

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



## **NÁVRH FILTRŮ RC A RLC 1. A 2. ŘÁDU**

<b>3.1</b>	<b>NÁVRH FILTRŮ RC .....</b>	<b>124</b>
<b>3.2</b>	<b>NÁVRH FILTRŮ RLC 2. ŘÁDU .....</b>	<b>141</b>
<b>3.3</b>	<b>NÁVRH FÁZOVACÍCH ČLÁNKŮ RLC 1. A 2. ŘÁDU .....</b>	<b>148</b>

# NÁVRH FILTRŮ RC A RLC 1. A 2. ŘÁDU

Filtry 1. a 2. řádu (popř. i některých výjimečných případech vyšších řádů) je vhodné navrhovat přímo podle parametrů přenosových funkcí – tj. podle hodnot  $F_0$  pro 1. řád a podle hodnot  $F_0$  a  $Q$  pro 2. řád, a tedy nikoliv podle parametrů některého z typů aproximací. Vedou k tomu dva základní důvody:

- *Filtry 1. řádu totiž nerealizují žádný typ standardní aproximace a stejně tak filtry RC 2. řádu, protože mají omezenou dosažitelnou hodnotou činitele jakosti ( $Q < 0,5$ ).*
- *Pomocí filtrů RLC 2. řádu lze realizovat základní typy aproximací, ale přímou volbou optimálních hodnot parametrů  $F_0$  a  $Q$ , popř.  $F_N$  můžeme dosáhnout výhodnějšího řešení, než při omezené volbě odpovídající některé z aproximací.*

Jako výchozí podmínky pro návrh jsou uvažovány **nulový vnitřní odpor zdroje** signálu a **nekonečný odpor zátěže** (např. výstup operačního zesilovače a vstup neinvertujícího zesilovače s OZ). V praxi nemusí být tyto podmínky splněny a v tom případě je nutné *návrh korigovat*. U příkladu na obr. 3.1a je např. možné sečíst vnitřní odpor zdroje  $R_i$  s funkčním odporem filtru  $R_1$  tak, aby výsledná hodnota odpovídala požadované hodnotě  $R_1$ . To ovšem není zcela možné v případě připojení zatěžovacího odporu, který zde nejen sníží přenos v propustném pásmu, ale také ovlivní hodnotu parametrů filtru. Minimalizace tohoto vlivu je možná pouze zvýšením hodnoty  $R_2$  na dostatečně velkou hodnotu ( $R_2 > 100R$ ).

Opačná situace je ukázána na obr. 3.1b, kde lze korigovat vliv zátěže zvýšením hodnoty  $R_2$  tak, aby paralelní kombinace  $R_2$  a  $R_z$  měla požadovanou hodnotu, kdežto odpor zdroje  $R_i$  je potřebné snižovat na minimální hodnotu ( $R_i < 0,01R$ ). Mohou ale existovat zapojení, která umožňují plně korigovat vliv odporu zdroje i zátěže, jako to ukazuje obr. 3.1c, v některých případech však na úkor snížení přenosu v propustném pásmu.

## 3.1 NÁVRH FILTRŮ RC

Pokud uvažujeme nulový odpor zdroje a nekonečný odpor zátěže, je při návrhu filtrů RC (a obdobně i ARC, viz kap. 5) charakteristickým rysem minimálně jeden stupeň volnosti, který umožňuje volbu hodnoty jednoho

z prvků, a to R nebo C. To vyplývá ze základního vztahu pro mezní kmitočet **filtrů RC typu DP a HP 1. řádu**

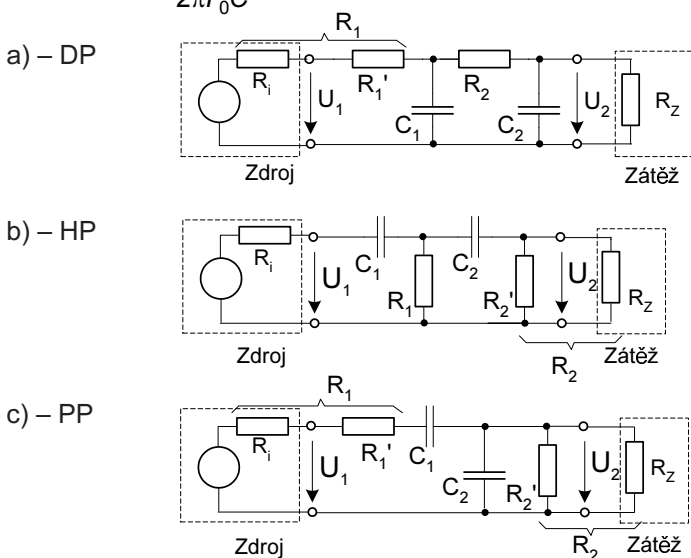
$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

Obvykle volíme hodnotu kapacity C, protože realizace hodnot kapacity mimo základní řadu E6, popř. E12 je obtížnější a dražší než u hodnot rezistorů. Volba hodnoty C může záviset na mnoha okolnostech, ale pro základní orientaci lze užít výchozí vztah

$$C = 3 \cdot 10^{-7} / \sqrt{F_0} \quad [\text{F, Hz}] \quad (3.2)$$

Tato hodnota kapacity C je *pouze orientační*, můžeme ji zaokrouhlit např. na hodnotu řady E6 nebo E12, či volit podle potřeby i hodnotu více odlišnou, ale tak, aby i hodnota R byla dobře realizovatelná, např. s ohledem na odpor zdroje či zátěže. Též lze vycházet ze skutečné, přesně změřené hodnoty kapacity použitého kondenzátoru. *Hodnotu odporu R vypočteme* pro filtry 1. řádu ze vztahu (3.1)

$$R = \frac{1}{2\pi F_0 C} \quad (3.3)$$



Obr. 3.1 Příklady zapojení filtrů RC do obvodu a varianty jejich ovlivnění odporem zdroje a zátěže

Pokud by byla takto vypočítaná hodnota odporu  $R$  příliš malá či velká, zmenšíme či zvětšíme adekvátně výchozí hodnotu kapacity  $C$ .

Při návrhu **filtrů RC 2. řádu** (a také filtrů ARC) je vztah pro mezní či rezonanční kmitočet

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad \text{kde } R = \sqrt{R_1R_2} \text{ a } C = \sqrt{C_1C_2} \quad (3.4)$$

Vidíme tedy, že výchozí volby můžeme provést podle vztahů (3.1) až (3.3). Pro skutečnou volbu hodnot  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  a  $C_2$  je vhodné zavést poměry hodnot

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1}, \quad \beta = \frac{C_2}{C_1}, \quad (3.5)$$

kteří ovlivňují činitel jakosti. Pro požadovanou hodnotu činitele jakosti  $Q$  pak lze vypočítat potřebné hodnoty  $\alpha$  a  $\beta$ . Z nich pak vypočteme hodnoty odporů a kapacit kondenzátorů

$$R_2 = R\sqrt{\alpha}, \quad R_1 = R/\sqrt{\alpha}, \quad (3.6)$$

$$C_2 = C\sqrt{\beta}, \quad C_1 = C/\sqrt{\beta}. \quad (3.7)$$

Při návrhu filtrů RC i ARC může být použito zapojení s více jak jedním  $R$  a  $C$  pro 1. řád (viz např. *tab. 3.2*), resp. s více než dvěma  $R$  a  $C$  pro 2. řád. V tom případě je nutné použít upřesňující vztahy pro jejich návrh, uvedené vždy u daného obvodu.

### 3.1.1 Návrh filtrů RC 1. řádu

Filtr RC s přenosovou funkcí 1. řádu obsahují minimálně jeden rezistor a jeden kapacitor. Jak již bylo vysvětleno v kap. 2.1, lze s přenosovou funkcí 1. řádu realizovat pouze filtry typu DP, HP, korekční a fázovací článek, *nelze ale realizovat filtry typu PP a PZ*.

#### Návrh DP a HP 1. řádu

Zapojení DP a HP 1. řádu, odpovídající vztahy a asymptoty modulových kmitočtových charakteristik jsou uvedeny v *tab. 3.1*. V obou případech vycházíme z volby mezního kmitočtu  $F_0$ . Při návrhu hodnot obvykle volíme hodnotu kapacity  $C$  a vypočítáme odpovídající odpor  $R$  podle vztahů (3.1) až (3.3). Filtr typu DP umožňuje kompenzaci vnitřního odporu zdroje,

filtr typu HP zase umožňuje snadnou kompenzaci zatěžovacího odporu, jak to bylo ukázáno na obr. 3.1a,b.

Tab. 3.1 RC filtry typu DP a HP 1. řádu (pro  $R_1 = 0$ ,  $R_2 = \infty$ )

<b>DP – 1</b>	$K(j\omega) = \frac{1/RC}{j\omega + 1/RC} = \frac{\Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{F_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{\Omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad K = \frac{F_0}{\sqrt{f^2 + F_0^2}}$	
<b>HP – 1</b>	$K(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + 1/RC} = \frac{j\omega}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jf}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{\Omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad K = \frac{f}{\sqrt{f^2 + F_0^2}}$	

V případě, že je potřebné připojit filtr do obvodu s konečnou hodnotou odporu zdroje a zátěže (obr. 3.1c), lze použít zapojení podle tab. 3.2. Je logické, že toto zapojení vede k odpovídajícímu útlumu i v propustném pásmu. Postup návrhu je obdobný jako pro jednoduchou DP nebo HP:

1. návrh a volba C podle (3.2) a výpočet R podle (3.3),
2. výpočet  $R_1$  a  $R_2$

– pro **DP – 1a**:

$$R_1 = \frac{R}{k}, \quad R_2 = \frac{R_1 R}{R_1 - R},$$

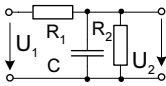
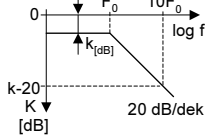
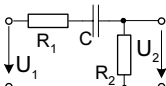
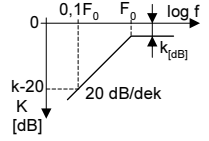
– pro **HP – 1a**:

$$R_2 = kR, \quad R_1 = R - R_2.$$

Vypočtené  $R_1$  a  $R_2$  pak můžeme rozdělit na sériovou a paralelní kombinaci s odporem zdroje a zátěže podle obr. 3.1c. V případě, že pro celý  $R_1$  bude využit odpor zdroje a pro celý  $R_2$  odpor zátěže, vypočteme ekvivalentní R jako paralelní či sériovou kombinaci  $R_1$  a  $R_2$  (podle tab. 3.2) a z hodnoty R vypočteme hodnotu C podle (3.1).

V případě, že je hodnota  $R_1$  a  $R_2$  dána, např. jako odpor zdroje a zátěže, je návrh velmi jednoduchý. Podle vztahů v tab. 3.2 vypočteme ekvivalentní hodnotu R a z ní hodnotu C. Hodnotu k vypočteme z hodnot  $R_1$  a  $R_2$ .

Tab. 3.2 RC filtry typu DP a HP 1. řádu (pro  $R_1 > 0$ ,  $R_2 < \infty$ )

<p><b>DP – 1a</b></p> 	$K(j\omega) = \frac{k/RC}{j\omega + 1/RC} = \frac{k\Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{kF_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	
<p><b>HP – 1a</b></p> 	$K(j\omega) = \frac{j\omega k}{j\omega + 1/RC} = \frac{j\omega k}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jfk}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad R = R_1 + R_2 \quad k = \frac{R_2}{R}$	

### Návrh korekčních filtrů 1. řádu

Korekční filtr 1. řádu RC lze využít pro korekci (jen snížení, zvýšení umožňuje jen korektor se zesilovačem) přenosu v pásmu nízkých nebo vysokých kmitočtů (určitá forma omezené DP a HP – viz tab. 3.3 a tab. 3.4).

- 1) Pro návrh všech čtyř variant vyjdeme z volby hodnoty  $C$  podle (3.2) pro hodnotu mezního kmitočtu  $F_0$ .
- 2) Ze zvolené hodnoty  $C$  pro  $F_0$  vypočteme hodnotu  $R$  podle vztahu (3.3).
- 3) Pro zapojení **s jedním kondenzátorem** vypočteme z  $R$  hodnoty  $R_1$  a  $R_2$ :

Pro filtr **KF – DP 1a**:

$$R_2 = RF_0 / F_L = Rk, \quad R_1 = R - R_2. \quad (3.8)$$

Pro filtr **KF – HP 1a**:

$$R_1 = RF_0 / F_L = R/k, \quad R_2 = \frac{R_1 R}{R_1 - R}. \quad (3.9)$$

- 4) Pro zapojení **s jedním odporem** vypočteme z  $C$  hodnoty  $C_1$  a  $C_2$ :

Pro filtr **KF – DP 1b**:

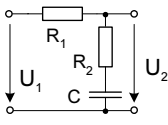
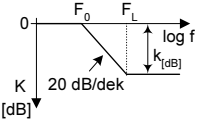
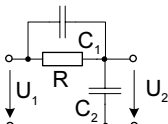
$$C_1 = CF_0 / F_L = Ck, \quad C_2 = C - C_1. \quad (3.10)$$

Pro filtr **KF – HP 1b**:

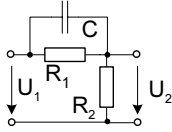
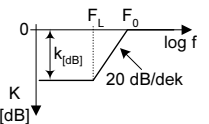
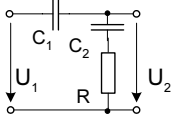
$$C_2 = RF_0 / F_L = C/k, \quad C_1 = \frac{C_2 C}{C_2 - C}. \quad (3.11)$$

Pokud nám hodnoty kapacit kondenzátorů nevyhovují, můžeme hodnotu jedné z nich zvětšit či zmenšit a adekvátním poměrem zvětšení či zmenšení násobit hodnotu kapacity druhého kondenzátoru a dělit hodnotu odporu  $R$ . V tab. 3.3 jsou modulové charakteristiky znázorněny asymptotami. Vzhledem k tomu, že pro lomové kmitočty může být odchylka modulové charakteristiky od asymptot až 3 dB, může být pro blízké hodnoty  $F_0$  a  $F_L$  skutečný průběh modulové charakteristiky značně odlišný od asymptot.

Tab. 3.3 Korekční filtry typu DP 1. řádu (pro  $R_i = 0$ ,  $R_z = \infty$ )

<p><b>KF – DP1a</b></p> 	$K = \frac{j\omega R_2 / R + 1 / RC}{j\omega + 1 / RC} = \frac{j\omega k + \Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jfk + F_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad R = R_1 + R_2$ $F_L = \frac{1}{2\pi R_2 C} = \frac{1}{2\pi\tau_2} \quad k = \frac{R_2}{R} = \frac{F_0}{F_L}$	
<p><b>KF – DP1b</b></p> 	$K = \frac{j\omega C_1 / C + 1 / RC}{j\omega + 1 / RC} = \frac{j\omega k + \Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jfk + F_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad C = C_1 + C_2$ $F_L = \frac{1}{2\pi R C_1} = \frac{1}{2\pi\tau_1} \quad k = \frac{C_1}{C} = \frac{F_L}{F_0}$	$K = \frac{\sqrt{k^2 f^2 + F_0^2}}{\sqrt{f^2 + F_0^2}}$

Tab. 3.4 Korekční filtry typu HP 1. řádu (pro  $R_i = 0$ ,  $R_z = \infty$ )

<p><b>KF – HP1a</b></p> 	$K = \frac{j\omega + 1 / R_1 C}{j\omega + 1 / RC} = \frac{j\omega + k\Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jf + kF_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $F_L = \frac{1}{2\pi R_1 C} = \frac{1}{2\pi\tau_1} \quad k = \frac{R}{R_1} = \frac{F_L}{F_0}$	
<p><b>KF – HP1b</b></p> 	$K = \frac{j\omega + 1 / RC_2}{j\omega + 1 / RC} = \frac{j\omega + k\Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \approx \frac{jf + kF_0}{jf + F_0}$ $F_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ $F_L = \frac{1}{2\pi R C_2} = \frac{1}{2\pi\tau_2} \quad k = \frac{C}{C_2} = \frac{F_L}{F_0}$	$K = \frac{\sqrt{f^2 + k^2 F_0^2}}{\sqrt{f^2 + F_0^2}}$