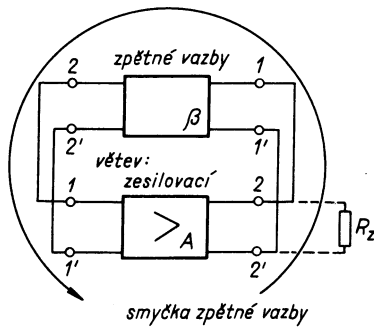


Nízkofrekvenční oscilátory

Nízkofrekvenční oscilátory slouží k výrobě harmonických (sinusových) kmitů v akustické oblasti kmitočtů. Jejich princip je založen na využití kladné zpětné vazby. Základní uspořádání smyčky zpětné vazby s větví zesilovací se zesilením A a větví zpětné vazby s činitelem zpětné vazby β je na obr. 166. Stav rozkmitání nastává, když se zesílení (napět'ové nebo proudové)

$$A' = \frac{A}{1 - \beta A}$$

blíží nekonečnu, tedy když $(1 - \beta A) = 0$ a $\beta A = 1$, popř. $\beta = 1/A$. Protože βA je obecně komplexní číslo $\beta A = \text{Re } \beta A + j \text{Im } \beta A = |\beta A| e^{j\varphi_{\beta A}}$, lze podmínku rozkmitání vysvětlit tak, že $\text{Re } \beta A = +1$; $\text{Im } \beta A = 0$ neboli $|\beta A| = 1$; $\varphi_{\beta A} = 0$.



Obr. 166. Základní zapojení oscilátoru

Nejnámější zapojení oscilátoru s paralelním rezonančním obvodem na obr. 167 se dobře hodí k podrobnějšímu vysvětlení. Ve zjednodušeném skutečném zapojení (obr. 167b) a jeho náhradním schématu (obr. 167c) vidíme, že celkový odpor R se skládá ze skutečného zatěžovacího odporu R_z , ztrátového odporu $R_{ztrát}$, zahrnujícího ztráty cívky a kondenzátoru, z transformátorového vstupního odporu tranzistoru h_{11e}/p_N^2 a konečně z výstupního odporu tranzistoru $1/h_{22e}$.

Na laděném obvodu LC vzniká napětí $u_2 = Zi_2$, které se na vstup tranzistoru transformuje s hodnotou $u' = u_2 p_N$ a opačnou fází. Ve vstupním obvodu budí při $i_2 = i_2 p_N Z / h_{11e}$. Ten se sečítá s vnějším budičím proudem a proudové zesílení

$$A'_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{A_i}{1 - \beta A_i} = \frac{h_{21e}}{1 - \frac{p_N Z h_{21e}}{h_{11e}}}$$

které je nekonečné, když $(p_N Z h_{21e} / h_{11e}) = 1$ a kmitý se udrží i bez vnějšího buzení ($i_1 = 0$). Po dosazení

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} - j \frac{1 - \omega^2 CL}{\omega L}}$$

do jmenovatele obdržíme podmínku rozkmitání

$$\frac{p_N h_{21e}}{h_{11e} \left(\frac{1}{R} - j \frac{1 - \omega^2 CL}{\omega L} \right)} = 1$$

Podmínka je splněna, je-li jmenovatel malý a při nulové imaginární složce

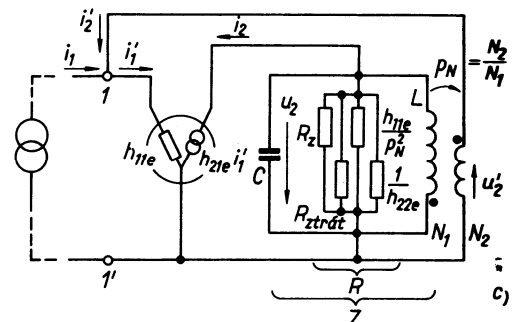
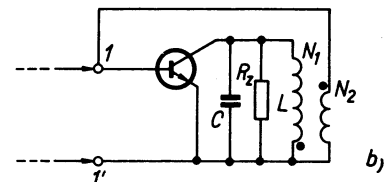
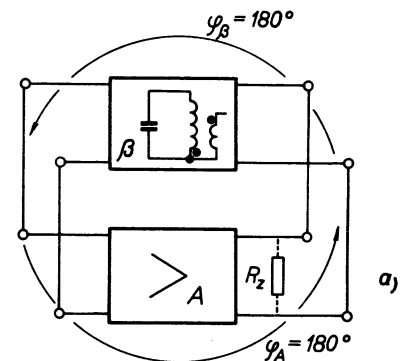
$$\frac{1 - \omega^2 CL}{\omega L} = 0$$

odkud vyplývá vztah pro úhlový kmitočet vznikajícího signálu

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

Dále je nutné zajistit, aby

$$h_{21e} \geq \frac{h_{11e}}{p_N R}$$

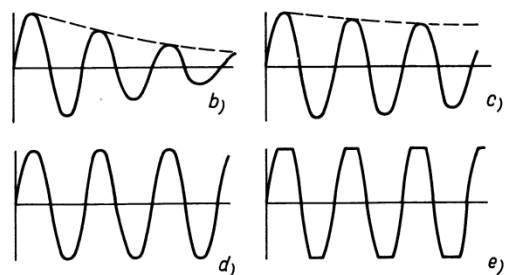
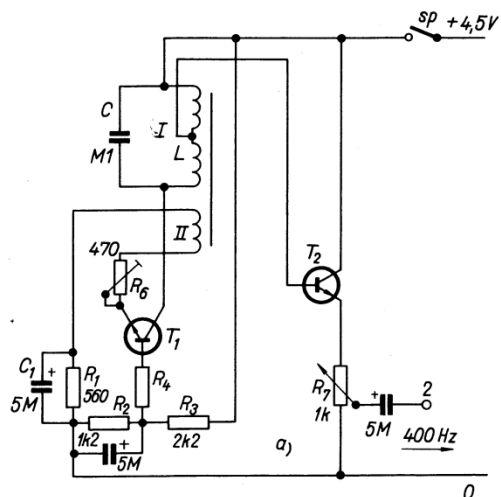


Obr. 167. Základní zapojení oscilátoru LC

Ve shodě předchozím výkladem jsme došli ke dvěma dílčím podmínkám rozkmitání. První platí pro nulový fázový posuv a druhá pro jednotkový přenos smyčkou zpětné vazby.

V profesionální praxi se indukční cívka L vine na speciálních magnetických jádrech, zpravidla feritových. Skutečné využití jejich výborných vlastností je možné, jestliže je k dispozici jádro s potřebnou mezerou, doladovacími doplňky, kostičkou, armaturou atd. V amatérské praxi je obvykle přístupnější některý z nízkofrekvenčních vazebních transformátorů, které jsou v prodeji v dostatečném výběru. Jeho vlastnostem se pak zapojení přizpůsobí.

Příklad zapojení takového nízkofrekvenčního oscilátoru je na obr. 168a. Tranzistor pracuje v zapojení se společnou bází. Pracovní bod je nastaven a stabilizován odpory R_1 a R_4 . Jako indukčnosti se



Obr. 168. Oscilátor LC ($f = 400$ Hz)

využívá primárního vinutí známého výstupního transformátoru VT 38. Požadovaný kmitočet, zde $f_0 = 400$ Hz, je třeba nastavit zkusmo změnou kapacity C . Protože zapojení se společnou bází zachovává fázi, musí ji zachovat i vazební vinutí II. Aby byl laděný obvod co nejméně zatížen, odebíráme generovaný signál prostřednictvím oddělovacího stupně s velkým vstupním odporem (emitorový sledovač) s tranzistorem T_2 . Potenciometr R_7 slouží k nastavení výstupního napětí v rozsahu 0 až 0,5 V.

Zapojení na obr. 168 použijeme k vysvětlení důležitosti nastavení stupně zpětné vazby. Ten jsme sice odvolili, avšak jeho přesný výpočet a dodržení je obtížné vzhledem k rozptylovým parametrům, zvláště tranzistoru. Proto nezbyvá, než nastavit zkusmo pomocí R_6 potřebný stupeň vazby.

Je-li běžec na dolním konci dráhy, je kladná zpětná vazba slabá. Náhodný podnět zvenčí (např. zapojení napájení) vyvolá rychle doznívající kmity podle obr. 168b. Zesílíme-li vazbu, kmity doznívají pomaleji (obr. 168c). Je-li podmínka zesílení právě splněna, udrží se harmonické kmity trvale (obr. 168d). Další zvýšení stupně zpětné vazby má za následek omezování, zhoršení činitele jakosti a harmonické zkreslení.

V praxi je třeba vazbu nastavit nad stupeň rozkmitání, aby při poklesu napájení anebo stárnutí součástek nedošlo k přerušení oscilací. Nejspolehlivější je, jak uvidíme dále, automatické řízení zpětné vazby pomocí teplotně závislého prvku.

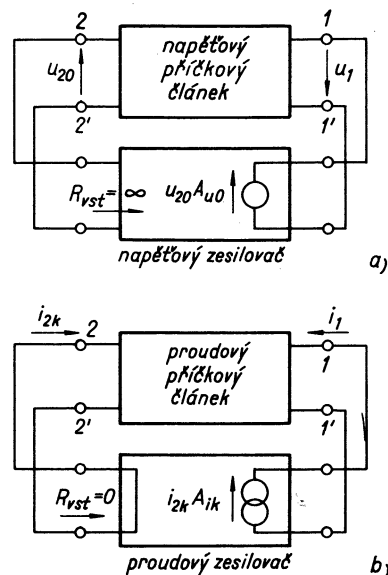
Obtíže s realizací laditelné indukčnosti v řádu jednotek henry vedly u nízkofrekvenčních oscilátorů k použití článků RC, jež zabezpečují pootočení fáze o 180° nebo jinak splňují podmínky rozkmitání.

Nejnámější jsou tzv. **příčkové články**, jejichž nejčastější uspořádání jsou v tabulce 28 (na konci článku). Podle umístění součástek je dělíme na zapojení 1. Typu (s kondenzátory v podélné větvi) a zapojení 2. Typu (s kondenzátory v příčné větvi). Podle zapojení v oscilátoru pak rozlišujeme uspořádání s napěťovým nebo proudovým přenosem.

V uspořádání s napěťovým přenosem (obr. 169a) je příčkový článek buzen napěťovým zesilovačem s malým (nulovým) vnitřním odporem. Na výstupu pracuje ve stavu naprázdno, neboť napěťový zesilovač má velký (nekonečný) vstupní odpor.

Zcela naopak je tomu při přenosu proudovým (obr. 169b). Příčkový článek je buzen proudem ze zdroje s velkým (nekonečným) odporem. Jeho výstupní obvod pracuje ve stavu nakrátko, neboť proudový zesilovač má malý (nulový) vstupní odpor.

Všechny příčkové články v tab. 27 jsou využívány na úhlovém kmitočtu ω_0 , kdy pootáčejí fázi procházejícího signálu o 180° . To znamená, že spolupracující zesilovač musí zesílený signál také pootáčet o 180° (např. v zapojení se společným emitorem).



Obr. 169. Základní zapojení oscilátorů s příčkovými články

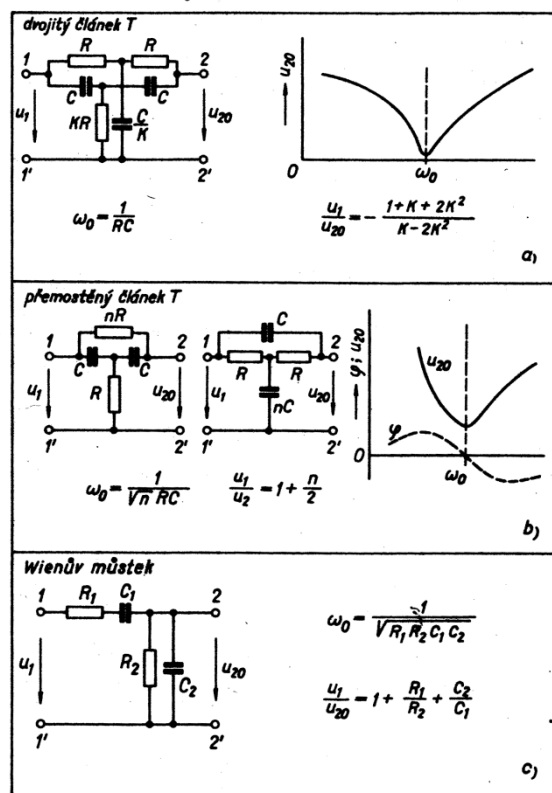
Nevýhodou příčkových článků je značné zeslabení procházejícího signálu (u_1/u_{20}) a (i_1/i_{2k}). Lze je však zmenšit odstupňováním hodnot prvků jednotlivých obvodů RC příčkového článku.

Vzhledem k nesnadné současné změně hodnot se zapojení podle tab. 27 s oscilátory s příčkovými články nejčastěji používají v generátorech pevných kmitočtů.

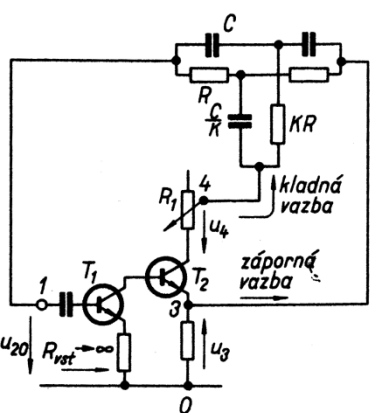
Příklad zapojení na obr. 170 využívá principu z obr. 169a. Často bývá uváděno s jedním tranzistorem. Jeho funkce však je nespolehlivá, neboť lze jen nesnadno dosáhnout potřebného zesílení a vstupního i výstupního odporu zesilovací větve. V našem případě je proto dvoustupňový zesilovač, ve kterém T1 zajišťuje velký vstupní odpor (asi 100 kΩ) a T2 napěťové zesílení. Odpor R2 se nastaví optimální stupeň kladné zpětné vazby, odporem R3 se nastaví vhodný pracovní bod. Střídavý signál $f_0 = 1$ kHz se odebírá z emitoru.

Další možná uspořádání článků RC jsou v tab. 28.

Tabulka 28. Články T a Wienův můstek



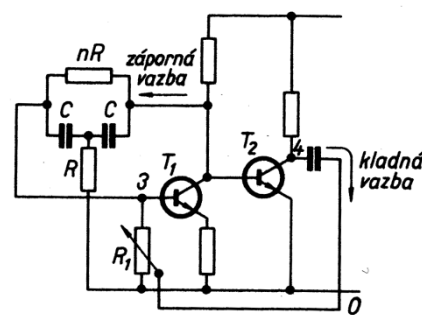
Dvojitým článkem T prochází signál o úhlovém kmitočtu ω_0 maximálně zeslaben. V oscilátoru je tedy třeba zavést kmitočtově nezávislou kladnou zpětnou vazbu z bodu 4 do bodu 1 přes některé členy dvojitého článku RC (obr. 171). Tato kladná zpětná vazba je všeobecně neutralizována zápornou zpětnou vazbou přes úplný článek RC z bodu 3 do bodu 1. Pouze při úhlovém kmitočtu ω_0 (kdy má článek RC největší zeslabení) převládne kladná vazba a oscilátor se rozkmitá.



Obr. 171. Základní zapojení oscilátoru s dvojitým článkem T

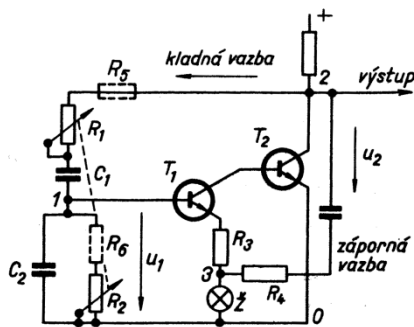
Obdobné vlastnosti má přemostěný článek T v části b tab. 28. Také ten se používá v zesilovači s kombinovanou zpětnou vazbou podle obr. 172. K nastavení optimální kladné zpětné vazby slouží potencometr R1.

Zvláštní postavení mezi těmito články RC zaujímá tzv. Wienův můstek na obr. c tab. 28. Při úhlovém kmitočtu ω_0 má přenos naprázdno nulový fázový posun a jeho zeslabení je menší než u předchozích zapojení. Navíc nabízí možnost ladění (v poměru kmitočtů až 1 : 10) současnou změnou spřažených kondenzátorů s kapacitami C1 a C2 nebo proměnných odporů R1 a R2. Při použití bipolárních tranzistorů je vstupní odpor zesilovače v řádu 10^4 až 10^5 Ω. Nezbyvá, než použít kapacity C1 = C2 nejméně ve stovkách pikofaradů a kmitočty ladit spřaženými odpory R1 = R2. V tomto zapojení lze také nejsnáze použít automaticky řízenou zpětnou vazbu, udržující oscilátor bezpečně v optimálním stavu těsně nad bodem kmitání.

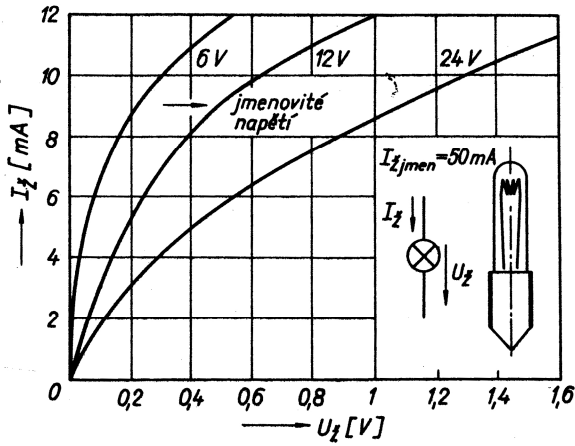


Obr. 172. Základní zapojení oscilátoru s přemostěným článkem T

Principiální zapojení je na obr. 173. Dvoustupňový zesilovač má mezi body 1, 2 nulový fázový posun. Proudová záporná zpětná vazba na odporu R3 zvětšuje vstupní odpor tranzistoru T1 tak, aby pokud možno $R_{vst} \gg R_2$. Z výstupního bodu 2 jsou opět vedeny dvě větve zpětné vazby. Kladná vazba vede přes Wienův článek do bodu 3 ne nelineární člen, zde žárovku. Zvýší-li se z jakýchkoli důvodů výstupní napětí, zvýší se také napětí přivedené do bodu 3, odpor žárovky se zvětší. Tím se zvětší stupeň záporné zpětné vazby, zesílení se zmenší a amplituda kmitů se vrátí k původní hodnotě. Přes svoji jednoduchost je taková regulace velmi



($R_5 = R_6$) = (0,05 až 0,2) ($R_1 = R_2$)
 Obr. 173. Základní zapojení oscilátoru s Wienovým můstkem



Obr. 174. Charakteristiky telefonních žárovek

účinná a dovolí udržet za provozu výstupní úroveň s odchylkami desetin decibelů, i když se při ladění změnou R1 a R2 značně změní přenos Wienovým můstkem (tab. 28). Důležité je však správné nastavení pracovního bodu žárovky. Jak vidíme z charakteristik na obr. 174, vykazuje vlákno největší změnu odporu v začáteční zakřivené části. Do této oblasti musí být nastaven také pracovní bod trpělivým výběrem odporu R4 (nastavení proměnným odporem je sice snadnější, ale není dlouhodobě spolehlivé). Vlákno tedy nesmí sebeměně žhnout. Typ žárovky není kritický, jmenovitý proud však musí být co nejmenší.

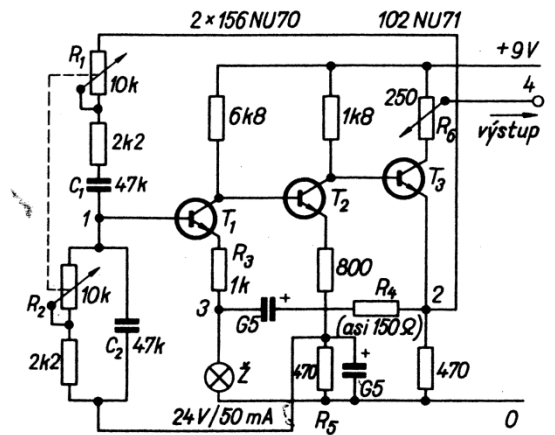
Příklad skutečného zapojení pro $f = 200$ až 1200 Hz je na obr. 175. Zesilovač je osazen tranzistory T1 až T3 a blíží se napětovému typu. Vstupní odpor je zvětšen proudovou zápornou vazbou na odporu R3 a malý výstupní odpor emitorového sledovače T3 je řádu desítek ohmů. Stupeň záporné zpětné vazby se nastavuje odporem R4. Předpětí pro bázi T1 se získává z emitorového odporu R5 následujícího tranzistoru T2. Generovaný signál se odebírá z běžce potenciometru R6.

Největšího ladícího rozsahu lze dosáhnout u zánějového generátoru, jehož princip je na obr. 177. Oba oscilátory pracují na středních kmitočtech. Horní oscilátor má pevný kmitočet, např. 100 kHz. Druhý je laditelný, $f_2 = 100$ až 120 kHz. Oba signály se směšují, např. na diodě D, kde vznikají kmitočty

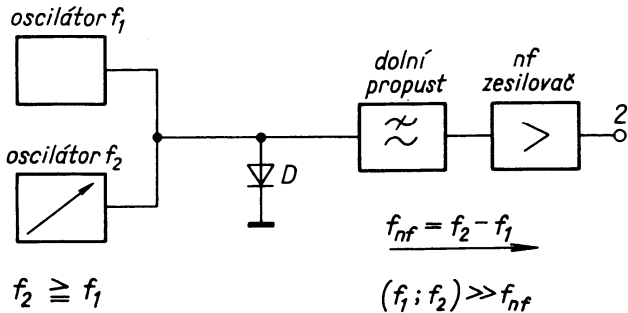
$$f_1 + f_2 = 200 \text{ až } 220 \text{ kHz}$$

$f_{nf} = f_2 - f_1 = 0$ až 20 kHz. (Také procházejí kmitočty f_1 a f_2 .)

Dolní propust potlačí součtový kmitočet, oba nominální, zatímco kmitočet rozdílový f_{nf} je zesilován a odebírán na svorce.



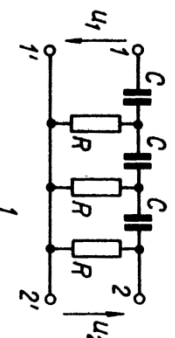
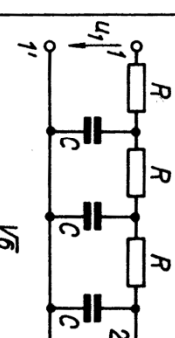
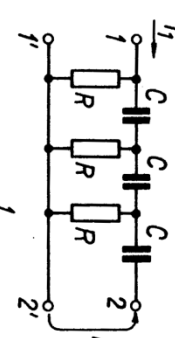
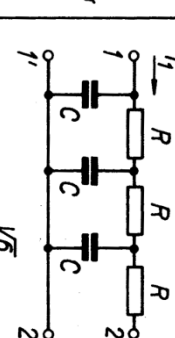
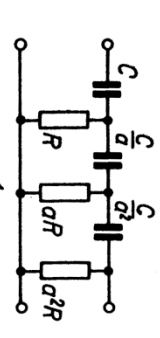
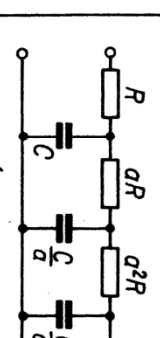
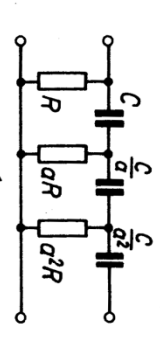
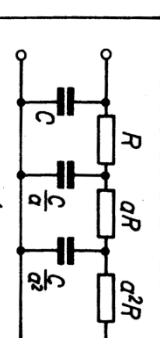
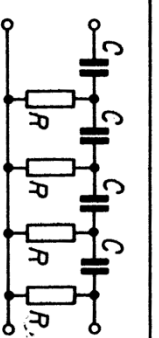
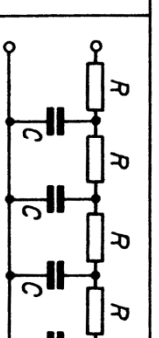
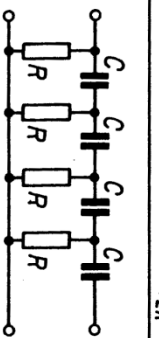
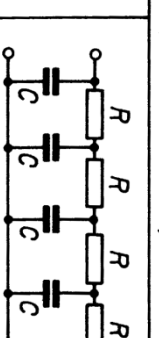
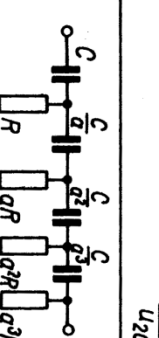
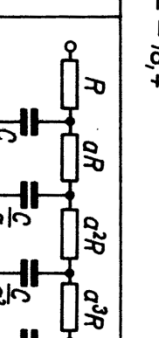
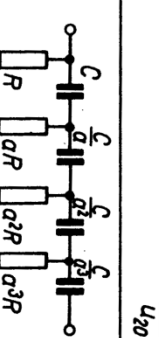
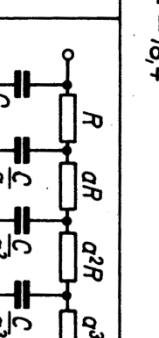
Obr. 175. Příklad zapojení oscilátoru s Wienovým můstkem ($f = 200$ až 1200 Hz)



Obr. 177. Základní zapojení zánějového generátoru

Zdroj: Jindřich Čermák – Kurz polovodičové techniky SNTL 1976

Tabulka 27. Překové články

Napěťový přenos		Proudový přenos	
1. typ	2. typ	1. typ	2. typ
 <p> $\omega_0 = \sqrt{6} RC$ $\frac{U_1}{U_{20}} = -29$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{\sqrt{6}}{RC}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \sqrt{6} RC$ $\frac{i_1}{i_{2k}} = -29$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{\sqrt{6}}{RC}$ </p>
 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CR\sqrt{3 + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^2}}}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CR\sqrt{3 + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^2}}}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CR\sqrt{3 + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^2}}}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CR\sqrt{3 + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^2}}}$ </p>
 <p> $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{CR}$ $\frac{U_1}{U_{20}} = -18,4$ </p>	 <p> $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{CR}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{CR}$ $\frac{i_1}{i_{2k}} = -18,4$ </p>	 <p> $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{CR}$ </p>
 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CRb}$ $b = \sqrt{\frac{4 + \frac{3}{a} + \frac{2}{a^2} + \frac{1}{a^3}}{4 + \frac{3}{a}}}$ $\frac{U_1}{U_{20}} = 1 + b^4 - b^2 \left(6 + \frac{6}{a} + \frac{3}{a^2}\right)$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{b}{CR}$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{1}{CRb}$ $b = \sqrt{\frac{4 + \frac{3}{a} + \frac{2}{a^2} + \frac{1}{a^3}}{4 + \frac{3}{a}}}$ $\frac{i_1}{i_{2k}} = 1 + b^4 - b^2 \left(6 + \frac{6}{a} + \frac{3}{a^2}\right)$ </p>	 <p> $\omega_0 = \frac{b}{CR}$ </p>