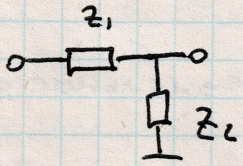
Вместе с активными устройствами

RC
Пассивные фильтры применяют вместе с активными устройствами

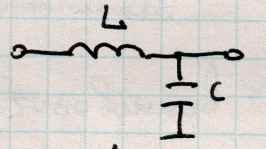
LC: Тип к

Должно выполняться

$$Z_1 \cdot Z_2 = K^2 \times f \quad \text{(независимость частоты)}$$



Типичный ф. типа к



$$Z_L \cdot Z_C = j\omega L \cdot \frac{1}{j\omega C} = \frac{L}{C} \times f$$

$$K(j\omega) = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L} = \frac{1}{1-\omega^2 LC}$$

$$|K(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \qquad \frac{1}{1-\omega_{cp}^2 LC} = \frac{1}{\sqrt{2}} \qquad \sqrt{2}^2 = (1-\omega_{cp}^2 LC)^2$$

$$\omega_{cp}^2 LC = \sqrt{2} - 1$$

$$K(j\omega) = e^{-g} = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^{-1}$$

$$Re(Z_1) = Re(Z_2) = 0$$

$$e^{-g} = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^{-1}$$

$$e^{g} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$K = e^{-\alpha} \cdot e^{-j\beta}$$

$$g = \alpha + j\beta$$

$\omega \in \Pi \Rightarrow$ ~~$e^{-j\beta}$~~ $\alpha \to 0$

$g \sim j\beta$

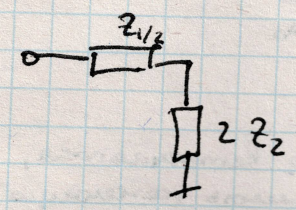
$$e^{j\beta} = 1 + \frac{z_1}{z_2}$$

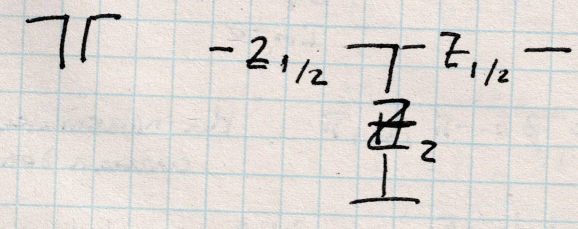
$$\cos\beta + j\sin\beta = 1 + \frac{z_1}{z_2} \quad \in [-1;\ 1)$$

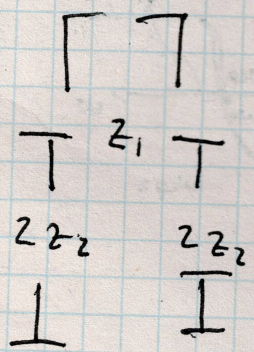
$$-2 \le \frac{z_1}{z_2} \le 0$$

$$-1 \le \frac{z_1}{2z_2} \le 0$$

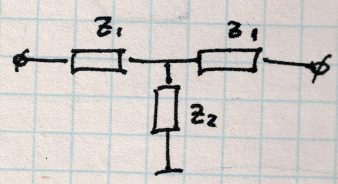
условие полосы прозрачности для фильтров типа К







Лекция 2 17.02.24



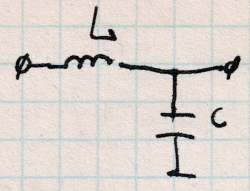
$$A = \begin{pmatrix} ch\gamma & z_c \cdot sh\gamma \\ \frac{1}{z_c} \cdot sh\gamma & ch\gamma \end{pmatrix}$$

$\gamma = \alpha + j\beta$, ФВЧ: $\alpha \to 0$ K - ?

$$K(j\omega) = \frac{1}{A_{11}} \Rightarrow A_{11} = 1 \cdot e^{j\varphi}$$

$$A_{11} = ch\gamma = ch(\alpha + j\beta) = ch\alpha\cos\beta + j\,sh\alpha\sin\beta =$$

$$\left\{ \begin{matrix} \alpha \to 0 : ch\alpha \to 0 \\ sh\alpha \to 0 \end{matrix} \right\} = \cos\beta = 1 + \frac{z_1}{z_2}, \quad \beta = \arccos\left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) = \arccos(1 - \omega^2 LC)$$



$Z_1 = j\omega L$

$Z_2 = \frac{1}{j\omega C}$

$\beta = 0 \quad \omega = 0$

$\beta \to \pi/2 \quad \omega \to \frac{1}{\sqrt{LC}}$

П: $\alpha = 0$

$\beta = \arccos(1 - \omega^2 LC)$

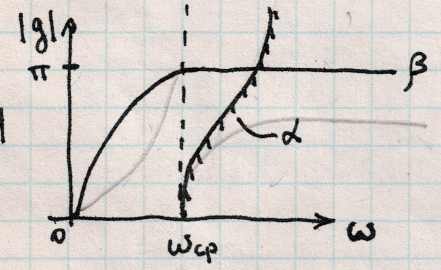
$\omega \notin П$: $\alpha \neq 0$, $\underbrace{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}_{Im = 0} = ch\alpha \cos\beta + j sh\alpha \underbrace{\sin\beta}_{\neq 0}$

$\sin\beta = 0 \Rightarrow \beta = -\pi, 0, \pi$. На практике 0 не встречается, т.к. сигнал должен иметь конечную длину

$1 + \frac{Z_1}{Z_2} = ch\alpha \cos\pi$, $\omega^2 LC - 1 = ch\alpha$

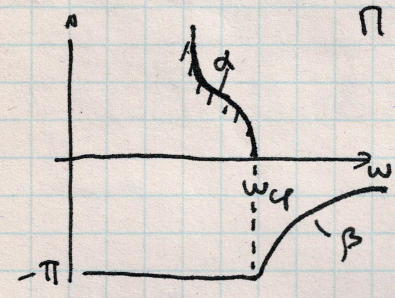
$\begin{cases} \alpha = \operatorname{arcch}(\omega^2 LC - 1) \\ \beta = \pm\pi \end{cases}$

ФНЧ



~~П: $\alpha = 0$~~

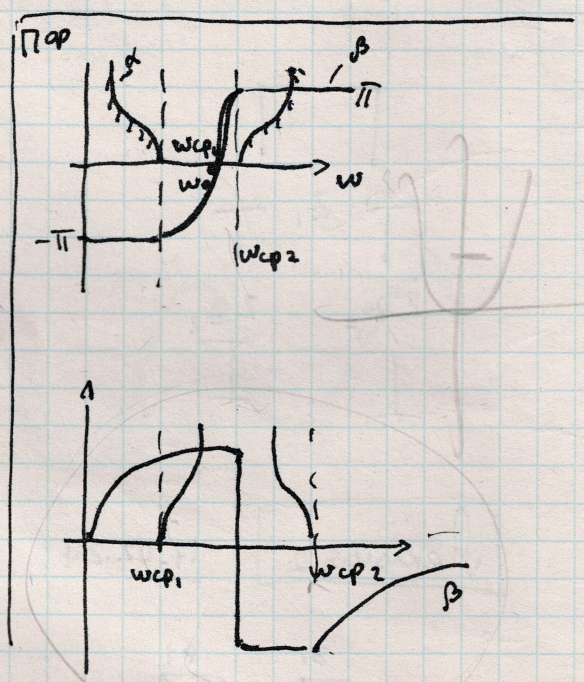
ФВЧ



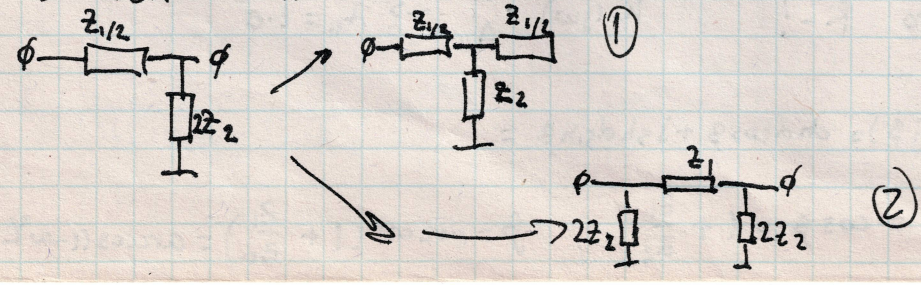
П: $\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = 2\operatorname{arcsh}\frac{\omega_{ср}}{\omega} \end{cases}$

$\notin$ П: $\begin{cases} \alpha = 2\operatorname{arcch}\frac{\omega_{ср}}{\omega} \\ \beta = -\pi \end{cases}$

Пф



Звенья типа П и Т



① $A = \begin{pmatrix} 1 & z_1/2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/z_2 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & z_1/2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+\frac{z_1}{2z_2} & \frac{z_1}{2}\left(2+\frac{z_1}{2z_2}\right) \\ 1/z_2 & 1+\frac{z_1}{2z_2} \end{pmatrix}$

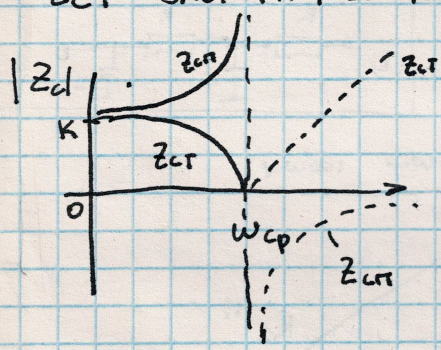
② $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/2z_2 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & z_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/2z_2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+\frac{z_1}{2z_2} & z_1 \\ \frac{1}{2z_2}\left(2+\frac{z_1}{2z_2}\right) & 1+\frac{z_1}{2z_2} \end{pmatrix}$

$K_T = K_П = \frac{1}{A_{11}} = \dots$

$z_{сТ} = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{21}}} = \sqrt{\frac{z_1}{2}\left(2+\frac{z_1}{2z_2}\right)\cdot z_2} = \sqrt{z_1 z_2 \cdot \left(1+\frac{z_1}{4z_2}\right)} = K\sqrt{1+\frac{z_1}{4z_2}}$

$z_{сП} = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{21}}} = \sqrt{\frac{z_1 \cdot 2z_2}{2+\frac{z_1}{2z_2}}} = \sqrt{\frac{z_1 z_2}{1+\frac{z_1}{4z_2}}} = \frac{K}{\sqrt{1+\frac{z_1}{4z_2}}}$

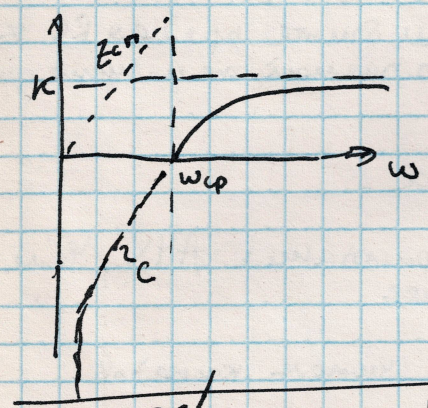
$z_{сТ}$ для ФНЧ $= K\sqrt{1-\frac{4\omega^2 LC}{4}}$, $z_{сП}$ для ФНЧ $= \frac{K}{\sqrt{1-\frac{4\omega^2 LC}{4}}}$



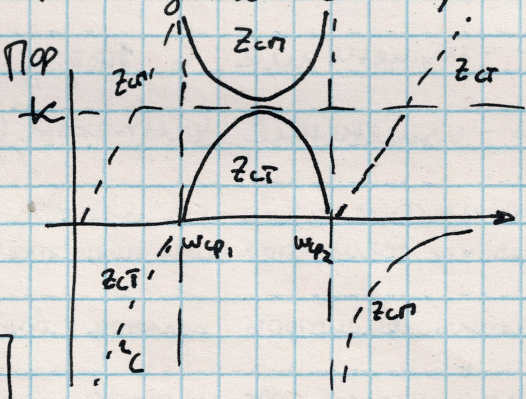
Здесь $z_{сП}$ после частоты среза будет вести себя как индуктивность

А здесь $z_{сП}$ имеет ёмкостной характер после частоты среза

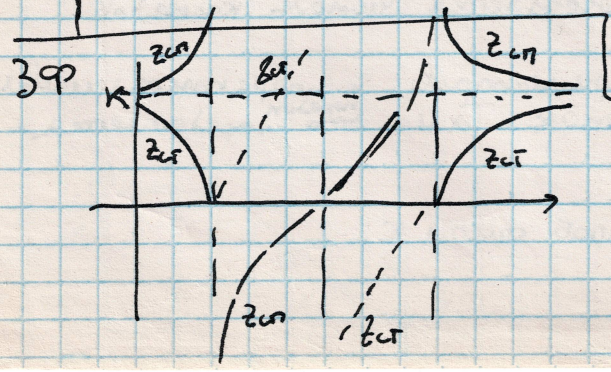
Для ФВЧ



Здесь наоборот. До $\omega_{ср}$ $z_{сП}$ ведёт себя индуктивность, а $z_{сТ}$ как С

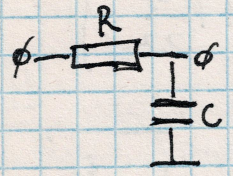


ЗФ



Вывод 1. $|Z|$ у звена π_{c-R} всегда больше или равно $|Z|$ звена Т при прочих равных условиях

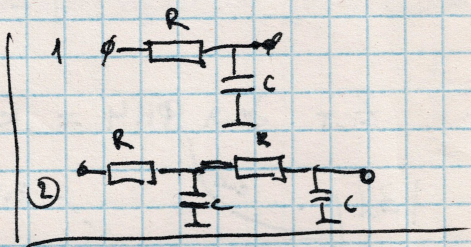
Вывод 2. Хар. сопр. Т и П. звеньев активное в полосе пропускания и реактивные в полосе заграждения

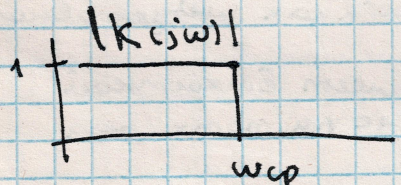


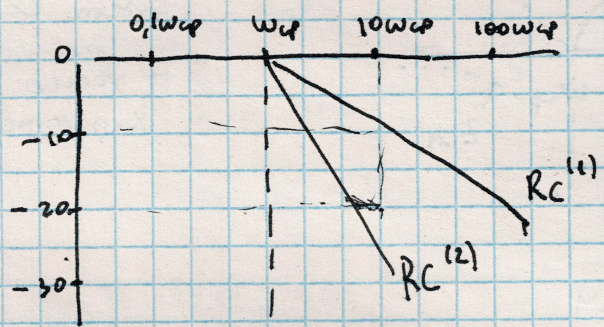
$$K(j\omega) = \frac{Z_c}{R+Z_c} = \frac{1/j\omega C}{R+1/j\omega C} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

$$|K(j\omega)| = \sqrt{I^2+Q^2} = \left\{\frac{1-j\omega RC}{1+\omega^2R^2C^2}\right\} = \sqrt{\left(\frac{1}{1+\omega^2(RC)^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega RC}{1+\omega^2(RC)^2}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1+(\omega RC)^2}{(1+(\omega RC)^2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \approx \frac{1}{\omega RC}$$







Чем ближе прямая RC к верт. прямой, тем лучше фильтр

1 декада - изменение в 10 раз

1 октава - изменение частоты в 2 раза

Порядок фильтра - хар-ка спада или нарастания АЧХ, чем порядок больше, тем спад или нарастание быстрее

Для простых фильтров порядок определяется числом каскадов

Для сложных фильтров, фильтров с обратными связями и цифровых фильтров это не так. Там порядок определяется структурой

Достоинства и недостатки фильтров типа К:

Достоинства:

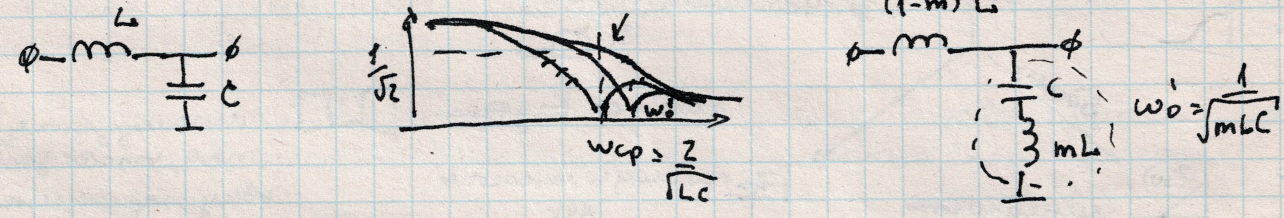
1) простота конструкции
2) проработанная мат. модель

Недостатки:

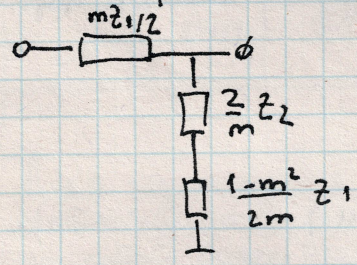
1) фильтры типа k имеют реактивное входное и выходное сопротивление в полосе непрозрачности, то есть отражают
2) в полосе прозрачности $_{вх,вых}$ сопротивление меняются в широких пределах
3) Характеристики фильтров типа k для современных устройств недостаточны => никто не использует по одному звену, обычно 4–5
4) Вместе с фильтрами типа k ставят фильтры типа m

Фильтры типа m

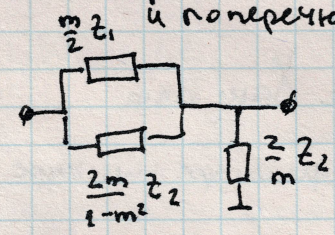
$m \in (0,1)$



Бывают продольно-производные звенья



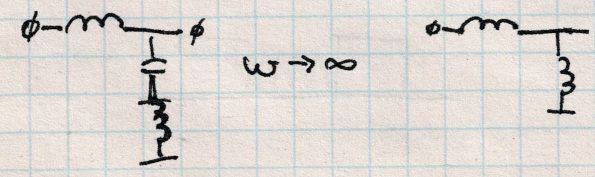
и поперечно-производные



Достоинства: прямоугольность фильтров типа m выше, чем у фильтров типа k

Недостатки:

1) появление лепестков АЧХ в полосе заграждения
2)



$\omega = \frac{\omega_{ср}}{\sqrt{1-m^2}}$ – этой частоты фильтр перестаёт работать как фильтр

Лекция 4 02.03.24



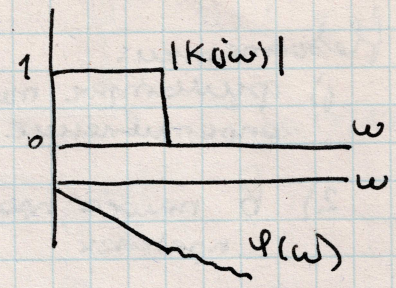
Условия неискажающей передачи

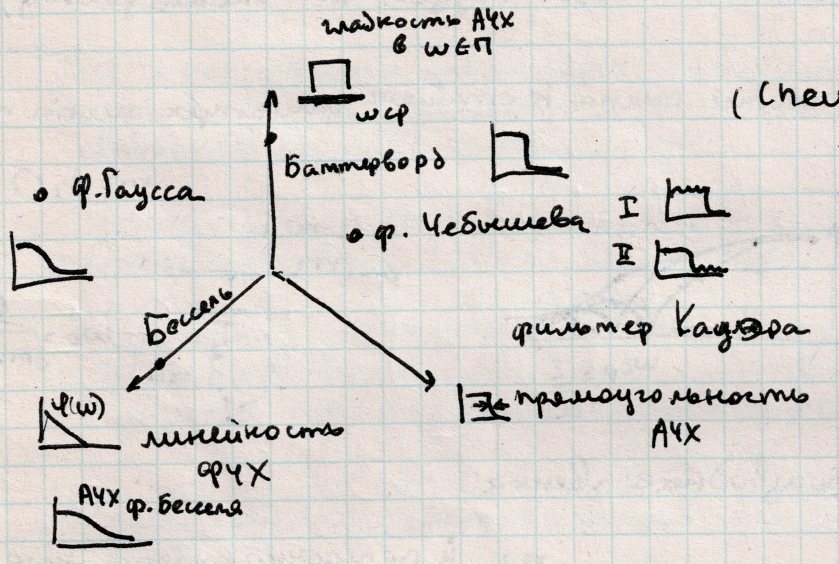
1) АЧХ не зависит от частоты

2) $\varphi(\omega) = -d\omega$ (линейна ФЧХ) $|_{\omega \in \Pi}$

$|K(j\omega)| = 0 \quad \omega \in \Pi$

Спад должен быть максимальным





(Специальные фильтры)

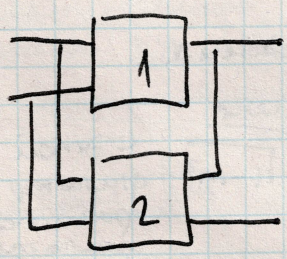
фильтер Кауэра

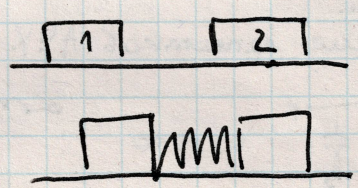
используется для пропускания, чтобы заглушить одну гармонику и гарантировано заглушить другие

Справочник Ханзеля

1) Активные фильтры (см. курс схемотехники)

2) Неотражающие фильтры





При параллельном соединении АЧХ складывается, если полосы не пересекаются