Měření vlastností nízkofrekvenčních zesilovačů

**1. Zadání**

A. Sestavte jednostupňový nízkofrekvenční zesilovač v zapojení SE podle následujícího schématu a nastavte pracovní bod UCEP = ..... V, ICP = ..... mA, zaznamenejte si hodnoty součástek.

Jako nf zesilovač je možno použít vlastní výrobek realizovaný v předmětu Praxe.



B. U sestaveného zesilovače změřte při Rg = ........ :

a) vstupní impedanci ⏐Zvst⏐ při kmitočtech f = 50 a 1000 Hz

b) výstupní impedanci ⏐Zvýst⏐ při kmitočtu f = 1000 Hz

c) kmitočtovou charakteristiku přenosu napětí v rozsahu 50 Hz až 1 MHz. Určete dolní fd a horní fh mezní kmitočet zesilovače.

d) určete měřením pomocí osciloskopu největší možnou amplitudu výstupního napětí pro

Rz´ = 500, 1000, 2000, 5000, 10000 a naprázdno signál bez ořezání, sestrojte statickou zatěžovací přímku a dynamickou zatěžovací přímku pro jednotlivé zatěžovací odpory a diskutujte vliv polohy dynamické zatěžovací charakteristiky na tvar výstupního napětí zesilovače.

C. Odblokujte emitorový odpor RE a proveďte všechna měření podle bodu B pro takto upravené zapojení. Diskutujte vliv zpětné vazby zavedené odporem RE na parametry zesilovače, zejména na zesílení, mezní kmitočty, vstupní a výstupní impedanci, statickou a dynamickou zatěžovací přímku.

D. Určete velikost rozptylové kapacity tranzistoru Cr.

**2. Popis měřeného předmětu**

Zde se uvede schéma měřeného zesilovače včetně hodnot jednotlivých součástek a parametrů použitého tranzistoru.

**3. Teoretický rozbor**

a) vlastností měřeného předmětu

Zesilovač je elektronické zařízení, jehož výstupní výkon signálu odevzdaný do spotřebiče je větší než výkon vstupní, potřebný k buzení zesilovače. Přitom zkreslení zpracovávaného signálu musí být co nejmenší a frekvenční charakteristika rovnoměrná.

Zesilovač lze považovat za aktivní nelineární dvojbran, tvořený zesilovacím tranzistorem, pomocnými obvody pro stabilizaci polohy pracovního bodu a zátěží na výstupních svorkách tranzistoru. Při zesilování malých signálů, kdy se pohybuje klidový pracovní bod v lineární části dynamické převodní charakteristiky, lze zesilovač pokládat za lineární dvojbran. Jeho chování lze popsat lineárními rovnicemi udávajícími vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami.

**Základní vlastnosti zesilovačů**

***Zesílení*** je poměr výstupní veličiny ke vstupní. Zesílení vyjádřené v dB se nazývá ***zisk***.

Rozeznáváme:

***Napěťové zesílení*** Au a ***napěťový zisk*** au



***Proudové zesílení*** Ai a ***proudový zisk*** ai



***Výkonové zesílení*** Ap a ***výkonový zisk*** ap



***Kmitočtová charakteristika napěťového přenosu zesilovače*** udává závislost modulu napěťového zesílení Au na kmitočtu. Na svislou osu se obvykle vynáší zisk v dB a na vodorovnou osu frekvence v logaritmických souřadnicích.

***Fázová frekvenční charakteristika*** udává závislost fázového posunu mezi výstupním a vstupním napětím na kmitočtu.

V případě jednostupňového zesilovače s odporovou zátěží je ve středním kmitočtovém pásmu napěťový zisk maximální a kmitočtově nezávislý. Fázová charakteristika vykazuje v tomto pásmu nulový fázový posun. V oblasti nízkých a vysokých kmitočtů dochází k poklesu zesílení a zvětšení fázového posunu. Na straně vysokých kmitočtů se rušivě uplatňují parazitní kapacity a na straně nízkých kmitočtů mají nepříznivý vliv vazební články RC, které jsou kmitočtově závislé. Konkrétně kondenzátory zvětšují své reaktance, a tím i úbytky na nich vytvářené. Uvažujeme-li kmitočtově nezávislý prvek a jeden článek na nízkých a vysokých kmitočtech kmitočtově závislý, pak tečny sestrojené k bokům kmitočtové charakteristiky napěťového přenosu mají sklon 20 dB/dek.

***Šířka pásma zesilovače*** B je dána rozsahem kmitočtů mezi dolním mezním kmitočtem fd a horním mezním kmitočtem fh, při nichž dochází k poklesu zisku o 3 dB. Těmto kmitočtům odpovídají fázové posuny ± 45°.

**Rozdělení zesilovačů**

A. Podle velikosti vstupního signálu dělíme zesilovače na

1. ***předzesilovače*** - mají velké napěťové zesílení a zesilují malé signály. Zesilovací prvky mají mít minimální vlastní šum
2. ***koncové zesilovače*** - zesilují vyšší úrovně signálů. Mají dodat do zátěže velký výkon, mít velkou účinnost a minimální zkreslení signálu

B. Podle kmitočtu zesilovaných signálů dělíme zesilovače na

1. ***nízkofrekvenční*** - přenáší kmitočty do 50 kHz
2. ***středofrekvenční*** - přenáší kmitočty přibližně do 400 až 500 MHz
3. ***vysokofrekvenční*** - přenáší kmitočty přibližně od 500 do 1000 MHz
4. ***mikrovlnné*** - přenáší kmitočty vyšší než 1000 MHz

C. Podle šířky přenášeného pásma na

1. ***úzkopásmové*** - kmitočtové pásmo je vzhledem ke kmitočtům uprostřed pásma úzké
2. ***širokopásmové*** - zesilují vzhledem ke středním kmitočtům velmi široká kmitočtová pásma

D. Podle druhu vazby mezi stupni dělíme zesilovače nejčastěji na

1. ***přímo vázané*** (stejnosměrné) - jejich kmitočtové pásmo není zdola omezené
2. ***s vazbou RC*** - vazbu tvoří článek složený z odporu a kapacity

E. Podle způsobu činnosti dělíme zesilovače na

1. ***jednočinné*** - v každém stupni pracuje samostatně jeden zesilovací prvek buzený jediným signálem
2. ***dvojčinné*** - používají dvou prvků zapojených v jednom stupni tak, aby se výkony sčítaly

F. Podle použití dělíme zesilovače na

1. ***zesilovače proudu*** - u nich žádáme, aby změny výstupního proudu byly co největší
2. ***zesilovače napětí*** - u nich žádáme, aby změny výstupního napětí byly co největší
3. ***zesilovače výkonu*** - u nich žádáme, aby odevzdávaný výkon ve výstupním obvodu byl větší než výkon přivedený na vstup.

G. Podle základního zapojení zesilovacího stupně dělíme zesilovače na

1. ***zesilovače se společným emitorem*** - používají se jako nf i vf zesilovače. Mají vyhovující vstupní a výstupní odpor a velké napěťové, proudové i výkonové zesílení
2. ***zesilovače se společnou bází (hradlem)*** - pracují při vysokých kmitočtech. Mají malý vstupní a velký výstupní odpor, velké napěťové zesílení, proudové zesílení je menší než jedna
3. ***zesilovače se společným kolektorem*** - mají velký vstupní a malý výstupní odpor, velké proudové a výkonové zesílení. Napěťové zesílení je menší než jedna. Nejčastěji se používají jako impedanční transformátory.

H. Podle počtu stupňů na

1. ***jednostupňové***
2. ***několikastupňové***

**Nízkofrekvenční zesilovač**

Jako nízkofrekvenční zesilovače se obvykle označují zesilovače pro pásmo akustických kmitočtů 20 Hz až 20 kHz. Podobnou technikou provedení se však k nim řadí také obrazové zesilovače a zesilovače pro měřicí techniku, které mají kmitočtové pásmo mnohem širší, často od nuly do 10 MHz i více.

Zde se budeme dále zabývat pouze jedním typem nf zesilovače a sice jednostupňovým nf zesilovačem v zapojení se společným emitorem se stabilizací pracovního bodu pomocí záporné sériové proudové zpětné vazby (obr. 1).



Obr. 1

Návrh zesilovače lze rozdělit do několika částí:

**Nastavení a stabilizace klidového pracovního bodu**

Nejprve je nutné zjistit všechny hodnoty veličin pracovního bodu UCEP, ICEP, IBP, UBEP a určit velikost napájecího napětí UN. Obvykle volíme UN = 2. UCEP.



Obr. 2

1. Podle obr. 2 platí pro kolektorový obvod rovnice podle II. Kirchhoffova zákona



stejným způsobem napíšeme rovníci pro bázový obvod



Tím jsme dostali dvě rovnice pro tři neznámé RC, RE, RB, takže musíme hodnotu jedné z nich zvolit. Obvykle volíme RE podle jednoho z následujících kriterií:

a) RE = (0,05 až 0,3).RC

b) RE tak, aby URE = (1 až 2) V

c) RE tak, aby URE = (0,1 až 0,2). UN

Zde použijeme kriterium a) s tím, že zvolíme RE = a.RC = 0,1.RC, kde a = RE/RC.

Za předpokladu IBP << ICP platí







kde 

U tranzistorových zesilovačů je významná otázka ***teplotní stabilizace pracovního bodu***. Zvýší-li se teplota tranzistoru (vlivem vzrůstu teploty okolí nebo teplem vzniklým průchodem proudu tranzistorem) vzrůstá IC i zbytkový proud ICEO a tím se posouvá pracovní bod tranzistoru. Následkem oteplení se může pracovní bod dostat do blízkosti kolena charakteristik, což způsobuje zkreslení signálu, popř. se dostane do oblasti nad dovolenou kolektorovou ztrátu (PC = UCE.IC ) a tranzistor se může zničit.

Řešení tohoto problému spočívá v použití obvodu pro teplotní stabilizaci pracovního bodu, který musí automaticky vykonávat tuto funkci: jakmile z nějakých příčin (vlivem oteplení) vzroste klidový proud kolektoru, musí se v obvodu zmenšit proud báze. Existuje velký počet stabilizačních zapojení , k nejjednodušším patří stabilizace rezistorem zapojeným v emitoru tranzistoru. Tento obvod využívá vlastností záporné sériové proudové zpětné vazby a jeho činnost je následující: jakmile vzroste kolektorový proud, zvětší se i proud emitorový. Tím se zvětší i úbytek napětí na rezistoru zapojeném v emitoru a napětí na rezistoru RB se sníží

URB = UN - UBE - UE (napětí UBE se sice sníží, ale méně, než vzroste napětí UE). Následkem poklesu napětí URB se zmenší proud báze IB = URB/RB, takže kolektorový proud nevzroste o tolik, o co vzrostl bez rezistoru RE. Stabilizace je tím lepší, čím větší je RE. Odpor RE nemůže být však příliš velký, neboť by na něm vznikl neúměrně velký úbytek napětí.

Záporná seriová proudová zpětná vazba přes odpor RE neslouží pouze k teplotní stabilizaci pracovního bodu ale má i vliv na parametry zesilovače. Tato vazba kromě jiného zvětšuje vstupní a výstupní impedanci, téměř nemění proudové zesílení, zmenšuje rozptyl zesílení při změnách parametrů tranzistoru, zvětšuje dovolenou vstupní úroveň signálu, zmenšuje zkreslení ale hlavně zmenšuje napěťové zesílení zesilovače. Z toho důvodu je nutné účinek této zpětné vazby na středních a vyšších kmitočtech eliminovat, aby zde nedocházelo k výraznému poklesu zesílení. To se provádí připojením blokovacího emitorového kondenzátoru CE paralelně k RE, s takovou kapacitou aby v tomto rozmezí kmitočtů platilo XCE → 0.

**Parametry zesilovače při zesilování střídavého signálu**

Při návrhu zesilovače a výpočtu jeho parametrů vycházíme ze zadaného napěťového zesílení Au, vypočtených hodnot součástek zapojení RB, RC, RE a určených diferenciálních parametrů h11e, h12e, h21e a h22e příslušného typu tranzistoru. Ty jsou v literatuře uváděny jen v konstrukčních katalozích, mnohdy ne všechny a jsou samozřejmě jen typové se značným rozptylem u jednotlivých kusů, proto je účelné, k dosažení porovnatelných výsledků, je změřit. Dále předpokládáme, že se tranzistor kolem nastaveného pracovního bodu chová jako lineární dvojbran a jeho charakteristiky je možné popsat soustavou lineárních hybridních rovnic a diferenciálních h-parametrů.





Pro zapojení SE platí ve středním pásmu kmitočtů dále uvedené vztahy:

Zesilovač v zapojení SE s blokovaným emitorovým odporem RE

Přenos napětí (zesílení) Au



Z toho pro Rz platí



Vstupní odpor Rvst



Výstupní odpor Rvýst



Zesilovač v zapojení s neblokovaným emitorovým odporem

Napěťový přenos Au





Vstupní odpor Rvst



pro 

Výstupní odpor Rvýst



pro

**Kmitočtové vlastnosti zesilovače**

Kmitočtové pásmo je u dnešních zesilovačů, které obsahují tranzistory s mezním kmitočtem od několika MHz do několika set MHz určeno na dolním okraji vazebními kondenzátory a na horním okraji rozptylovými kapacitami.

***Dolní mezní kmitočet zesilovače fd*** je definován jako kmitočet, na kterém nastává pokles zesílení o 3 dB proti střednímu kmitočtu přenášeného pásma.

Vazebními články, které mají vliv na přenos napětí na nízkých kmitočtech, jsou nejčastěji derivační články (obr.3).



Obr. 3

Napěťový přenos derivačního článku:



Modul napěťového přenosu



***Horní mezní kmitočet zesilovače f***h pro pokles o 3 dB se kontroluje podle vztahu



kde Cr je součet rozptylových kapacit mezi kolektorem a zemí

 Rz je paralelní kombinace RC a Rz´

Ze vztahu pro horní mezní kmitočet můžeme určit velikost rozptylové kapacity tranzistoru



**Zatěžovací charakteristiky zesilovače**

***Statická zatěžovací přímka*** v zapojení se společným emitorem vymezuje úsečku, po které se může pohybovat pracovní bod tranzistoru bez připojeného zatěžovacího rezistoru Rz´ (naprázdno). Je dána závislostí kolektorového proudu tranzistoru IC na napětí kolektor-emitor UCE, je určena velikostí napájecího napětí zesilovače a příslušnou kolektorovou odporovou sítí (obr. 4). Statická zatěžovací přímka prochází třemi důležitými body, a to klidovým pracovním bodem [UCEP,ICP] a průsečíky se souřadnými osami [0,ICK] a [UN,0], z nichž kterékoliv dva stačí k jejímu vynesení. Rovnice statické zatěžovací přímky mohou být různé podle uspořádání zesilovače. Její průběh vychází z řešení proudové smyčky v kolektorovém obvodu.

V našem případě:







Obr. 4

Z toho pro její směrnici kS platí vztah:



Pokud je k zesilovači připojena zátěž Rz´ pomocí reaktance tak, že je galvanicky oddělena, nepohybuje se pracovní bod po této statické přímce, ale po přímce jiné, která má se statickou společný pouze klidový pracovní bod. Tuto přímku nazýváme ***dynamickou zatěžovací přímkou***. Odlišný směr je dán tím, že pro střídavý signál jsou ve výstupním obvodu tranzistoru připojeny jiné odpory, než pro stejnosměrné obvodové veličiny. V našem případě platí dále uvedená náhradní schémata výstupního obvodu (obr. 5), která získáme tak, že kondenzátory a zdroj ss napětí nahradíme pro střídavý signál zkraty.



Obr. 5

Dynamická charakteristika (index D) prochází body [0, ICDK], [UCED0, 0] a [UCEP, ICP] se směrnicí kD = ICP/UCEP danou rovnicemi:

a) pro zapojení s blokovaným RE b) pro zapojení s neblokovaným RE

 

Rovnice zatěžovacích přímek jsou potom:

a) pro zapojení s blokovaným RE  b) pro zapojení s neblokovaným RE

 

nebo

 

Dynamická zatěžovací charakteristika při zátěži kapacitně vázané je vždy strmější než zatěžovací přímka statická

kD > kS

Dále platí, že čím strmější je zatěžovací přímka, tím nižší je maximálně možná dosažitelná amplituda výstupního napětí

UMmaxD < UMmaxS

Z toho vyplývá závažný důsledek. Amplitudu výstupního napětí je nutno volit podle dynamické zatěžovací přímky, nebo obráceně zvolené amplitudě je nutno přizpůsobit dynamickou zatěžovací přímku. Jinak řečeno, k zesilovači navrženému pro určitou zátěž nelze připojovat libovolné Rz´neboť zvýšená zátěž omezuje použitelnou amplitudu výstupního napětí.

b) měřicí metody

Měření na zesilovači

Nejdůležitější vlastnosti zesilovačů, tj. zesílení, frekvenční charakteristiky, vstupní a výstupní impedanci zjišťujeme u zesilovačů měřením.

Pro spolehlivé měření zesilovačů se musí dodržovat jednak všeobecné požadavky, pro některé zesilovače ještě i zvláštní podmínky. K všeobecným požadavkům patří zejména:

1. Napájecí napětí, tj. napětí vnějšího (i vnitřního) napájecího zdroje, který dodává zesilovači elektrickou energii, musí mít předepsanou hodnotu.
2. Na vstup zesilovače se připojuje budící napětí požadovaného průběhu (bývá harmonické, při zvláštních zkouškách obdélníkové) a požadované frekvence. Generátor, kterým zesilovač budíme musí mít předepsanou výstupní impedanci. Úroveň vstupního napětí zesilovače volíme s ohledem na jeho zesílení tak, aby při žádné frekvenci nebyl výstup zesilovače přebuzen (tvar výstupního signálu viditelně zkreslen).
3. Měřicí přístroje (voltmetry, osciloskopy atd.) musí mít požadovaný kmitočtový rozsah a jejich impedance nesmí mít vliv na výsledek měření.

**Měření amplitudové frekvenční charakteristiky napěťového přenosu nf zesilovače**

Zesilovač a měřicí přístroje zapojíme podle obr. 6. Vstup zesilovače se budí z generátoru harmonického střídavého napětí, jehož kmitočtový rozsah odpovídá kmitočtovému rozsahu zesilovače. Velikost jeho amplitudy volíme tak, aby pohyb pracovního bodu zesilovače nezasahoval příliš do nelineárních částí charakteristik. Samozřejmě že větší amplituda znamená vyšší přesnost měření a větší odstup od rušivého pozadí. Nevhodně vysokou amplitudu poznáme podle toho, že po připojení střídavého signálu se změní údaje stejnosměrných přístrojů, měřících klidový pracovní bod nebo podle tvarového zkreslení výstupního signálu měřeného osciloskopem. Při proměřování kmitočtové charakteristiky je nutné používat voltmetry s dostatečným kmitočtovým rozsahem ( v našich laboratořích BK 128 nebo kterýkoliv osciloskop).



Obr. 6

Vstupní napětí U1 udržujeme dále konstantní a při měření v požadovaném kmitočtovém rozsahu odečítáme U1 a U2. Napěťový přenos zesilovače v dB:



Upozornění:

Při měření nezapomeňte, že z běžného osciloskopu lze odečíst **amplitudu** napětí, kdežto voltmetry ukazují **efektivní** hodnotu. Platí zásada, že při každém „střídavém“ měření je vhodné sledovat tvar signálu osciloskopem, pokud je k dispozici. V opačném případě totiž můžeme měřit, kromě užitečného signálu šum nebo různá rušení, případně signál zkreslený. Údaj voltmetru při měření zkresleného, tj. neharmonického signálu, je chybný.

**Měření vstupní impedance nf zesilovače**

Absolutní hodnotu vstupní impedance zesilovače zjišťujeme nejčastěji jednou ze dvou metod:



Obr. 7



Obr. 8

Při sériové metodě (obr.7) předpokládáme, že vnitřní odpor generátoru G tvoří maximálně 10 % z celkové hodnoty impedance zdroje signálu U1. Měří se obvykle při 1 kHz. Na výstupu je zesilovač zatížen odporem RZ´, ke kterému je připojen střídavý elektronický voltmetr V2. Odpor Rg volíme Rg = 0,1.Zvst (Zvst je předpokládaná vstupní impedance). Na vstupu nastavíme vhodné vstupní napětí U1, které kontrolujeme voltmetrem V1. Změří se i napětí na rezistoru Rg (U) jiným voltmetrem a absolutní hodnotu vstupní impedance vypočítáme ze vztahu:



Jestliže by použití V1 mělo vliv na měření, zjistíme nejprve hodnotu U1 při normální hodnotě U2 bez připojení rezistoru Rg.

Při metodě poloviční výchylky (obr.8) při zapnutém spínači S (generátor je připojen přímo na zesilovač) nastavíme vstupní napětí U1 tak, aby na výstupu bylo napětí U2. Potom rozpojíme spínač S, tím zapojíme do série proměnný odpor R (řádově stejné velikosti jako předpokládaná Zvst).

Pro vybuzení zesilovače na výstupní napětí U2 bude potřebné vstupní napětí U1, ale napětí generátoru bude:



Z toho pro absolutní hodnotu vstupní impedance:



Pokud se nám regulací odporu Rg podaří dosáhnout Ug = 2.U1, potom:



**Měření výstupní impedance nf zesilovačů**

Výstupní impedance nízkofrekvenčních zesilovačů je vnitřní impedance měřená na výstupních svorkách zesilovače při normálních provozních podmínkách. Základní zapojení pro měření je na obr. 9.

Při připojené zátěži nastavíme normální provozní podmínky. Změříme napětí U2 a po odpojení rezistoru RZ´změříme napětí naprázdno U20. Podle náhradního zapojení (obr.9) platí:





Obr. 9

**Měření největší možné amplitudy výstupního signálu pomocí osciloskopu**

Zesilovač připojíme k osciloskopu tak, že v jednom kanálu budeme snímat průběh vstupního napětí u1 a ve druhém kanálu průběh výstupního napětí u2 zesilovače. Při zvyšování úrovně u1 sledujeme průběh u2 až do okamžiku, kdy začne docházet k jeho viditelnému zkreslení (ořezání). Zde se odečte z osciloskopu velikost amplitudy výstupního napětí.