1. **Zesilovače**

Zesilovač může být elektrický, pneumatický (brzdy v nákladním autě), hydraulický (bagr). Každý ke své činnosti – zesilování, potřebuje zdroj energie. Elektrický zesilovač stejnosměrné napětí, pneumatický stlačený vzduch, hydraulický tlakový olej.

Elektrické zesilovače zesilují elektrické napětí, proud a tím výkon a přitom nemají měnit jeho časový průběh. Rozdělují se podle zesilovaného výkonu, kmitočtu, šířky zesilovaného kmitočtového pásma, zapojení, počtu zesilovacích stupňů, použití atd.

**Princip elektrického zesilovače**

2´

Obr. 3.1 Princip zesilovače

i2

u2

u1

i1

Rvst.

Rvýst.

Rz

UN

1

2

1´

Princip zapojení zesilovače je na obr. 3.1. Zesilovač má tři páry svorek: vstupní 1 – 1´, výstupní 2 – 2´ a třetí pár slouží pro připojení stejnosměrného napájecího napětí UN. Na vstup je přivedeno napětí u1, do vstupu teče proud i1. Na výstupu je napětí u2, z výstupu přes zátěž Rz teče proud i2 .

**Vlastnosti zesilovačů**

Při měření vlastností nf. zesilovače používáme zapojení přístrojů podle obr. 3.2. Zesilovač napájíme ze stejnosměrného napájecího zdroje, zdrojem měřeného napětí u1 je nf. RC generátor, místo reproduktoru připojíme odpor o hodnotě jako je impedance reproduktoru (ta je kmitočtově závislá a také nebude při měření rušit ostatní žáky), zesílené výstupní napětí u2 měříme nf. milivoltmetrem, jeho průběh kontrolujeme osciloskopem a velikost harmonického zkreslení změříme měřičem harmonického zkreslení *k*.

RC

generátor

nf.

zesilovač

ss.

zdroj UN

Obr. 3.2 Zapojení přístrojů pro měření vlastností nf. zesilovače

RZ

mV

k

+

\_

u1

u2

**Zesílení (přenos) zesilovače**

Je poměr mezi stejnou výstupní a vstupní veličinou

napěťové:  proudové:  výkonové: 

Poměr dvou stejných veličin se dá vyjádřit v logaritmických jednotkách - decibelech [dB]. Napěťové zesílení:[dB], proudové:[dB], výkonové: [dB]

**Výkon zesilovače**

Určí se změřením velikosti výstupního napětí na známé zátěži RZ a jeho výpočtem podle vztahu  [W]. U nf. zesilovače se udávají různé druhy výstupního výkonu - jmenovitý, maximální, hudební, sinusový, při daném zkreslení, na hranici limitace atd.

**Citlivost zesilovače**

Udává se tam, kde vstupní a výstupní veličina je rozdílná. U nf. zesilovačů se nejčastěji udává napěťová citlivost, což je velikost vstupního napětí, které vybudí zesilovač na jeho jmenovitý výkon. Běžná hodnota je 100 mV.

**Účinnost zesilovače**

Je dána poměrem střídavého výstupního výkonu zesilovače dodávaného do zátěže (např. reproduktoru) ku stejnosměrnému příkonu, který odebírá zesilovač ze stejnosměrného napájecího zdroje. Udává se obvykle v % podle vztahu  [ %]

Účinnost zesilovače závisí na třídě, ve které je nastaven jeho pracovní bod a na vybuzení zesilovače. Nevybuzený zesilovač má nulovou účinnost, největší účinnost má zesilovač při největším vybuzení. Rozdíl mezi výkonem a příkonem jsou ztráty, které se mění v teplo a proto se koncové zesilovací součástky při větších výkonech musí chladit.

**Vstupní a výstupní odpor zesilovače**

Jsou dány konstrukcí a zapojením zesilovače. Vstupní i výstupní odpor (na obr. 3.1) mají i složky reaktanční a proto se správněji nazývají impedance. Vstupní odpor zesilovače je fiktivní (zdánlivý) odpor, jakoby paralelně zapojený ke vstupním svorkám zesilovače a tím zatěžující zdroj zesilovaného napětí. Měří se metodou polovičního napětí – do série se vstupním signálem se zapojí proměnný odpor, např. odporová dekáda a její hodnota se nastaví tak, aby napětí na výstupu zesilovače pokleslo na polovinu. Potom je na vstupu zesilovače vytvořen dělič ze dvou stejných odporů a hodnota odporu dekády se rovná vstupnímu odporu zesilovače. Při správném výkonovém impedančním přizpůsobení by měl být vstupní odpor zesilovače stejně velký jako je výstupní impedance zdroje zesilovaného signálu.

Výstupní odpor zesilovače je fiktivní odpor zapojený do série se zdrojem zesíleného signálu. Dá se změřit tak, že se zesilovač naprázdno vybudí (tj. bez zátěže – což se ale nedoporučuje) na libovolnou hodnotu výstupního napětí a potom se zatěžuje např. dekádou tak, až výstupní napětí poklesne na polovinu. Hodnota odporu dekády se rovná výstupnímu odporu zesilovače. Při správném výkonovém impedančním přizpůsobení by měl být výstupní odpor zesilovače stejně velký jako je hodnota zatěžovací impedance. Znamená to, že velikost impedance vstupního zařízení (např. mikrofonu) má co nejvíce odpovídat vstupní impedanci zesilovače a právě tak impedance výstupního zařízení (např. reproduktoru) výstupní impedanci zesilovače. Správné impedanční přizpůsobení se provádí pomocí transformátoru nebo vhodným zapojením zesilovače.

**Pozadí zesilovače**

Pozadím zesilovače jsou nežádoucí rušivé signály na výstupu zesilovače, které nejvíce ruší při nevybuzeném zesilovači. Tyto signály tvoří šum, jehož zdrojem jsou pasivní i aktivní součástky, především odpory a tranzistory. Další rušivá napětí způsobuje elektrostatická nebo elektromagnetická indukce (proto se používají ochranná stínění) a rušení ze zdroje a ze sítě.

**Zkreslení zesilovače**

Zkreslení zesilovače je:

1. **nelineární b) lineární**

α) harmonickéα) amplitudové

β) intermodulační β) fázové

**a) zkreslení nelineární**

Způsobují ho nelineární prvky, kterými jsou zesilovací součástky – dříve elektronky, dnes tranzistory a IO. Dochází při něm ke změně tvaru zesilovaného signálu a pro se také nazývá tvarové. Na sluch působí nelibozvučně. **Velikost nelineárního zkreslení závisí na vybuzení zesilovače, tedy na amplitudě zesilovaného signálu.** Čím je větší amplituda, tím je větší i nelineární zkreslení.

α) harmonické zkreslení

Zesilovací součástky mají nelineární průběh VA charakteristik a při průchodu signálu zesilovačem dochází ke vzniku vyšších harmonických kmitočtů. Jsou to celistvé násobky zesilovaného kmitočtu (ten má tzv. první harmonickou, 2. harmonická má kmitočet dvojnásobný, 3. harmonická trojnásobný atd.), a podle své fáze se ze zesilovaným signálem sčítají nebo odečítají a tím mění jeho tvar. Analýzou zesíleného signálu zjistíme, že je tvořen např. z 99 % signálem 1. harmonické a jedno procento tvoří signály vyšších harmonických kmitočtů. Velikost harmonického zkreslení se udává činitelem harmonického zkreslení ***k***v %, které u takovéhoto zesilovače bude 1 %.

** [%] a vyjadřuje geometrický průměr obsahu vyšších harmonických k 1. harmonické. Současné zesilovače mají ***k*** mnohem menší než 1 %, často pouhé setiny %. Zkreslení řádově několik % je viditelné na osciloskopu.

Velikost ***k*** měříme měřičem harmonického zkreslení. Postupujeme tak, že nejprve v poloze *Pozadí* změříme celé výstupní napětí a jeho hodnotu nastavíme vstupním děličem na 100 dílků = 100 %. Potom přepneme do polohy *Měření*. Tím zařadíme laditelný filtr, kterým odfiltrujeme 1. harmonickou a naměřené výstupní napětí je přímo velikostí harmonického zkreslení ***k*** v %.

Obr. 3.3 Zkreslení třetí harmonickou ve fázi

t

u

Obr. 3.4 Zkreslení třetí harmonickou v protifázi

t

u

0

0

Pomocí harmonické analýzy (Fourierův rozvoj) se dá dokázat, že každý nesinusový, ale periodicky se opakující průběh (např. obdélníkový, pilovitý, trojúhelníkový apod.) je tvořen součtem nekonečné řady vyšších harmonických kmitočtů sinusového tvaru. Na obr. 3.3 je vidět, že součet signálů 1. harmonické s 3. harmonickou ve fázi se již blíží obdélníkovému průběhu. Zkreslení 3. harmonickou v protifázi (obr. 3.4) vzniká při magnetickém záznamu elektrických signálů v magnetofonu.

β) intermodulační zkreslení

Vznikne současným přivedením dvou nebo více signálů na vstup zesilovače. Na nelineární VA charakteristice zesilovacího prvku, např. tranzistoru dojde k jejich směšování – tj. k součtu a rozdílu jejich kmitočtů a k součtu a rozdílu kmitočtů jejich vyšších harmonických. Tím vznikne velké množství dalších signálů, které změní tvar zesilovaného signálu. Účinek tohoto zkreslení je větší jak u zkreslení harmonického.

Ve skutečnosti je intermodulační zkreslení daleko nepříjemnější než zkreslení harmonické. Vyšší harmonické jsou tóny, lišící se od základního kmitočtu 1. harmonické o jednu nebo více oktáv. Takové tóny při poslechu prakticky splývají a nepůsobí nelibozvučně. Nové kmitočty, vznikající směšováním, působí naopak rušivě.

V praxi obvykle intermodulační zkreslení neměříme, protože jeho měření je značně složitější než měření harmonického zkreslení. Protože obě tato zkreslení jsou způsobena nelinearitou zesilovacích prvků, spokojíme se běžně jen se změřením harmonického zkreslení a uvažujeme, že čím menší je harmonické zkreslení, tím menší je i zkreslení intermodulační a naopak.

**b) Lineární zkreslení**

Je způsobeno lineárními, kmitočtově závislými prvky v zesilovači, především kondenzátory a kapacitami, které s odpory vytvářejí nežádoucí, kmitočtově závislé děliče napětí – DČ a IČ. **Velikost lineárního zkreslení závisí na kmitočtu zesilovaného signálu.**

α) amplitudové zkreslení (přenosové, útlumové)

Projevuje se tím, že zesilovač nezesiluje na všech kmitočtech stejně, např. u nf. zesilovačů dochází k poklesu zesílení jak na straně nízkých kmitočtů (vlivem DČ), tak na straně vyšších kmitočtů (vlivem IČ). O velikosti tohoto zkreslení se přesvědčíme změřením amplitudové (přenosové, útlumové) frekvenční charakteristiky zesilovače (obr. 3.5).

poměrné AU

(lin)

u1 = konst.

fd

fh

f [Hz] (log)

0 dB

- 3 dB

fh

fd

+ ϕ

- ϕ

0°

+ 90°

- 45°

- 90°

+ 45°

Obr. 3.5 Amplitudová a fázová charakteristika nf. zesilovače

amplitudová charakteristika Au = fce (f)

fázová charakteristika ϕ = fce (f)

B = fh - fd

f [Hz] (log)

0

Z různých možných způsobů měření a grafického vyjádření této charakteristiky je v naší škole vžitý tento způsob:

Určí se závislost poměrného zesílení zesilovače v dB na kmitočtu zesilovaného signálu Au pom. = fce (f) při konstantní hodnotě vstupního napětí u1.

Postup měření: Na kmitočtu 1 kHz změříme napěťovou citlivost zesilovače (určíme velikost vstupního napětí u1, které vybudí zesilovač na hranici limitace) a tuto hodnotu zmenšíme o 20 dB (tj.10x, aby se zesilovač při měření na jiných kmitočtech náhodou nepřebudil) a udržujeme tuto hodnotu vstupního napětí u1 konstantní po celé další měření. Měníme kmitočty u1, odečítáme velikost u2 a vypočítáme poměrné napěťové zesílení, vztažené k hodnotě u2 na kmitočtu 1 kHz podle vztahu  [dB] a vypočítané hodnoty vyneseme do grafu na semilogaritmický papír (svislá osa lineární, vodorovná logaritmická). Pro pokles o –3 dB z grafu určíme mezní kmitočty fd a fh a tím šířku pásma B, kterou zesilovač přenáší.

Tento druh zkreslení není na poslech nepříjemný a někdy jej záměrně vyvoláváme, např. snížením horního mezního kmitočtu fh z důvodů omezení šumu.

β) fázové zkreslení

Je způsobeno tím, že různé kmitočty procházejí zesilovačem různou rychlostí. Tím dochází k fázovému posunutí mezi vstupním a výstupním signálem. Fázové zkreslení souvisí se zkreslením amplitudovým. Na kmitočtech, na kterých má zesilovač stálé zesílení, je fázový posuv ϕ = 0°. Směrem k nižším kmitočtům, kde klesá zesílení, se ϕ zvětšuje do kladných hodnot a na straně vysokých kmitočtů do záporných hodnot. Na mezních kmitočtech je ϕ = ± 45°. Fázová charakteristika souvisí s amplitudovou a obě jsou proto společně nakresleny na obr. 3.5. Protože náš sluch menší fázové posunutí nepostřehne, tak nám toto zkreslení ve zvukové technice nevadí. Jiná situace je v obrazové technice (televizory, monitory), kde i malé fázové zkreslení obrazového zesilovače způsobí zhoršení kvality obrazu.

**Zesilovací součástky**

K zesilování elektrických signálů je zapotřebí zesilovací prvek. Roku 1906 vynalezl Američan De Forest triodu - elektronku se třemi elektrodami, která byla schopná zesilovat elektrický signál. Ta pomohla k ohromnému rozvoji elektroniky a umožnila např. rozhlasové vysílání. Nevýhodami elektronek je, že jsou velké, potřebují žhavení a vysoké napájecí napětí, mají omezenou životnost, jsou citlivé na otřesy atd. V současné době se ještě elektronky používají jako obrazovky, speciální druhy vf. elektronek jsou např. ve vysílačích na družicích (permaktron) nebo v mikrovlnné troubě (magnetron). V moderních zařízeních jsou nahrazeny polovodičovými zesilovacími součástkami – tranzistory nebo z nich sestavenými IO.

**Princip elektronkového zesilovače**

Nejjednodušší zesilovací elektronka je trioda. V baňce (ve které je vakuum) jsou tři elektrody - katoda, anoda a řídící mřížka. Princip zesilovače s triodou je na obr. 3.6. Žhavená katoda emituje elektrony, které mají záporný náboj a jsou přitahovány kladným napětím anody. Množství elektronů, které proletí od katody na anodu lze řídit záporným předpětím UGK mezi řídící mřížkou G a katodou K. Čím je UGK větší, tím menší množství elektronu proletí na anodu a tím triodou teče menší proud. Malá změna UGK, vyvolaná vstupním zesilovaným napětím u1, vytvoří velkou změnu anodového proudu IA a na pracovním odporu zesilovače RA dojde k velké změně úbytku napětí, které se přes vazební kondenzátor odvádí jako zesílené výstupní napětí u2 .

Obr. 3.6 Princip elektronkového zesilovače

u1

-UGK

UAK

RA

u2

Cv

G1

A

K

IA

**U elektronek je velikost výstupního proudu řízena velikostí vstupního napětí.** Stejný princip se uplatňuje při řízení velikosti proudu v obrazovkách, který určuje jas rozsvěcovaných bodů na jejím stínítku.

**Tranzistory bipolární**

Hrotový bipolární tranzistor byl vynalezen v Anglii v roce 1948, jeho tři tvůrci Bardeen, Brattain a Shockley za to obdrželi Nobelovu cenu a tento vynález znamenal revoluci v elektronice a ta zase ve většině ostatních odvětvích techniky.

Tranzistory jsou vyrobeny z polovodičových materiálů. Dříve se používalo germanium Ge, dnes křemík Si a pro vysokofrekvenční tranzistory se používají tzv. směsné polovodiče - GaAs, GaAsP, GaAsAl aj. Polovodiče jsou čtyřmocné krystalické materiály s diamantovou vazbou, u kterých při snižování teploty jejich vodivost klesá a při 0 K se chovají jako izolanty. Naopak zahříváním nebo dodáním energie jiným způsobem, např. zářením, jejich vodivost - na rozdíl od vodičů - roste a to vlivem tzv. vlastní vodivosti (typu I). Nedaří se vyrobit čistý křemík, vždy obsahuje nečistoty. Jsou to prvky třímocné a pětimocné, jsou obsaženy přibližně ve stejném poměru a vytvářejí vodivost nevlastní. Jestliže je jedna vazba nenasycena – vznikne kladná díra a vodivost je děrová, pozitivní, typu P. Jestliže přebývají elektrony, je vodivost elektronová, negativní, typu N. Úmyslným dodáním (dotací) třímocných nebo pětimocných prvků (donorů a akceptorů) jeden typ vodivosti převládne a tím získáme polovodič s převládající vodivostí N nebo P. Dotace se provádí podle potřeby velká nebo malá.

C

B

E

C

B

E

typ NPN

typ PNP

Obr. 3.7 Schématické značky bipolárních tranzistorů

UBE

UCB

IE = IC + IB

IC

IB

RC

C

E

P

N

N

B

Obr. 3.8 Činnost tranzistoru

Tranzistory se dělí podle vodivosti, kmitočtu (který jsou schopné zesílit), výkonu, funkce, ale nejdůležitější rozdělení je podle principu na **bipolární** a **unipolární**. Nejdříve se budeme zabývat tranzistory bipolárními, s unipolárními tranzistory se seznámíme později.

V diodě jsou dvě vrstvy křemíku. Vrstva s vodivostí P (anoda) a vrstva s vodivostí N (katoda). Tím vznikne přechod PN, který vede proud pouze jedním směrem a to tehdy, je-li polarizován v propustném směru (tj. + pól na P a - pól na N) a přivedené vnější napětí je větší jak vnitřní difusní napětí, které je u křemíku 0,5  0,7 V (viz diody). V tranzistoru jsou tři vrstvy se střídavou vodivostí NPN nebo mnohem méně často s vodivostí PNP. Nejsilněji je dotován emitor, méně velmi tenká báze, nejméně kolektor. Tím jsou vytvořeny dva přechody a to B-E a B-C. Přechod B-E musí být zapojen v propustném směru, B-C v závěrném. Ze dvou samostatných diod se ale nedá vytvořit tranzistor, protože přechody musí být těsně vedle sebe a spolu souviset. Jeden z přechodů lze ale jako diodu použít.

U NPN tranzistoru emitor uvolňuje veliké množství záporných elektronů, které přecházejí do oblasti báze. Zde jich malá část zrekombinuje (najde volnou kladnou díru, vznikne neutrální atom) a tím vytvoří malý proud báze IB. Většina elektronů ale přejde velmi tenkou bází do oblasti kolektoru, kam je přitažena jeho velkým kladným napětím a vytvoří proud kolektorem IC. Tím tranzistorem tečou stejnosměrné klidové proudy IE , IB , IC . Proud emitorem je největší, bází nejmenší. Platí, že IE = IC + IB .

Bipolární tranzistory se dělí podle použití na nízkofrekvenční, vysokofrekvenční, spínací, pro napěťové nebo výkonové zesilovače.

**Vlastnosti bipolárních tranzistorů**

Protože má tranzistor tři elektrody, existují tři jeho různá zapojení a to se společnou bází SB, se společným emitorem SE a se společným kolektorem SC. Jedna elektroda je vždy společná pro vstup i výstup. V různém zapojení má stejný tranzistor jako zesilovač jiné vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| zapojení | elektrody | | odpor | | zesílení | | | fáze |
| vstupní | výstupní | vstupní | výstupní | Au | Ai | Ap = Au . Ai |
| SB | E | C | malý | velký | 100 | <1 | 100 | zachována |
| SE | B | C | přibližně stejný (kΩ) | | 100 | 100 | 10 000 | obrácená |
| SC | B | E | velký | malý | <1 | 100 | 100 | zachována |

**Mezní hodnoty**

Najdeme je pro každý typ tranzistoru v katalogu. Je to především hodnota maximální dovolené kolektorové ztráty PCmax., největší dovolené hodnoty proudů jednotlivými elektrodami a největší dovolené hodnoty napětí mezi nimi. Při zesilování vysokých kmitočtů je důležitá hodnota mezního kmitočtu tranzistoru fMEZ a tranzitního kmitočtu fT.

**h - parametry**

Důležitým parametrem tranzistoru pro nízkofrekvenční účely je jeho proudový zesilovací činitel h21 (čti há dva jedna). Je to poměr výstupního proudu ku vstupnímu proudu. Není to konstanta, velikost h21 závisí na proudu IC (výrazně klesá se zmenšujícím se proudem IC, menší pokles také nastává při velkých proudech IC) a na kmitočtu. Na mezním kmitočtu fMEZ poklesne velikost h21 na hodnotu 0,707 oproti hodnotě na nízkých kmitočtech, na tranzitním kmitočtu fT se hodnota h21e = 1. Jsou h - parametry stejnosměrné a střídavé pro různá zapojení tranzistoru. Naštěstí velikost stejnosměrných i střídavých h - parametrů je na nízkých kmitočtech přibližně stejná. Vztahy pro výpočty h - parametrů jsou uvedeny v následující tabulce.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | stejnosměrné | střídavé | hodnota |
| zapojení SE |  |  | 20  1000 |
| zapojení SB |  |  | <1 |

**Teplotní závislost**

Nežádoucí vlastností všech polovodičových součástek a tím i tranzistorů je závislost jejich parametrů na teplotě. Zvyšováním teploty se zvětšuje vlastní vodivost polovodičů a tím se zvětšují tzv. zbytkové proudy, tekoucí přechody PN v závěrném směru. U křemíkových tranzistorů jsou hodnoty zbytkových proudů řádově nA a tím jsou řádově tisíckrát menší než u germaniových tranzistorů a jejich vliv je proto zanedbatelný. U křemíkových tranzistorů se uplatňuje vliv zmenšování velikosti difusního napětí přechodu B-E s rostoucí teplotou. Udává se, že zvýšení teploty o jeden stupeň sníží difusní napětí o 2 mV. Změnami teploty se mění nastavení stejnosměrného pracovního bodu zesilovače a proto se musí jeho klidová poloha stabilizovat.

**Charakteristiky**

Dobrou představu o tranzistoru dává grafické vyjádření jeho vlastností pomocí charakteristik na obr. 3.9.

**Vstupní charakteristika** - kreslí se ve třetím kvadrantu. Je to charakteristika vstupního přechodu B-E a tou je VA charakteristika Si diody v propustném směru, pouze svisle překlopená a pootočená doleva o 900 . Vyjadřuje závislost IB na UBE při konstantním UCE. Vyjádřena rovnicí IB = fce (UBE).

**Převodní charakteristika** - kreslí se ve druhém kvadrantu a udává závislost IC  na IB (tzv. proudová) při konstantním UCE . Vyjádřena rovnicí IC = fce (IB). Dá se z ní určit velikost h21E .

**Výstupní charakteristiky** - kreslí se v prvním kvadrantu a udávají závislost výstupního proudu IC na napětí UCE při určité velikosti IB (hodnota IB Vyjádřeny rovnicí IC = fce (UCE). Jejich počet je libovolný, závislý na tom, kolik se jich naměří. U bipolárního tranzistoru vycházejí z tzv. mezní přímky.

V tomto kvadrantu je také zakreslena maximální dovolená kolektorová ztráta tranzistoru PCmax = UCE . ICE, jejíž křivkou je rovnoosá hyperbola a vytyčuje zakázanou oblast, ve které nesmí ležet pracovní bod zesilovače. Velikost PCmax  najdeme v katalogu a pro konstrukci její křivky zvolíme několik vhodných hodnot napětí UCE nebo proudů IC a druhé hodnoty dopočítáme**.**

**Pracovní bod zesilovače**

V závislosti na použití tranzistoru musíme zvolit určité nastavení jeho klidového pracovního bodu. V katalogu vybereme vhodný typ tranzistoru, zvolíme velikost napájecího napětí (z řady doporučených hodnot) a hodnotu pracovního odporu zesilovače RC. Tato hodnota se volí podle toho, které zesílení má býti největší. Chceme-li dosáhnout velkého napěťového zesílení Au, volíme jeho hodnotu velkou, protože , kde h11e je hodnota vstupního odporu zesilovače. Chceme-li dosáhnout velkého proudového zesílení Ai, volíme jeho hodnotu malou. Chceme - li dosáhnout velkého výkonového zesílení AP, volíme jeho hodnotu střední.

IC = fce (UCE)

1

A

převodní

mezní

přímka

výstupní

UBE

IB

A

A

B

IC

UBE

PCmax

IB = fce (UBE)

IB

UCE

IC

IB = 0

IC = fce (IB)

S

UCE

IC . RC

IB

vstupní

2

IB

Obr. 3.9 Nastavení klidového pracovního bodu zesilovače v zapojení SE

0

Zesilovač je **nelineární dělič napětí**, tvořený pracovním odporem zesilovače RC (součástkou lineární) a odporem tranzistoru (součástkou nelineární). V tomto nelineárním děliči je hodnota pracovního odporu RC konstantní, tranzistor naopak svůj odpor mění podle velikosti řídícího proudu IB. Malá změna proudu IB vyvolá velkou změnu odporu tranzistoru, tím dojde k velké změně proudu děličem (tj. proudu IC) a tím dojde k velké změně výstupního napětí děliče. **U bipolárních tranzistorů je velikost výstupního proudu řízena velikostí vstupního proudu.** Zvětšováním IB se odpor tranzistoru zmenšuje - tranzistor se otevírá, zmenšováním IB se jeho odpor zvětšuje, zavírá se. Při řešení zesilovače jako nelineárního děliče se používá místo složitých výpočtů grafické řešení podle obr. 3.9.

Do sítě výstupních charakteristik v zapojení SE na obr. 3.9 zakreslíme statickou (klidovou) zatěžovací přímku pracovního odporu RC. K její konstrukci musíme určit její dva body, ležící na osách UCE a IC a to z rovnice UN = IC . RC + UCE. Bod **1** leží na ose napětí při proudu IC = 0 A (když má tranzistor nekonečný odpor). Dosazením do rovnice vyjde, že velikost UCE = UN. Bod **1** je tedy určen velikostí napájecího napětí UN. Bod **2** leží na ose IC, UCE = 0 V  (tranzistor je ve zkratu) a z rovnice vyjde, že IC = UN / RC. Statická zatěžovací přímka nesmí protínat zakázanou oblast, vytyčenou křivkou maximální dovolené kolektorové ztráty tranzistoru PCmax, maximálně se jí může dotknout v jednom bodě (aby nebyl tranzistor výkonově přetížen). Na zatěžovací přímce leží **klidový pracovní bod zesilovače A**. Je to průsečík statické zatěžovací přímky s určitou výstupní charakteristikou tranzistoru, odpovídající určité hodnotě IB. Poloha pracovního bodu na statické zatěžovací přímce je omezena bodem **B**, což je průsečík výstupní charakteristiky při IB  = 0 A se zatěžovací přímkou. V tomto bodě je tranzistor **zavřený**,teče jím pouze malý zbytkový proud ICEo. Druhá krajní poloha je v bodě **S**, což je průsečík mezní přímky se zatěžovací přímkou a v tomto bodě je tranzistor naplno **otevřený**, (je v saturaci, sepnutý) a je na něm minimální saturační napětí UCEs. To u spínacích tranzistorů může být menší než difusní napětí přechodu B-E.

Chceme–li zesílit obě půlvlny vstupního napětí u1 a přitom dosáhnout co největší amplitudy výstupního napětí u2, volíme polohu klidového pracovního bodu zesilovače uprostřed statické zatěžovací přímky. Potom jsou úbytky napětí na pracovním odporu zesilovače (IC . RC ) a na tranzistoru (UCE ) stejné. Tím se UCE rovná polovině UN (tranzistor má v tomto případě stejný odpor jako je hodnota RC). Z charakteristik vypočítáme velikost h21E a odečteme velikost IB  na výstupní charakteristice ve zvoleném pracovním bodě. Velikosti IB odpovídá ze vstupní charakteristiky určitá velikost UBE. Zbývá určit hodnotu odporu báze RB (podle zapojení na obr. 3.10), kterým nastavíme potřebnou hodnotu napětí UBE pro dosažení požadované hodnoty proudu IB. Hodnotu samotného RB určíme ze vztahu .

Pro dosažení větší stability pracovního bodu při změnách teploty je lepší napájet přechod BE z tvrdého děliče napětí RB, RB´ podle obr. 3.11. Proud děličem ID volíme alespoň desetkrát větší než je proud báze IB. Z hodnot UBE a ID vypočítáme odpor RB´ podle vztahu RB´ = UBE / ID.

Hodnotu RB určíme ze vztahu RB = UN – U BE / ID + IB.

Obr. 3.10 Proud IB určený odporem RB

IB

IE

IB

UCE

RC

RB

UBE

IC

IC . RC

UN

+

Obr. 3.11 Proud IB určený děličem RB, RB´

ID + IB

IE

RB/

IB

UCE

RC

RB

ID

UBE

IC

IC . RC

UN

+

Ze schémat na obr. 3.10 a 3.11 je vidět, že tranzistorem tečou stejnosměrné klidové proudy, které určují polohu klidového pracovního bodu, a to vstupní (řídící) proud báze IB a proud výstupní (kolektorový) IC, který je **h21E krát větší** než IB. Vstupní proud IB teče z + pólu zdroje UN přes RB, přechodem B-E na – pól zdroje UN. Výstupní proud IC teče z + pólu zdroje UN přes pracovní odpor zesilovače RC, přes vrstvy tranzistoru C - B - E na – pól zdroje UN. Oba proudy tečou stejným směrem přes emitor a proto emitorem teče proud největší a to IE  = IC + IB.

**Zapojení zesilovačů**

Podle elektrody, která je společná vstupu i výstupu zesilovače rozeznáváme zapojení zesilovače SE (společný emitor), SB (společná báze) a SC (společný kolektor).

**Zesilovač v zapojení SE.**

Zesilovaný signál u1 musíme přivést na vstup zesilovače přes oddělovací (vazební) kondenzátor CV1 proto, že zdroj zesilovaného signálu může mít stejnosměrně malý odpor (může to být např. cívka přenosky, hlavičky magnetofonu, mikrofonu atd.) a po připojení zdroje zesilovaného signálu u1 by stejnosměrný proud místo do báze tekl přes zdroj zesilovaného signálu a tím by se změnily nastavené stejnosměrné poměry. Tento vazební kondenzátor CV1 však tvoří se vstupním odporem zesilovače **nežádoucí, kmitočtově závislý dělič napětí (**DČ). Ten způsobuje pokles zesílení zesilovače na nízkých kmitočtech. Velikost CV1 se volí s ohledem na dolní mezní kmitočet zesilovače, na kterém pro pokles zesílení o 3 dB platí, že jeho reaktance se rovná hodnotě vstupního odporu zesilovače XCv1 = Rvstup .

Také střídavý výstupní signál se odebírá přes vazební kondenzátor CV2, který zabraňuje průtoku stejnosměrného proudu do zátěže a tím zabraňuje změně nastavených stejnosměrných poměrů v zesilovači po připojení zátěže. CV2 tvoří také se zatěžovacím odporem nežádoucí DČ, který zmenšuje zesílení zesilovače na nízkých kmitočtech.

Při kladné půlvlně zesilovaného signálu u1 (obr. 3.12 a 3.14) teče ze zdroje zesilovaného napětí u1 do vstupu zesilovače vstupní střídavý proud i1 přes CV1, otevřený přechod B-E a zpět do zdroje u1. Proud i1 má stejný směr jako stejnosměrný klidový proud báze IB a proto se oba proudy sečtou na IB´. Malé zvětšení proudu přechodem B-E způsobí velké zvětšení proudu výstupního IC na hodnotu IC´, protože platí rovnice

Zvětšení IC (zvětší se proto, že odpor tranzistoru se zmenšil a proto nelineárním děličem, tvořeným pracovním odporem zesilovače RC a odporem tranzistoru poteče větší proud IC)způsobí větší úbytek napětí na pracovním odporu zesilovače RC a menší úbytek napětí na zmenšeném odporu tranzistoru podle rovnice UN = IC . RC + UCE. Zmenšení UCE (v zapojení SE je to výstupní napětí děliče) se přenese přes vazební kondenzátor CV2 jako záporná půlvlna výstupního napětí u2. Pracovní bod zesilovače se přitom posouval po vstupní, převodní i výstupní charakteristice z klidového bodu A do bodu A´ a zpět do bodu A (viz obr. 3.14). Z toho vyplývá, že kladná půlvlna vstupního napětí je na výstupu zesílena jako půlvlna záporná a naopak **– zesilovač v zapojení SE obrací fázi zesilovaného napětí**.

Obr. 3.12 Vstupní proud i1 při kladné půlvlně u1

IB

IC

RC

RB

i1

u1

UN

UCE

IC . RC

i1

u2

i1

CV2

CV1

IB

IC

RC

RB

i1

u1

UN

UCE

IC . RC

i1

u2

i1

CV2

CV1

Obr. 3.13 Vstupní proud i1 při záporné půlvlně u1

Při záporné půlvlně zesilovaného signálu u1 (obr. 3.13 a 3.14) teče proud i1 opačným směrem, proti směru proudu báze IB a proto se oba proudy odečtou. Dojde ke zmenšení proudu přechodem B-E na hodnotu IB´´, tím ke zmenšení IC na IC´´(zmenšením IB se tranzistor přivřel = zvětšil svůj odpor). Tím se zmenší úbytek napětí na pracovním odporu RC a zvětší se úbytek napětí na tranzistoru UCE, kterévzroste na UCE´´. Zvětšení UCE se přenese na výstup jako kladná půlvlna u2. Pracovní bod zesilovače se přitom posouval po vstupní, převodní i výstupní charakteristice z klidového bodu A do bodu A´´a zpět do bodu A.

Zesilovač v zapojení SE má velké zesílení napěťové i proudové a tím má veliké výkonové zesílení. Jeho vstupní i výstupní odpor je přibližně stejný (řádově kΩ). Tím je vhodný pro vícestupňové zesilovače vzhledem ke snadnému výkonovému impedančnímu přizpůsobení mezi stupni. Pro tyto vlastnosti je zesilovač s tranzistorem v **zapojení SE ze všech zapojení nejpoužívanější.**

u2

UCE

IC = f ce(UCE)

A

A

IC

UBE

IB = fce (UBE)

IB

UCE

IC

IC = fce (IB)

IB

u1

A´´

A´

A´´

A´

IB´´= IB **-** i1

IB´= IB + i1

IC´

IC´´

UCE´

UCE´´

IB

A

A´´

A´

Obr. 3.14 Princip zesílení zesilovače v zapojení SE pomocí sítě charakteristik

0

IB

IB´

IB´´

**Zesilovač v zapojení SB**

Jeho zapojení je na obr. 3.15. Vstupní elektroda je emitor, výstupní kolektor, báze je střídavě uzemněna pro zesilovaný signál přes kondenzátor CB. V obvodu emitoru musí být zapojen odpor RE proto, aby nebyl zkratován zesilovaný signál. Stejnosměrné poměry v zapojení SB jsou nastaveny obdobně jako v zapojení SE.

u1

RB

u2

UN

CV1

CV2

RE

RB´

RC

CB

Obr. 3.15 Zapojení SB

Při kladné půlvlně u1 teče vstupní proud ze zdroje u1 proti směru klidového proudu báze IB přes E do B a přes CB zpět na zdroj u1. Tím se proud přechodem B-E zmenší, odpor tranzistoru vzroste, poklesne výstupní proud IC, na pracovním odporu zesilovače dojde k menšímu úbytku napětí a UCE  vzroste. Jeho zvětšení se přenese na výstup přes CV2 jako kladná půlvlna výstupního napětí u2. Při záporné půlvlně u1 je děj opačný. Zapojení SB neotáčí fázi zesilovaného signálu, zesiluje pouze napěťově, proudové zesílení je nepatrně menší jak 1, tím i výkonové zesílení je malé. Má malý vstupní odpor, velký výstupní odpor. Protože vnitřní mezielektrodová kapacita CBC není v zapojení SB mezi výstupem a vstupem a proto nezavádí nežádoucí –ZV jako v zapojení SE, pracuje stejný tranzistor v zapojení SB do vyšších kmitočtů než v zapojení SE. Z tohoto důvodu se zapojení SB používá jako vf. zesilovače a najdeme ho např. na vstupech televizních a FM rozhlasových přijímačů.

**Zpětná vazba**

Zpětná vazba je přivedení části výstupního napětí u2 (tzv. napětí zpětnovazebního uzv) zpět na vstup zesilovače. Jak velká část u2 se přivede zpět na vstup zesilovače určuje činitel zpětné vazby β.  (1)

β

u1

u2

uzv

u1´

u2

Obr. 3.16 Princip zpětné vazby

Velikost β může být 01. Při rozpojené smyčce ZV je β = 0 a na vstup se z výstupu nepřivádí žádné napětí. Přivedeme-li celé výstupní napětí u2 zpět na vstup, potom u2 = uZV a β = 1.

**Odvození zesílení zesilovače se zpětnou vazbou**

Zesilovač bez zavedené zpětné vazby má zesílení AU. Po zavedení zpětné vazby se celkové zesílení zapojení (zesilovač se zpětnou vazbou) změní na AU´.

Zesílení zesilovače bez zavedené ZV:  (2)

Celkové zesílení zesilovače se ZV:  (3)

Zavedením ZV je skutečná velikost vstupního napětí zesilovače rovna:  (4)

Dosazením do rovnice (3) dostaneme:  (5)

Z rovnice (1) vyplývá, že  (6)

Dosazením rovnice (6) do rovnice (5) dostaneme:  (7)

Úpravou rovnice (7) dostaneme obecný vztah pro výpočet zesílení zesilovače se ZV:  (8)

**Druhy zpětných vazeb**

Zpětná vazba může být **žádoucí** nebo **nežádoucí**. Žádoucí ZV vznikne úmyslným přivedením zpětnovazebního napětí uZV  zpět na vstup zesilovače. Vzniku nežádoucí ZV nedokážeme zabránit.

Podle fáze zpětnovazebního napětí uZV vzhledem k napětí vstupnímu u1 vzniká ZV **kladná** nebo **záporná***.* Podle toho, jak se zpětnovazební napětí připojí ke vstupu zesilovače ji dělíme na **sériovou** a **paralelní**. Podle toho, zda velikost zpětnovazebního napětí je určena velikostí výstupního napětí nebo výstupního proudu ji dělíme na **napěťovou** a **proudovou**. Podle toho, zda zpětnovazební napětí je stejnosměrné nebo střídavé ji dělíme na **stejnosměrnou** a **střídavou**. Střídavá –ZV může být **kmitočtově závislá** nebo **kmitočtově nezávislá**. ZV může být zavedena **v jednom stupni** nebo **přes více zesilovacích stupňů**. Existují různé kombinace všech těchto druhů ZV.

Na obr. 3.17 je princip zapojení zpětné vazby sériové napěťové, na obr. 3.18 paralelní proudové.

β

u1

u2

uzv

u1´

u2

Obr. 3.17 Princip ZV sériové napěťové

β

u1

u2

uzv

u1´

u2

Obr. 3.18 Princip ZV paralelní proudové

**Kladná ZV**

Vznikne přivedením zpětnovazebního napětí uZV zpět na vstup ve fázi se vstupním napětím u1, tím se obě tato napětí sečtou a skutečné vstupní napětí se zavedenou zpětnou vazbou u1´ vzroste. Při stálé velikosti Au vzroste i velikost výstupního napětí u2 a tím vzroste celkové zesílení zesilovače s +ZV, které se určí z rovnice  (9)

**+ZV zvětšuje zesílení zesilovače*.*** Používá se v oscilátorech, v zesilovačích pouze k hrazení ztrát (neutralizace ve vf. zesilovačích).

**Záporná ZV**

Vznikne přivedením zpětnovazebního napětí uZV zpět na vstup v protifázi se vstupním napětím u1, tím se obě napětí odečtou a u1´ klesne. Při stálé velikosti Au klesne i velikost výstupního napětí u2 a tím klesne celkové zesílení zesilovače s –ZV, které se určí z rovnice  (10)

**-ZV zmenšuje zesílení zesilovače*.*** Používá se v zesilovačích velmi často, protože kromě zmenšení zesílení (vlastnost většinou nežádoucí) má na ostatní vlastnosti zesilovače příznivý vliv.

**Vliv záporné ZV na vlastnosti zesilovače.**

1. zmenšuje zesílení zesilovače
2. zmenšuje nelineární zkreslení zesilovače tím, že celkovým zmenšením zesílení se zmenší velikost výstupního napětí zesilovače u2. Pro dosažení původní hodnoty u2 se musí zvětšit velikost vstupního napětí u1 (tedy napětí 1. harmonické) a tím ve vztahu ** se zvětší jmenovatel a hodnota *k* se zmenší
3. zmenšuje lineární zkreslení zesilovače tím, že zvětšuje šířku přenášeného kmitočtového pásma B. Největší velikost zpětnovazebního napětí uZV je na kmitočtech, na kterých má zesilovač největší zesílení. U nf. zesilovačů to je přibližně uprostřed přenášeného kmitočtového pásma. Na těchto kmitočtech bude –ZV nejsilnější a dojde na nich k největšímu poklesu zesílení. Tím se mezní kmitočty zesilovače fd a fh posunou na fd´ a fh´ a šířka přenášeného o pásma se zvětší z B na B´ (obr. 3.19)

u1 = konst.

fd

fh

f

poměr. Au

0 dB

- 3 dB

B = fh - fd

B´ = fh´ - fd´

fh´

fd´

0 dB

- 3 dB

s -ZV

bez ZV

Obr. 3.19 Přenosové charakteristiky bez ZV a se – ZV

0

1. zmenšuje kolísání zesílení zesilovače (tzv. drift) např. při změnách napájecího napětí, změnách teploty, stárnutím součástek atd. Při velkém napěťovém zesílení zesilovače bez –ZV se v rovnici (10) dá provést její rozšíření na tvar  (11) ze kterého vyplývá, že velikost Au´ při velkém zesílení Au je určena především velikostí činitele zpětné vazby β. Stálost zesílení zesilovače má velký význam např. v zesilovačích v měřících přístrojích
2. zmenšuje vlastní šum zesilovače
3. ovlivňuje vstupní a výstupní odpor zesilovače tak, že paralelní zmenšuje a sériová zvětšuje jeho vstupní odpor, napěťová zmenšuje a proudová zvětšuje jeho výstupní odpor
4. stejnosměrná –ZV teplotně stabilizuje klidovou polohu pracovního bodu zesilovače

**Zapojení zesilovačů se zápornou zpětnou vazbou**

Existuje ohromné množství různých zapojení zesilovačů se zápornou zpětnou vazbou. Seznámíme se pouze s nejpoužívanějšími.

**Zapojení zesilovače se zápornou ZV sériovou proudovou**

Na obrázcích 3.20 a 3.21 je nejpoužívanější způsob zavedení –ZV a to sériové proudové, která se vytvoří zapojením odporu RE do emitoru. Průtokem proudu IE dochází na tomto odporu k úbytku napětí UE a toto napětí je současně napětím zpětnovazebním uZV. Při kladné půlvlně u1 dojde ke zvětšení vstupního proudu, tekoucího přechodem B-E a tím ke zvětšení proudu výstupního IC a proudu IE. Tím se zvětší úbytek napětí UE  na odporu RE, které je současně napětím zpětnovazebním uZV. Tím se ale zmenší rozdíl napětí UBE mezi B a E a tím poklesne proud přechodem B-E a tím i proud výstupní IC. Při záporné půlvlně u1 je děj opačný. Protože uZV působí proti účinkům napětí vstupního u1, jde ZV zápornou. Protože uZV je v sérii se vstupním napětím u1, jedná se –ZV sériovou, která zvětšuje vstupní impedanci zesilovače. Protože velikost zpětnovazebního napětí uZV je určena velikostí výstupního proudu, jedná se –ZV proudovou, která zvětšuje výstupní impedanci zesilovače. Je to –ZV střídavá i stejnosměrná. Stejnosměrná –ZV teplotně stabilizuje klidovou polohu jeho pracovního bodu. Střídavá –ZV zmenší zesílení zesilovače. Jeho velikost je v tomto zapojení přibližně určena vztahem  (12)

UN

Obr. 3.20 Zapojení – ZV sériové proudové,

stejnosměrné i střídavé

IB

IC

UCE

IC . RC

RC

RB

u1

u2

UN

CV2

CV1

UE = uzv

UBE

UB

IE

RE

RC

RB

u2

CV2

CV1

Obr. 3.21 Zapojení – ZV sériové proudové,

pouze stejnosměrné

RE

CE

RB´

u1

**Teplotní stabilizace pracovního bodu zesilovače.**

V úvodu této kapitoly v odstavci 3.4.1.3 je popsána nežádoucí vlastnost polovodičových součástek – jejich teplotní závislost a její vliv na tranzistor. V zapojení se stejnosměrnou –ZV (obr. 3.20 a 3.21) bude tento vliv menší, protože stejnosměrná –ZV působí proti němu.

Při zvýšení teploty dochází ke zmenšováním difusního napětí přechodu B-E, které způsobí zvětšování stejnosměrného proudu IB tekoucího přechodem B-E. Zvětšení IB (zesílené h21E krát) způsobí zvětšení kolektorového proudu IC. Tím na odporu RE v emitoru dojde k většímu úbytku stejnosměrného napětí a tím dojde ke zmenšení UBE. Proud přechodem B-E se zmenší a tím se zmenší i hodnota výstupního proudu IC, takže jeho nárůst vlivem zvýšení teploty bude malý. Ještě větší stabilitu má pracovní bod v zapojení na obr. 3.21. V tomto zapojení je napětí báze proti zemi UB určeno tvrdým děličem a je proto stálé. Tím se změny teploty na změně polohy pracovního bodu budou ještě méně uplatňovat.

Nevýhodou zapojení podle obr. 3.20 je zmenšení zesílení zesilovače podle rovnice (12). Zmenšení zesílení lze potlačit zapojením tzv. blokovacího kondenzátoru CE paralelně k emitorovému odporu RE. Pokud jeho hodnota bude dostatečně velká, aby jeho reaktance XC byla v pásmu zesilovaných kmitočtů zanedbatelná, bude mít zpětnovazební napětí uZV pouze složku stejnosměrnou (střídavá je zkratována nebo vyfiltrována kondenzátorem CE), a ta nebude zmenšovat zesílení zesilovače, ale bude stabilizovat klidovou polohu jeho pracovního bodu. Pokud má CE v pásmu zesilovaných kmitočtů proměnnou reaktanci, vznikne –ZV kmitočtově závislá, která bude měnit zesílení zesilovače v závislosti na kmitočtu. Toho se využívá např. v obrazových zesilovačích, ve kterých se pomocí této kmitočtově závislé –ZV zvyšuje zesílení na vysokých kmitočtech.

**Zapojení zesilovače SC (se zápornou ZV sériovou napěťovou)**

UBE

UB

Na obr. 3.22 je zapojení tranzistoru se společným kolektorem, nazývané také emitorový sledovač, protože výstupní napětí u2 je co do velikosti i fáze stejné jako vstupní napětí u1. Vstupní elektrodou je báze, výstupní emitor, pracovním odporem zesilovače je emitorový odpor RE. I v tomto zapojení představuje zesilovač nelineární dělič, výstup je z pracovního odporu RE (na rozdíl od SE a SB). Stejně jako v SE a v SB musí být i v zapojení SC přechod B-E polarizován v propustném směru a přechod B-C v závěrném směru. Proto napětí báze proti zemi UB je dáno součtem napětí UBE a úbytkem napětí UE na pracovním odporu v emitoru RE.

UE uzv

u1

RB

u2

UN

CV2

CV1

Obr. 3.22 Zapojení – ZV sériové napěťové

RE

RB´

UBE

UB

V zapojení je zavedena 100% -ZV, protože celé výstupní napětí u2 je současně napětím zpětnovazebním uZV a tím tento zesilovač má napěťové zesílení nepatrně menší jak 1. Zesiluje pouze proudově a tím je i výkonové zesílení malé. Vyznačuje se velikým vstupním odporem a malým výstupním odporem. Pro velký vstupní odpor se používá na vstupech zesilovačů (nezatěžuje zdroj zesilovaného signálu) a pro malý výstupní odpor v koncových stupních, protože je schopen dodat do zátěže velký proud.

**Zapojení zesilovače se zápornou ZV paralelní napěťovou**

Přes odpor RB je zavedena –ZV paralelní napěťová střídavá i stejnosměrná (obr. 3.23).

RC

RB

u2

UN

CV2

CV1

Obr. 3.23 Zapojení – ZV paralelní napěťové

u1

RB´

UBE

UCE

+

Střídavá –ZV zmenšuje zesílení zesilovače, stejnosměrná stabilizuje klidovou polohu pracovního bodu při změnách teploty. Zahřátím tranzistoru klesá difusní napětí přechodu B-E. Tím vzrůstá proud báze IB, tato změna h21E krát zesílená se projeví zvětšením IC. Nárůst proudu IC vytvoří větší úbytek napětí na pracovním odporu zesilovače RC a napětí na tranzistoru UCE podle rovnice UN = IC.RC + UCE poklesne. Z  napětí UCE je ale napájen dělič báze RB, RB´. Tím se napětí UBE přechodu B-E zmenší a poklesne i proud báze IB. Tím se klidová poloha pracovního bodu změní jen nepatrně.

**Zapojení se zápornou ZV paralelní napěťovou kmitočtově závislou**

Je na obr. 3.24. Přes kondenzátor Czv je zavedena z výstupu na vstup –ZV paralelní napěťová, kmitočtově závislá. Tato –ZV způsobí pokles zesílení směrem k vyšším kmitočtům, protože s rostoucím kmitočtem zesilovaného signálu se reaktance tohoto kondenzátoru zmenšuje a z výstupu se přivádí větší napětí zpět na vstup, -ZV je silnější a zesílení na vyšších kmitočtech se proto bude zmenšovat.

u1

RB

u2

UN

CV2

CV1

Obr. 3.24 Zapojení – ZV kmitočtově závislé

RE

RB´

RC

Czv

I bez kondenzátoru CZV se v každém zapojení zesilovače SE uplatňuje tato nežádoucí -ZV. Způsobuje ji vnitřní mezielektrodová kapacita CBC závěrně polarizovaného přechodu B-C, přes kterou se zavádí a způsobuje pokles zesílení zesilovačů na vyšších kmitočtech. Z těchto důvodů musí mít vf. tranzistory tuto kapacitu co možná nejmenší (desetiny pF).

Kapacita CBC přepočtená na vstup zesilovače jako jeho vstupní kapacita se nazývá Millerova kapacita a její hodnota je určena rovnicí  (13)

Musí se s ní počítat u vf. zesilovačů, má vliv na stabilitu kmitočtu vf. oscilátorů.

**Teplotně stabilizované zapojení zesilovače**

Nejdokonaleji teplotně stabilizované zapojení zesilovače je na obr. 3.25. Je to kombinace –ZV sériové proudové stejnosměrné s –ZV paralelní napěťovou stejnosměrnou i střídavou společně s teplotní kompenzací pomocí teplotně závislého děliče napětí RB, RB´ v obvodu báze. Odpor RB´ je termistor se záporným součinitelem odporu, který zmenší svoji hodnotu při zvýšení teploty tranzistoru (bývá upevněn na chladícím žebru tranzistoru). Tím při zvýšení teploty dělič RB, RB´ zmenší napětí na bázi, proud bází IB poklesne a poloha pracovního bodu se změní pouze nepatrně.

RC

RB

u2

UN

CV2

CV1

Obr. 3.25 Teplotně stabilizované zapojení

u1

RB´

RE

CE

-t

Vyrábějí se termistory se svorníkem, na kterém je závit a které se potom dají připevnit na chladící žebro koncových tranzistorů.

**Invertor**

Obr. 3.26 Zapojení invertoru

RC

RB

u2

UN

CV2

CV1

RE

CV3

RB´

u2´

u1

Je to zapojení zesilovače (obr 3.26), ve kterém se hodnota RC = RE. Zapojení má dva výstupy. Výstup z kolektoru je zapojení zesilovače SE, jehož AU = 1 (podle rovnice 12). Tím je amplituda výstupního napětí u2 stejná jako vstupního napětí u1, ale fáze je opačná.

Výstup z emitoru je zapojení zesilovače SC, takže výstupní napětí u2´ je co do velikosti i fáze stejné jako vstupní napětí u1 a tím dostáváme na obou výstupech dvě stejně velká napětí v protifázi.

Invertor se používá pro buzení dvojčinných zesilovačů.

**Vysokofrekvenční zesilovače**

Vf. zesilovače slouží k zesilování vysokofrekvenčních signálů. Vf. zesilovače můžeme rozdělit na:

a) vf. zesilovače pro zesilování signálů s nízkou úrovní (např. v přijímačích)

b) vf. výkonové zesilovače (např. ve vysílačích)

Na oba typy vf. zesilovačů jsou kladeny zcela rozdílné požadavky a také jejich technické řešení je odlišné. U vysokofrekvenčních zesilovačů pro zesilování signálů s nízkou úrovní je důležitý **malý šum** a **velké zesílení** při požadované **šíři frekvenčního pásma B**, u vf. výkonových zesilovačů nás zajímá hlavně co nejvyšší dosažitelný **výstupní výkon** a co nejvyšší **účinnost**.

Podle šíře frekvenčního pásma zpracovávaného signálu rozdělujeme vysokofrekvenční zesilovače na:

a) širokopásmové

b) úzkopásmové

Hranice mezi širokopásmovým a úzkopásmovým zesilovačem není přesně definována, bývá to hodnota B = 2 ÷ 3 % frekvence f0, kde f0 je střední frekvence zesilovaného signálu.

**Vlastnosti vysokofrekvenčních zesilovačů**

Vysokofrekvenční zesilovač musí mít

1. na rezonanční frekvenci f0 potřebné **napěťové zesílení AU** a **výkonové zesílení AP**
2. požadovaný **tvar amplitudové charakteristiky v okolí f0,** tj. musí mít potřebnou **šíři frekvenčního pásma B** (určuje se pro pokles signálu na výstupu zesilovače o 3 dB na obou stranách kolem rezonanční frekvence f0) a **selektivitu S** (většinou se určuje jako poměr šířek pásma pro pokles o 3 dB a 20 dB)

 

1. požadovaný tvar **fázové charakteristiky,** tj. závislosti fázového posunu mezi výstupním a vstupním napětím na frekvenci
2. co nejmenší **šumovou šířku pásma** (ta charakterizuje průchod šumu ze vstupu na výstup zesilovače) a co nejmenší **šumové číslo** **F**, které udává, kolikrát se zvětší poměr signál/šum po průchodu signálu ze vstupu na výstup vysokofrekvenčního zesilovače

**Zapojení vf. laděného zesilovače**

Vysokofrekvenční laděný zesilovač (obr. 3.27) má v kolektoru místo pracovního odporu zapojen paralelní rezonanční obvod. Stejnosměrně představuje PRO pouze odpor vinutí cívky. Proto se hodnota stejnosměrného výstupního proudu tekoucího tranzistorem omezuje zařazením emitorového odporu RE. Ten zavádí –ZV, která by zmenšovala zesílení. Proto se přemosťuje paralelně připojeným kondenzátorem CE, takže –ZV je pouze stejnosměrná, stabilizující klidovou polohu pracovního bodu zesilovače. Ta je důležitá u vf. zesilovače proto, aby se neměnily jeho parametry a tím se neměnily i kapacity tranzistoru a tím se zesilovač nepřelaďoval.

u1

u2

CV2

L

CE

RB

CV1

RE

RB´

Obr 3.27 Vf. laděný zesilovač

T

C

LV

2

1

UN

Pro střídavý zesilovaný signál představuje PRO proměnnou impedanci, která je největší na rezonančním kmitočtu a minimální mimo rezonanci. Tato proměnná, kmitočtově závislá hodnota impedance PRO představuje proměnnou hodnotu pracovního odporu zesilovače a protože napěťové zesílení zesilovače závisí na velikosti impedance, zapojené v kolektoru podle vztahu , bude se měnit zesílení zesilovače s kmitočtem. Největší zesílení bude mít laděný zesilovač na výsledném rezonančním kmitočtu, který určuje především PRO, ale ovlivňují ho všechny další kapacity v zesilovači. Šířka zesilovaného pásma závisí na celkové jakosti Q. Samotný PRO může mít vysokou jakost Q, která je zmenšena tlumením tranzistorem a případnou zátěží výstupu. Výslednou jakostí je určena šířka pásma B, kterou zesilovač přenáší.

Při požadavku na úzké přenášené kmitočtové pásmo se tlumení PRO zmenší pomocí kapacitního děliče C1, C2 nebo připojením vnějších obvodů na odbočku na cívce. Příklady takového impedančního přizpůsobení jsou na obr. 3.28.

Obr 3.28 Impedanční přizpůsobení rezonančního obvodu

L

C

LV

C

L

L

C1

C2

**Vícestupňové zesilovače**

Více zesilovacích stupňů za sebou se použije tehdy, když nestačí zesílení jednoho stupně. Signál z výstupu prvního zesilovacího stupně se přivádí na vstup druhého zesilovacího stupně atd. Celkové zesílení vícestupňového zesilovače je dáno součinem zesílení jednotlivých zesilovacích stupňů

AC = A1 . A2 . A3.....An

Je-li udáno zesílení jednotlivých stupňů v dB, potom celkové zesílení je dáno součtem zesílení jednotlivých zesilovacích stupňů AC[dB] = A1[dB] + A2[dB] + A3[dB] +.........+ An[dB] [dB]

Při spojování jednotlivých zesilovacích stupňů za sebou musí být zachována podmínka správného výkonového impedančního přizpůsobení, při kterém se má výstupní impedance předchozího zesilovacího stupně rovnat vstupní impedanci následujícího stupně.

Protože výstup jednoho stupně a vstup následujícího stupně mají obvykle jiné stejnosměrné napětí, musí se mezi jednotlivými stupni použít vhodný vazební prvek (vazba), který jednotlivé stupně mezi sebou propojí střídavě pro zesilovaný signál, ale oddělí stejnosměrně. Používá se vazba kapacitní, induktivní (transformátorová), laděná a přímá (galvanická).

**Kapacitní vazba**

Zapojení dvoustupňového zesilovače s kapacitní vazbou je na obr. 3.29. Je to nejpoužívanější způsob vazby mezi zesilovacími stupni. Vazebním prvkem je kondenzátor CV2, který stupně musí oddělit stejnosměrně (protože kolektor tranzistoru T1 má větší stejnosměrné napětí než báze tranzistoru T2) a zároveň navazuje oba stupně pro střídavý zesilovaný signál. Nevýhodou této vazby je, že reaktance vazebního kondenzátoru CV2 vytváří se vstupním odporem druhého zesilovacího stupně derivační článek, který se chová jako kmitočtově závislý dělič napětí a zmenšuje celkové zesílení zesilovače na nízkých kmitočtech (obr. 3.30). Hodnota vazebního kondenzátoru CV2 se vypočítá z požadavku na dolní mezní kmitočet fd, který má zesilovač přenášet s poklesem o – 3 dB a to ze vztahu Rvst = XCV2 . Při jednom DČ v zesilovači klesá zesílení zesilovače směrem k nízkým kmitočtům s poklesem – 6 dB/okt., tj. –20 dB/dek. Při dvou DČ je to – 12 dB/okt. atd.

T2

T1

Obr 3.29 Kapacitní vazba

u1

u2

UN

RB1

CV2

RB1´

RC1

CV1

RB2

CV3

RB2´

RC2

Také na vysokých kmitočtech dochází k poklesu zesílení zesilovače a to vlivem nežádoucí –ZV v zapojení SE, kde se uplatňuje vnitřní mezielektrodová kapacita CBC a dále vlivem dalších parazitních kapacit, jako jsou kapacity součástek, kapacity součástek proti zemi, kapacity spojů, kapacity spojů proti zemi a mezi sebou atd., které spolu s výstupním odporem zesilovače vytvářejí nežádoucí IČ, které potom způsobují pokles zesílení na vysokých kmitočtech. Další vliv na pokles zesílení na vysokých kmitočtech má zmenšování h21e s rostoucím kmitočtem.

u1 = konst.

fd

fh

f

poměr. Au

0 dB

- 3 dB

B = fh - fd

Obr. 3.30 Amplitudová charakteristika nf. zesilovače

0

**Transformátorová vazba**

u1

u2

UN

RB1

RE1

RB1´

CV1

RB2

CV2

RE2

RB2´

Obr 3.31 Transformátorová vazba

Tr1

T2

Tr2

T1

Její zapojení je na obr.3.31. V kolektoru tranzistoru je místo pracovního odporu zapojeno primární vinutí transformátoru. Změnami kolektorového proudu, protékajícího tímto vinutím, dochází ke změnám magnetického toku v jádře transformátoru a tím se v sekundárním vinutí indukuje napětí, které se přivádí na vstup následujícího stupně. Tím jsou oba stupně odděleny stejnosměrně a navázány střídavě. Nevýhodou této vazby je, že transformátor je drahý, velký a jeho jádro je stejnosměrně sycené (stejnosměrným proudem IC), takže hrozí nebezpečí, že při zvětšení výstupního proudu (při kladné půlvlně zesilovaného signálu) může dojít k jeho přesycení a tím ke zkreslení zesilovaného signálu. Protože velikost indukovaného napětí závisí na kmitočtu, klesá proto zesílení zesilovače směrem k nižším kmitočtům. Pokles zesílení na vysokých kmitočtech způsobují opět parazitní kapacity. Tím amplitudová charakteristika vychází přibližně stejná jako u vazby kapacitní na obr. 3.29. Kondenzátor CV2 zabraňuje průtoku stejnosměrného proudu z děliče v obvodu báze RB, RB´ přes sekundární vinutí Tr1 na zem.

Výhodou této vazby je, že vhodným převodem (poměrem počtu závitů) lze transformovat impedanci podle vztahu  (14)

Možnost transformace impedance je důležitá pro správné výkonové impedanční přizpůsobení v koncových výkonových zesilovačích, kde zátěží je např. malá impedance reproduktoru nebo vysílací antény. Vazební transformátor má i funkci bezpečnostní, což mělo význam v elektronkových zesilovačích s velkým napájecím napětím. Také vstupní impedance zesilovače se dá přizpůsobit pomocí transformátoru impedanci zdroje zesilovaného napětí.

**Laděná vazba**

Používá se u vysokofrekvenčních zesilovačů např. v přijímačích, vysílačích atd. kde zesilují úzké kmitočtové pásmo kolem rezonančního kmitočtu f0, na který jsou naladěny rezonanční obvody v kolektorech tranzistorů. Šířka přenášeného kmitočtového pásma je určena jakostí rezonančních obvodů a jejich tlumením. Příklad zapojení dvoustupňového laděného zesilovače je na obr. 3.32. Druhý stupeň je vázán kapacitní vazbou pomocí vazebního kondenzátoru CV, výstup z druhého stupně může být vazbou induktivní (výstup 1) nebo kapacitní (výstup 2).

u1

L

T1

C

u2

L

Obr 3.32 Dvoustupňový laděný vf.zesilovač

T2

C

LV

2

1

CV

Obr 3.33 Zapojení napěťových vazeb

C1

L1

M

L2

C2

L2

CV

C1

L1

C2

Laděná vazba (obr. 3.33) pomocí tzv. pásmových propustí mezi zesilovacími stupni používá nejčastěji dvojici oboustranně laděných rezonančních obvodů, naladěných na stejný kmitočet, se stejnou jakostí obvodů Q, s napěťovou vazbou mezi nimi pomocí vzájemné indukčnosti M nebo kapacitní vazbu pomocí vazebního kondenzátoru CV. Velikost vazby mezi obvody se určuje pomocí činitele vazby ***k***.

U napěťové induktivní vazby je velikost ***k*** určena vztahem  (15)

u napěťové kapacitní vazby  (16)

Tvar přenosové charakteristiky vícestupňového zesilovače s vazbou pomocí pásmových propustí (obr.3.34) závisí na „těsnosti vazby“, která se vyjadřuje součinem ***k***.Q. Je-li ***k***.Q < 1, jedná se o vazbu volnou, tzv. **podkritickou**. Při ***k***.Q = 1 je vazba **kritická**, při ***k***.Q > 1 je vazba těsná, **nadkritická**. Těsnost vazby se volí podle účelu použití zesilovače. Největšího zesílení a úzkého přenášeného kmitočtového pásma se dosáhne vazbou kritickou (obr. 3.35 uprostřed), používanou např. v  mezifrekvenčních zesilovačích rozhlasových přijímačů s AM. Vazbou nadkritickou (obr. 3.35 vpravo), typickou prosedláním přenosové charakteristiky, se dosáhne velkého zesílení a širokého přenášeného kmitočtového pásma (používanou např. v mezifrekvenčních zesilovačích u rozhlasových přijímačů s FM a v televizních přijímačích). Pojmy AM, FM, mezifrekvenční kmitočet, budou vysvětleny ve třetím ročníku.

Obr. 3.35 Vlevo vazba podkritická, uprostřed kritická, vpravo nadkritická

f

f0

f0

B

B

AU

0 dB

- 3 dB

f0

k.Q<1

k.Q =1

k.Q>1

Obr 3.34 Dvoustupňový laděný vf. zesilovač

T1

T2

u2

u1

**Přímá (galvanická) vazba**

Mezi zesilovacími stupni nemá žádný vazební prvek (obr. 3.36). Výstup prvního stupně je přímo (vodivě, galvanicky) spojen se vstupem druhého zesilovacího stupně. Takové propojení je možné pouze tehdy, když jsou uzpůsobena stejnosměrná napětí kolektoru prvního stupně a báze druhého stupně. Tohoto přizpůsobení se dosáhne zapojením odporu RE do emitoru druhého zesilovacího stupně a vhodným úbytkem napětí UE na něm. Musí platit, že UE + UBE = UC prvního stupně.

Takovéto zapojení zesilovače zesiluje i stejnosměrné změny vstupního napětí a jeho dolní mezní kmitočet fd = 0 Hz (obr. 3.37). Nevýhodou tohoto zapojení je, že změna klidové polohy pracovního bodu prvního zesilovacího stupně např. vlivem změny teploty je v dalších stupních zesílena a proto především pracovní bod prvního stupně musí být dokonale teplotně stabilizován. Největší problémy nastávají při zesilování malých stejnosměrných změn, které jsou srovnatelné se stejnosměrnou nestabilitou – driftem. Galvanické vazby se používá v zesilovačích stejnosměrných změn např. v měřících přístrojích, v regulační technice, v televizních přijímačích (obrazový zesilovač) a především v  integrovaných obvodech.

poměr. Au

u1 = konst.

fh

f

0 dB

- 3 dB

B = fh

Obr. 3.37 Amplitudová charakteristika

Obr. 3.36 Přímá (galvanická) vazba

U1

U2

UN

RB1´

RC1

RC2

RE

UBE

UE

T1

T2

UC

RB1

0

**Rozdílový zesilovač**

1

RE

UN1

RC1

1´

T1

T2

UN2

RB2

RC2

2

2´

Obr. 3.38 Rozdílový zesilovač

I1

I2

U1

U1´

RB1

Problém s teplotní stabilizací pracovních bodů řeší **rozdílový zesilovač** (diferenciální) podle zapojení na obr. 3.38, který je základem operačních zesilovačů. Je to symetrické zapojení dvou zesilovačů se společným zpětnovazebním emitorovým odporem RE. Má dva vstupy 1, 1´ a dva výstupy 2, 2´ proti společné zemi. Má-li se jeho výstupní napětí měnit kolem nuly, vyžaduje napájení ze dvou zdrojů UN1 a UN2, dávajících dvě stejná napájecí napětí ± proti zemi. Při stejných napětích na obou jeho vstupech 1, 1´ potečou oběma tranzistory stejné proudy I1 a I2 a tím budou stejná napětí na jeho výstupech 2, 2´ a tím rozdíl napětí mezi výstupy 2, 2´ bude 0 V. Tím souhlasné změny pracovních bodů vlivem změn teploty nebo stárnutím součástek se také neprojeví.

Při malé změně napětí na jednom ze vstupů, např. zvýšení napětí U1 na vstupu 1 se T1 více otevře, proud I1 tekoucí tranzistorem T1 se zvětší, stejně jako úbytek napětí na jeho pracovním odporu RC1. Napětí na výstupu 2 poklesne. Zvětšení proudu I1 způsobí zvětšení zpětnovazebního napětí na emitorovém odporu RE, které způsobí zmenšení rozdílu napětí na přechodu B - E tranzistoru T2 a tím jeho přivření. Napětí na výstupu 2´ vzroste a tím rozdíl napětí mezi výstupy 2, 2´ se ještě zvětší a bude dvojnásobný. Rozdílový zesilovač zesiluje pouze rozdíl napětí mezi jeho vstupy (odtud jeho název). Při souhlasném sígnálu na jeho vstupech je rozdíl napětí mezi výstupy 2, 2´ rovný 0 V. Většinou se rozdílový výstupní signál nepotřebuje a použije se pouze jeden z výstupů a výstupní napětí se odebírá proti zemi(nesymetrický výstup).

Uzemněním jednoho vstupu a použitím pouze jednoho výstupu se získá zesilovač, který fázi výstupního napětí zachová (neinvertující vstup), nebo při použití druhého vstupu bude fáze výstupního napětí otočená (invertující vstup).

**Darlingtonovo zapojení tranzistorů**

Nejpoužívanější je zapojení SE na obr. 3.39. Emitor prvního tranzistoru T1 napájí bázi druhého tranzistoru T2. Proudový zesilovací činitel h21E celého zapojení je dán součinem proudových zesilovacích činitelů jednotlivých tranzistorů.

T1

T2

Obr. 3.39 Darlingtonovo zapojení

Zapojení se používá tam, kde je zapotřebí velký vstupní odpor a velké proudové zesílení. Takto zapojená dvojice tranzistorů se vyrábí i v jednou pouzdře.

**Střídavé náhradní schéma zesilovače**

Dosud jsme předpokládali nezatížený výstup zesilovače zatěžovacím odporem RZ.. Zatížením zesilovače musíme překreslit schéma zesilovače na náhradní schéma pro střídavý zesilovaný signál. V něm předpokládáme nulové hodnoty reaktancí kondenzátorů a nulový vnitřní odpor zdroje a proto nahradíme kondenzátory a napájecí zdroj zkratem. Odpor děliče RB bude potom zapojen na zem a tedy paralelně k odporu RB´. Zatěžovací odpor zesilovače RZ bude připojen paralelně k pracovnímu odporu zesilovače RC a tím se změní výsledná hodnota pracovního odporu zesilovače. Tím se změní i sklon zatěžovací přímky pracovního odporu zesilovače a ze statické zatěžovací přímky musíme proto vytvořit **zatěžovací přímku dynamickou**. Střídavé náhradní schéma zesilovače je na obr. 3.40 vpravo.

Obr 3.40 Střídavé náhradní schéma zesilovače

T

RB

RB´

RC

RZ

T

UN

RB

CV2

RB´

RC

CV1

RZ

Dynamickou zatěžovací přímku zesilovače zkonstruujeme podle obr. 3.41 tak, že nejprve určíme její směr (čárkovaná čára). Zvolíme libovolné malé napájecí napětí UN´ a máme jeden její bod na ose UCE. Potom vypočítáme z rovnice UN´ = IC . RV  (kde RV je hodnota paralelní kombinace odporů RC a RZ) hodnotu IC a tím dostaneme na ose IC druhý bod pro určení směru dynamické zatěžovací přímky. Tento směr rovnoběžně posuneme do klidového pracovního bodu zesilovače a dostaneme dynamickou zatěžovací přímku zesilovače.

Protože má větší sklon než přímka statická, dostaneme při stejné změně vstupního řídícího proudu báze IB podstatně menší velikost střídavého výstupního napětí u2. Zatížením zesilovače klesne celková hodnota pracovního odporu a tím se jeho napěťové zesílení zmenší a proudové zvětší.

UN´

UN´/RV

UN

UCE

IB

IC

A

dynamická zatěžovací přímka

Obr. 3.41 Konstrukce dynamické zatěžovací přímky

0