* 1. **Výkonové zesilovače**
     1. **Třídy zesilovačů**

Třídu zesilovače určuje poloha jeho klidového pracovního bodu na vstupní a převodní charakteristice a na zatěžovací přímce.

* + - 1. **Třída A**

Klidový pracovní bod je ve třídě A nastaven vhodnou velikostí proudu báze IB tak, že se může vlivem vstupního zesilovaného signálu pohybovat po lineární části vstupní i převodní charakteristiky i po zatěžovací přímce bez omezení na obě strany. Tím jsou bez zkreslení zesíleny obě půlvlny vstupního napětí u1. Při přebuzení zesilovače je pohyb pracovního bodu omezen body B (tranzistor se zavře) a S (tranzistor je v saturaci), zesilovač začne limitovat. Pro největší rozkmit výstupního napětí se klidová poloha pracovního bodu nastavuje doprostřed zatěžovací přímky (viz obr. 3.9). Je-li pracovní bod nastaven více k bodu B, tedy pro menší proudy IC, bude mít zesilovač vlivem zakřivení vstupní charakteristiky menší zesílení (zmenší se hodnota h21e) a menší šum. Naopak jeho posun k bodu S tyto hodnoty zvýší.

Nevýhodou A třídy je malá energetická účinnost zesilovače η. Zesilovač v A třídě bez vybuzení i při vybuzení odebírá z napájecího zdroje stále stejně velký proud. Tím bez vybuzení je účinnost η = 0 % a při maximálním vybuzení je největší a dosahuje max. 50 %. Proto se zesilovačů v A třídě používá především jako zesilovačů napětí a ne výkonu.

Výhodou A třídy je malé nelineární zkreslení, protože pracovní bod se pohybuje v lineárních oblastech vstupní i převodní charakteristiky a proto v A třídě pracuje většina napěťových zesilovačů.

* + - 1. **Třída B**

Klidový pracovní bod je ve třídě B (obr. 3.42) nastaven velikostí předpětí UBE = UD do bodu B, který odpovídá výstupní charakteristice při IB = 0 A. Tranzistor je v klidové poloze pracovního bodu zavřený a zesilovač z napájecího zdroje odebírá velmi malý proud. Při kladné půlvlně vstupního zesilovaného signálu se NPN tranzistor otevírá a pracovní bod se pohybuje po zatěžovací přímce směrem k bodu S. Odběr proudu z napájecího zdroje odpovídajícím způsobem vzroste. Při záporné půlvlně vstupního zesilovaného signálu zůstane NPN tranzistor zavřený a tím zesilovač v B třídě zesílí pouze jednu půlvlnu vstupního zesilovaného signálu. Má proto veliké nelineární zkreslení, ale jeho účinnost η při maximálním vybuzení je veliká. Pro velkou účinnost se zesilovačů s pracovním bodem nastaveným v B třídě používá ve dvojčinných zesilovačích, napájených z baterií a u zesilovačů velikých výkonů.

B

IB

UCE

IC

A

IB = 0 A

UN

B

UBE

u2

u1

Obr. 3.42 Pracovní bod v B třídě

IB

0

UD

S

* + - 1. **Třída AB**

Obr. 3.43 Pracovní bod v AB třídě

IB

UCE

IC

A

IB = 0 A

UN

B

UBE

u1

AB

B

AB

u2

IB

0

UD

Klidový pracovní bod je ve třídě AB (obr. 3.43 ) nastaven velikostí předpětí UBE > UD do bodu AB za koleno vstupní charakteristiky. Tím se omezí nelineární zkreslení zesilované kladné půlvlny (u NPN tranzistoru) při malých signálech, které nastává v B třídě vlivem zakřivení vstupní a převodní charakteristiky. Při malých signálech se pracovní bod může pohybovat na obě strany jako ve třídě A, při větších signálech s velkou účinností jako ve třídě B. AB třída je kompromis mezi třídou A a B. V AB třídě pracuje většina výkonových zesilovačů (ale ve dvojčinném zapojení pro zesílení obou půlvln).

* + - 1. **Třída C**

Její grafické znázornění je na obr. 3.44. Klidové předpětí přechodu B-E UBE = 0 V nebo může být i záporné (u NPN tranzistoru). Tranzistor je bez vybuzení zavřený. Přechod B-E se otevírá pouze při kladných špičkách zesilovaného signálu a tím je nelineární zkreslení veliké. Účinnost η je ze všech tříd největší. Třídy C se používá ve výkonových vysokofrekvenčních zesilovačích ve vysílačích, které po dobu těchto špiček dodávají energii do rezonančních obvodů. Jsou naladěny na zesilovaný kmitočet a potlačí vyšší harmonické kmitočty a tím nelineární zkreslení. Veliká účinnost je zde při zesilování výkonů až stovek kW potřebná.

Obr. 3.44 Pracovní bod v C třídě

IB

UCE

IC

IB = 0 A

B

UBE

u2

u1

B

C

C

IB

0

UD

* + - 1. **Speciální třídy**

Mimo třídy A, B, AB, a C existují speciální třídy AA, D, G a H.

Třída AA nebo také A+ v zesilovačích Technics mění napájecí napětí zesilovače v A třídě pomocí zesilovače v B třídě. Tím jsou zachovány dobré vlastnosti třídy A při účinnosti třídy B.

Třída D (Sony) zesilovaný signál moduluje PŠM a impulsy zesiluje zesilovačem ve třídě C a po zesílení je převede zpět na analogový signál.

Další speciální třídy jsou třída G (zesiluje odděleně slabé a silné signály) a H (mění automaticky velikost napájecího napětí). Obě třídy zlepšují energetickou účinnost, komplikují ale zapojení zesilovače a vyvolávají přechodová zkreslení.

* + 1. **Zapojení výkonových zesilovačů**

Jejich úkolem je dodat do zátěže co největší výkon. To se dosáhne při optimálním výkonovém impedančním přizpůsobení a protože zátěž (reproduktor, anténa) má obvykle impedanci malou, musí být malá i výstupní impedance zesilovače. Nejmenší výstupní impedanci má zapojení tranzistoru SC – emitorový sledovač a proto se často používá.

* + - 1. **Jednočinný koncový zesilovač**

RB

RE

RB´

CV

RZ

Obr 3.41 Jednočinný zesilovač

Tr

T

Největší výkonové zesílení má zapojení tranzistoru SE. Jeho poměrně velká výstupní impedance se přizpůsobí malé impedanci zátěže pomocí výstupního transformátoru podle rovnice 14.

Zapojení jednočinného koncového výkonového zesilovače s výstupním transformátorem Tr je na obr. 3.41. Pro toto zapojení platí vše, co je uvedeno v kapitole 3.9.2 o transformátorové vazbě.

UN

Zesilovač musí mít nastaven pracovní bod v A třídě, tedy s malou účinností. Pro zesilování větších výkonů se používají zesilovače dvojčinné.

* + - 1. **Dvojčinný zesilovač s transformátory**

u1

RB

RB´

T2

RZ

Obr 3.42 Dvojčinný zesilovač

Tr1

T1

Tr2

I2

I1

Ve dvojčinném zapojení zesilovače s transformátory jsou použity dva tranzistory stejných vlastností (párované) v zapojení SE které se ve funkci střídají a proto jejich budící napětí musí být v protifázi. Ta se získají budícím transformátorem Tr1 (obdobně jako v transformátoru ve dvoucestném dvoufázovém usměrňovači).

UN

Zapojení dvojčinného zesilovače s  transformátorem budícím Tr1 a výstupním Tr2 je na obr. 3.42. Pracovní bod tranzistorů může být nastaven pomocí odporového děliče RB, RB´ ve třídě A, B nebo nejčastěji ve třídě AB.

V A třídě bez signálu tečou oběma tranzistory stejně velké stejnosměrné proudy I1 a I2, a tím se jejich magnetizační účinek vyruší a jádro není stejnosměrně sycené jako v jednočinném zapojení. Vlivem budících signálů se jeden tranzistor, např. T1 více otevře a současně se opačnou půlvlnou tranzistor T2 přivře. Výstupní proud I1 se zvětší, I2 zmenší, výsledný primární poteče nahoru a do sekundárního vinutí se indukuje např. kladná půlvlna zesíleného signálu. Při opačných půlvlnách budících signálů je děj opačný. Ve třídě A se dvojčinným zesilovačem dosáhne dvojnásobného výkonu než v jednočinném zapojení, ale s malou účinností třídy A.

Ve třídě B jsou bez budících signálů oba tranzistory zavřené a zesilovač ze zdroje odebírá velmi malý proud. Při vybuzení se střídavě jeden tranzistor otevře a druhý zůstane zavřený a naopak. Dosáhne se výkonu několikanásobně většího než v jednočinném zapojení při velké účinnosti třídy B. Protože se nedaří dosáhnout toho, aby se současně jeden tranzistor zavřel a druhý otevřel, dochází při průchodu signálu nulou k tzv. přechodovému zkreslení, které se nejvíce projevuje při zesilování malých signálů. Při malých signálech dále vzniká velké nelineární zkreslení vlivem zakřivení vstupní charakteristiky tranzistoru. Proto se pracovní bod většiny výkonových zesilovačů nastavuje do lineární části vstupní charakteristiky do třídy AB a tím se uvedená zkreslení malých signálů potlačí.

Transformátory umožňují provést impedanční přizpůsobení na vstupu i výstupu zesilovače, ale jsou to součástky velké a drahé. Budící transformátor Tr1 se dá odstranit použitím invertoru (obr. 3.26). Také výstupní transformátor se dá nahradit vhodným zapojením.

* + - 1. **Kvazikomplementární zapojení dvojčinného zesilovače**

Kvazi = skoro, jako, jakoby. Komplementární = doplňkový. Je to zapojení bez transformátorů. Používá dvojici párovaných tranzistorů stejné vodivosti jako v zapojení s transformátory. Dvě stejně velká budící napětí v protifázi u1 a u1´ získáme invertorem.

Zapojení na obr. 3.43 používá dva napájecí zdroje UN1 a UN2, protože výstupní signál se mění kolem nuly. Tranzistor T1 pracuje v zapojení SC, tranzistor T2 v SE. Proud zátěží teče střídavě jedním a druhým směrem. Použití dvou zdrojů je při napájení z baterií nevýhodné a proto se používá zapojení podle obr. 3.44 s jedním napájecím zdrojem o větším napětí a zátěž je připojena přes kondenzátor C, který se v době, kdy vede tranzistor T1 nabije na polovinu napájecího napětí a v době, kdy je T1 zavřený se chová jako zdroj pro T2. Kapacita tohoto kondenzátoru pro zesilování nízkých kmitočtů musí být veliká (mF). Pracovní bod bývá nejčastěji nastaven v AB třídě.

Obr 3.44 Zapojení s jedním zdrojem

u1

UN1+UN2

T2

u1´

T1

RZ

C

Obr 3.43 Zapojení se dvěma zdroji

u1

UN1

T2

RZ

UN2

u1´

T1

i2

i2´

* + - 1. **Komplementární zapojení dvojčinného zesilovače**

i2

i2´

Obr 3.46 Zapojení s jedním zdrojem

UN1+UN2

T2

T1

RZ

C

u1

Obr 3.45 Zapojení se dvěma zdroji

UN1

T2

RZ

UN2

T1

u1

Je nakresleno na obr. 3.45 a 3.46. Začalo se používat v době, kdy výrobci začali dodávat na trh dvojice výkonových tranzistorů stejných vlastností, ale opačné vodivosti, tzv. komplementární dvojice. Výkonové křemíkové tranzistory PNP se vyrábějí obtížněji než NPN.

Budící signál pro oba tranzistory má stejnou polaritu, kladná půlvlna u1 otevírá tranzistor T1 s vodivostí NPN a záporná půlvlna otevírá T2 s vodivostí PNP. Oba tranzistory pracují v zapojení SC (tím má zesilovač malý výstupní odpor) a v činnosti se střídají. Stejně jako v zesilovači v kvazikomplementárním zapojení může být i v tomto zapojení použit pouze jeden napájecí zdroj. Na obr. 3.46 je pracovní bod zesilovače nastaven ve třídě AB a úbytku napětí na diodách je využito k potřebnému posunutí pracovních bodů tranzistorů.

* + - 1. **Můstkové zapojení zesilovačů**

Zapojení můstkových zesilovačů je na obr. 3.47. Na levém schématu je zapojení kvazikomplementární, na pravém komplementární. U obou zapojení musí mít budící signály pro jednotlivé tranzistory takovou fázi, aby byly otevřeny současně dva protilehlé tranzistory a druhé dva byly zavřené a naopak. Proud zátěží potom teče střídavě jedním a druhým směrem.

Výhodou můstkového zapojení je, že vystačíme s jedním napájecím zdrojem a zátěž se nemusí připojovat přes kondenzátor. Také dosažitelný výkon můstkového zesilovače je velký. Dají se použít i integrované koncové zesilovače zapojené do můstku. V radiomagnetofonu Condor to jsou použity dva integrované zesilovače MBA 810, které mají koncové zesilovače v kvaziparalelním zapojení. Samotný IO dává výkon max. 5 W, dva tyto obvody v můstkovém zapojení dávají dohromady výkon 20 W.

Obr. 3.47 Můstková zapojení zesilovače

* + - 1. **Integrované nf. výkonové zesilovače**

V předchozí kapitole byl již zmíněn integrovaný obvod MBA 810. Tento nf. výkonový zesilovač se vyrábí od roku 1975 a je to monolitický IO pro nf. zesilovače s výkonem do 5 W. Vyznačuje se vysokou účinností (při max. výkonu až 60 %), vysokým vstupním odporem, malým vlastním šumem, malým nelineárním zkreslením a rozsahem napájecího napětí 6 až 20 V. Jeho koncový stupeň je v kvazikomplementárním zapojení. Modernější IO MDA 2010 a 2020 dávají výkon až 18 W a 25 W. Také jejích koncové stupně jsou v kvazikomplementárním zapojení.

V současné době je na trhu ohromné množství integrovaných nf. výkonových zesilovačů od různých výrobců, v jejichž koncových stupních se používají můstková zapojení a které dávají výkony desítek W. Počet vnějších pasivních součástek je např. v obvodu TDA 1516 BQ zredukován na vstupní oddělovací kondenzátor. Všechny ostatní pasivní součástky jsou integrovány. Obvod má nastaven i konstantní velikost zesílení 20 dB (10 x). Také korekční zesilovače a předzesilovače jsou dnes integrované.

* 1. **Tranzistory řízené polem**

U tranzistorů řízených polem je **velikost výstupního proudu řízena velikostí vstupního napětí** (podobně jako u elektronek). Řídící napětí vytvoří elektrické pole a odtud jejich název **F**ield **E**ffect **T**ransistor - **FET**. Protože FETy používají k vedení proudu nosiče náboje pouze jedné polarity, nazývají se též **unipolární tranzistory**. Princip činnosti byl znám od roku 1928, ale jeho praktické provedení uskutečnil až v roce 1952 jeden z vynálezců bipolárního tranzistoru Dr. Shockley.

Tranzistory FET mají vodivý kanál (typu P nebo N) mezi elektrodami S (source – zdroj, obdoba emitoru E) a D (drain – odtok, obdoba kolektoru C), který je od řídící elektrody G (gate, brána, mřížka) oddělen u JFETu závěrně polarizovaným přechodem P-N, u MOSFETu vrstvičkou isolantu. Teoreticky jde zaměnit C za E (u některých tranzistorů jsou ochranné diody a záměna je potom nemožná).

* + 1. **Rozdělení tranzistorů FET**
       1. **Tranzistory JFET**

C

E

G

N - kanál

N - kanál

P - kanál

P - kanál

N - kanál

P - kanál

JFET

FET

s indukovaným kanálem

s vodivým kanálem

MOSFET

C

E

G

C

E

G

C

E

G

C

E

G

C

E

G

Obr. 3.48 Rozdělení tranzistorů FET a jejich schématické značky

Princip tranzistoru JFET (**J**unction FET) je na obr. 3.49. Má vodivý kanál typu N (tečková oblast) mezi elektrodami C a E (budeme používat stejné označení jako u bipolárních tranzistorů, protože funkce těchto elektrod je obdobná). Pod řídící elektrodou G je vytvořena malá oblast opačné vodivosti než má kanál, tedy oblast s vodivostí P (šrafována). Na styku vrstev N a P se vytvoří tzv. vyprázdněná oblast (bílá) se šířkou ***x***, kde nejsou žádné volné nosiče náboje a tato oblast se chová jako isolant. Tím je řídící elektroda G oddělena od vodivého kanálu. Bez řídícího napětí UGE je šířka vyprázdněné oblasti ***x*** nejmenší, šířka vodivého kanálu ***d***nejširší, vodivost kanálu největší a tím kanálem při určité velikosti UCE poteče největší výstupní proud IC. Tomu odpovídá i poloha výstupní charakteristiky při UGE = 0 V na obr. 3.50.

Zvyšováním napětí UGE v závěrném směru se šířka vyprázdněné oblasti ***x*** zvětší, šíře vodivého kanálu ***d*** se zmenší, odpor kanálu vzroste a výstupní proud IC se zmenší. Dalším zvyšováním řídícího napětí UGE se při určité velikosti UGE kanál úplně uzavře a proud IC přestane téci.

V odporové oblasti, vyznačené ve výstupních charakteristikách čárkovanou čarou, se FET chová jako proměnný odpor. Za touto čarou další zvyšování napětí UCE nezpůsobí zvětšení proudu kanálem IC, protože FET je již naplno otevřen (je v saturaci) a výstupní charakteristiky jsou přímky.

* + - 1. **Tranzistory MOSFET**

IC

P

kanál N

UCE

D = C

S = E

G

UGE

RC

*d*

*x*

Obr. 3.49 Shockleyho model JFETu

IC

oblast odporová

oblast saturační

UGE = 0 V

UGE = - 2 V

UGE = - 4 V

UGE = - 6 V

UGE = - 8 V

UCE

Obr. 3.50 Výstupní charakteristiky JFETu

0

U tranzistorů MOSFET (M - metal, O – oxid, S – semiconduktor = polovodič) je řídící elektroda G od vodivého kanálu oddělena tenkou vrstvičkou isolantu, nejčastěji vrstvičkou oxidu křemičitého SiO2 s tloušťkou cca 0,1 μm. Základní destička se nazývá substrát. Ten má tloušťku cca 0,3 mm a je propojen s emitorem, někdy je i vyveden. Jsou dva druhy MOSFETů a to s indukovaným nebo s vodivým kanálem.

**a) MOSFET s indukovaným kanálem**

UGE = 11 V

oblast odporová

oblast saturační

IC

UGE = 9 V

UGE = 7 V

UGE = 5 V

UGE = 3 V

UCE

Obr. 3.52 Výstupní charakteristiky MOSFETu s indukovaným kanálem

UGE

UCE

E

G

substrát P

C

N

N

Obr. 3.51 Princip MOSFETu

s indukovaným kanálem

RC

IC

SiO2

0

Princip tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem je nakreslen na obr. 3.51 a jeho výstupní charakteristiky na obr. 3.52. V substrátu s vodivostí P jsou vytvořeny dvě malé, velmi silně dotované oblasti s vodivostí N (vzdálenost mezi nimi je menší než 1 μm) a z nich je hliníkovou elektrodou vyveden emitor E a kolektor C. Řídící hliníková elektroda G je oddělena od kanálu tenkou vrstvičkou kysličníku křemičitého SiO2 (šrafované oblasti). Bez napětí UGE není mezi kolektorem C a emitorem E vytvořen vodivý kanál a tranzistor je uzavřen. Přivedením dostatečně velkého kladného napětí UGE se ze substrátu „přitáhnou“ volné minoritní elektrony – dojde k „naindukování“ kanálu a tranzistorem začne protékat proud IC podle výstupních charakteristik na obr. 3.52.

Stejně jako tranzistor JFET i MOSFET má ve výstupních charakteristikách oblast odporovou a saturační.

**b) MOSFET s vodivým kanálem**

Obr. 3.53 Princip MOSFETu

s vodivým kanálem

UGE

UCE

E

substrát P

C

N

RC

IC

UGE = + 4 V

oblast odporová

oblast saturační

IC

UGE = + 2 V

UGE = 0 V

UGE = - 2 V

UGE = - 4 V

UCE

Obr. 3.54 Výstupní charakteristiky MOSFETu s vodivým kanálem

obohacený

ochuzený

G

N

SiO2

0

Princip uspořádání tranzistoru MOSFET s vodivým (trvalým) kanálem je na obr. 3.53. Mezi dvěma silně dotovanými oblastmi s vodivostí N je při výrobě vytvořena úzká oblast N s menší dotací – vodivý kanál. I při odpojené řídící elektrodě G a tím při předpětí UGE = 0 V poteče kanálem mezi C a E proud IC, jak je vidět z tvaru výstupních charakteristik na obr. 3.54. Přivedením kladného předpětí UGE se šířka vodivého kanálu indukcí zvětší (obdobně jako u tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem), odpor kanálu se zmenší a proud IC vzroste. Tranzistor pracuje v tzv. obohaceném módu (režimu). Přivedením záporného předpětí UGE se z vodivého kanálu elektrony vypudí, tím se jeho odpor zvětší a proud IC se zmenší. Tranzistor pracuje v tzv. ochuzeném módu. Tento typ vyráběla Tesla pod označením KF 520 a KF521.

* + 1. **Vlastnosti tranzistorů FET**

Princip řízení je stejný jako u elektronek. Velikost výstupního proudu je řízena velikostí vstupního napětí.

* + - 1. **Výhody tranzistorů FET**

**Vstupní odpor:** Řídící elektroda G je od vodivého kanálu u tranzistorů JFET oddělena závěrně polarizovaným přechodem P-N a u tranzistorů MOSFET dokonce odisolována tenkou vrstvou isolantu. Proto mají tranzistory FET **ohromný vstupní odpor** a tím nezatěžují zdroj zesilovaného signálu. U JFETů dosahuje hodnota vstupního odporu až 109 Ω, u MOSFETů až 1015 Ω. Pro velký vstupní odpor se používají např. na vstupech zesilovačů ve voltmetrech a osciloskopech.

**Strmost:** U tranzistorů FET se udává **strmost S**. Je to poměr změny výstupního proudu ΔIC vyvolaný změnou vstupního napětí ΔUGE.  [mA/V] Její velikost určuje sklon vstupní charakteristiky. Dosahuje hodnot jednotek až desítek mA/V.

**Vlastní šum:** Především tranzistory JFET se vyznačují malým vlastním šumem a proto se zapojují na začátek zesilovacího řetězce.

**Harmonické zkreslení:** Způsobují malé harmonické zkreslení. Vstupní charakteristika má kvadratický průběh a proto vzniká pouze 2. harmonická. Výstupní charakteristiky v oblasti nasycení jsou přímky a tím nedochází ke vzniku vyšších harmonických kmitočtů, k intermodulačnímu zkreslení a křížové modulaci. Proto se používají na vstupech přijímačů.

**Odpor v sepnutém stavu:** Mají malý odpor v sepnutém stavu (jednotky Ω) a proto se používají jako spínače. Při paralelním propojení tranzistorových struktur v IO mohou kolektorové proudy dosahovat desítek A a odpor v sepnutém stavu setiny Ω.

**Oddělení vstupu a výstupu:** Mají dokonale oddělen výstup od vstupu a proto např. v superhetech zabraňují zpětnému vyzařování signálu oscilátoru do antény.

**Teplotní závislost IC:** S rostoucí teplotou klesá u unipolárních tranzistorů strmost vstupní charakteristiky a zahříváním tranzistoru proud IC klesá (na rozdíl od bipolárních tranzistorů). Existuje hodnota IC, jejíž velikost se nemění při změnách teploty. (U tranzistoru KF520 cca 1,6 mA).

**Vstupní kapacita:** Především u tranzistorů MOSFET je malá kapacita CGC, tím je malá i vstupní kapacita a proto zesilují do vysokých kmitočtů (až 109 Hz). Pro ještě vyšší kmitočty (až 1011 Hz) se používají tranzistory na bázi arzenidu galia.

**Příkon:** Mají malý příkon a tím jsou vhodné pro výrobu IO. Ty dnes obsahují desítky milionů tranzistorů. Spočítejte odběr proudu z napájecího zdroje IO s 20 milióny tranzistorů a proudem IC jedním tranzistorem pouze 0,1 mA!

* + - 1. **Nevýhody tranzistorů FET**

**Rozptyl parametrů:** Tranzistory FET mají značný rozptyl parametrů jednoho typu, které se navíc mění s časem (stárnutí).

**Průraz vstupní elektrody:** Vlivem vysokého vstupního odporu dochází u tranzistorů FET ke snadnému průrazu řídící elektrody a tím k jeho zničení. Proto se tranzistory a IO s FETy prodávají se zkratovanými vývody, které se mají odstranit až po připájení součástky.

**Napěťové zesílení:** Tranzistory FET mají malé napěťové zesílení v zapojení SE (v rozmezí 3 až max. 5).

* + 1. **Zesilovače s tranzistory FET.**

Používá se nejvíce zapojení SE. Také v zesilovačích s tranzistory FET se musí nastavit klidový pracovní bod. Na rozdíl od zesilovačů s bipolárními tranzistory se nenastavuje velikostí vstupního proudu, ale **předpětím UGE**. Velikost tohoto předpětí závisí na typu tranzistoru FET (u MOSFETu s vodivým kanálem se nastavovat nemusí). Potřebné předpětí UGE se dá získat pomocí dalšího zdroje (má opačnou polaritu než UCE) nebo se získává obdobně jako v elektronkových zesilovačích pomocí odporu RE a zapojením tzv. mřížkového (svodového) odporu RG s velkou hodnotou (řádově MΩ až stovky MΩ).

* + - 1. **Zesilovače s tranzistory JFET**

UN

RE

CV2

CV1

u2

RG

RC

u1

Obr. 3.55 Zesilovač s tranzistorem JFET

UE

U unipolárních tranzistorů se klidová poloha pracovního bodu zesilovače nastavuje také doprostřed statické zatěžovací přímky pracovního odporu RC vhodnou velikostí předpětí UGE. Toto předpětí se získá na odporu v emitoru RE. Průtokem výstupního proudu IC dojde na odporu v emitoru RE k stejnosměrnému úbytku napětí UE. O tento úbytek UE je řídící mřížka G vzhledem k napětí na emitoru E zápornější. Stejnosměrné propojení G a E obstarává svodový odpor RG s hodnotou až 100 MΩ (aby se zbytečně nezmenšovala hodnota vstupního odporu zesilovače).

IC

UGE = 0 V

UGE = - 2 V

UGE = - 3 V

UGE = - 4 V

UGE = - 5 V

UCE

Obr. 3.56 Vstupní a výstupní charakteristiky JFETu a princip jeho zesílení

UGE [V]

u2

-4

-3

0

UN

u1

-2

UGE = - 1 V

A

A

Princip zesílení zesilovače s tranzistorem JFET je obdobný jako zesilovače s tranzistorem bipolárním. Rozdíl je v řídící veličině. Tou je u unipolárních tranzistorů napětí UGE mezi řídící mřížkou G a emitorem E. Změnou tohoto napětí UGE vlivem vstupního zesilovaného signálu u1 se mění klidová poloha pracovního bodu zesilovače po vstupní charakteristice i po statické zatěžovací přímce. Změna výstupního proudu IC vyvolá na pracovním odporu zesilovače RC změnu úbytku napětí a tím změnu úbytku napětí na tranzistoru UCE a tato změna UCE se přenese na výstup přes vazební kondenzátor CV2 jako zesílené výstupní napětí u2 (obdobně jako u zesilovače s bipolárním tranzistorem).

Při zatíženém výstupu se hodnota pracovního odporu zesilovače zmenší na paralelní kombinaci RC//RZ a pracovní bod zesilovače se bude pohybovat po dynamické zatěžovací přímce (obdobně jako u zesilovače s bipolárním tranzistorem). Konstrukce dynamické zatěžovací přímky je stejná jako u zesilovače s bipolárním tranzistorem. Zatížený zesilovač bude mít menší napěťové zesílení (obdobně jako u zesilovače s bipolárním tranzistorem).

* + - 1. **Zesilovače s tranzistory MOSFET s indukovaným kanálem**

Obr. 3.57 Zesilovač s tranzistorem MOSFET

s indukovaným kanálem

UN

RE

CV2

CV1

u2

RG´

RC

u1

RG

CE

Zapojení zesilovače s tranzistorem MOSFET s indukovaným kanálem je na obr. 3.57. Princip zesílení je znázorněn pomocí vstupní charakteristiky a výstupních charakteristik na obr. 3.58. Kladné klidové předpětí UGE je nastaveno odporovým děličem RG, RG´. Odpor v emitoru RE je blokován kondenzátorem CE proto, aby nevznikala nežádoucí střídavá záporná zpětná vazba.

UCE

Obr. 3.58 Vstupní a výstupní charakteristiky MOSFETu s indukovaným kanálem

IC

UGE = 9 V

UGE = 7 V

UGE = 6 V

UGE = 5 V

UGE = 4 V

UGE [V]

u2

7

6

0

UN

5

UGE = 8 V

A

u1

A

* + - 1. **Zesilovače s tranzistory MOSFET s vodivým kanálem**

Obr. 3.59 Zesilovač s tranzistorem MOSFET

s vodivým kanálem

UN

RE

CV2

CV1

u2

RG´

RC

u1

RG

CE

Zapojení zesilovače s tranzistorem MOSFET s vodivým kanálem je na obr. 3.59. Tento zesilovač může pracovat bez předpětí UGE nebo toto předpětí při kladné polaritě určuje dělič RG, RG´. Při záporném předpětí se dá použít stejné zapojení jako na obr. 3.55 s tranzistorem JFET.

Tranzistor MOSFET má jinou vstupní (převodní) charakteristiku i charakteristiky výstupní než mají předchozí typy unipolárních tranzistorů. Princip zesílení pomocí charakteristik je znázorněn na obr. 3.60.

Obr. 3.60 Vstupní a výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem

IC

UGE = 6 V

UGE = 2 V

UGE = 0 V

UGE = - 2 V

UGE = - 4 V

UGE [V]

u2

2

0

0

UN

u1

-2

UGE = 4 V

A

A

IC

UCE

* + - 1. **Ochrana vstupů zesilovačů s tranzistory FET**

Vstupy zesilovačů s tranzistory FET se musí chránit proti přepětí např. vlivem statické elektřtiny. U tranzistorů JFET se používá omezovač amplitudy tvořený pracovním odporem a dvěma antiparalelně zapojenými křemíkovými diodami (pro vyšší kmitočty hrotovými). Takto zapojený omezovač amplitudy omezí hodnotu napětí na vstupu zesilovače na hodnotu difusního napětí použitých diod. U tranzistoru MOSFET by takto zapojené diody zmenšovaly vstupní odpor zesilovače a proto se používá omezí doutnavkou. Ta má zápalné napětí desítky volt a zhasnutá má téměř nekonečný odpor. Maximální dovolená hodnota napětí mezi řídící mřížkou G a emitorem E bývá ± 70 V. Zapojení omezovačů amplitudy je na obr. 3.61.

R

U1

D1

D2

U2

R

U1

D

U2

Obr. 3.61 Omezovače amplitudy na vstupu zesilovačů s tranzistory FET

* + 1. **Obvody CMOS**

Nevýhodou MOSFETů je špatné impedanční přizpůsobení vzhledem k připojeným obvodům. Proto se do kolektoru jednoho tranzistoru (budícího) zapojuje druhý tranzistor (zatěžovací). Zatěžovací tranzistor má značný odpor, který není závislý na napětí. Touto tzv. komplementární technologií se dosáhne

- extrémně malý klidový ztrátový výkon

UN

U1

U2

Obr. 3.62 Technologie CMOS

- vyšší zabezpečení proti poruchám

- kratší spínací časy

- použitelnost v širokém rozsahu napětí

- přímá slučitelnost s bipolárními zapojení tranzistorů, přitom lze dosáhnou toho, že napájecí napětí je velmi malé (cca 3 V)

Největší použítí má technologie CMOS ve spínacích tranzistorech v číslicových obvodech.

* 1. **Operační zesilovače**

Název operační zesilovače (dále OZ) získaly v době jejich použití v analogových počítačích (kolem r. 1960), kde sloužily k realizaci matematických operací. Tehdy představoval OZ zapojení několika elektronek a mnoha dalších diskrétních součástek. Moderní OZ je monolitický IO malých rozměrů.

U2

Obr. 3.63 Princip zapojení OZ

UN1

Unein

UN2

U1

3

2

6

5

7

4

Uin

Princip zapojení nejběžnějšího typu OZ je na obr. 3.63. Má dva vstupy a to **–** (2) **invertující** a **+** (3) **neinvertující**. Vyžaduje **symetrické napájení** ze dvou napájecích zdrojů. Běžné hodnoty napájecích napětí jsou ± 12 V nebo ±15 V. Tento typ OZ **zesiluje rozdíl napětí** mezi vstupem neinvertujícím (+) a vstupem invertujícím (-). Proto se má při souhlasných napětích na obou vstupech výstupní napětí U2 rovnat nule.

* + 1. **Vlastnosti OZ**

OZ se svými vlastnostmi blíží vlastnostem ideálního zesilovače. Ideální zesilovač by měl mít

- nekonečně velké zesílení

- nekonečně velký vstupní odpor

- nulový výstupní odpor

- nekonečně široké zesilované kmitočtové pásmo

- nulový vlastní šum a zkreslení

Skutečný OZ se tento vlastnostem blíží tím, že

- napěťové zesílení dosahuje hodnot 104 ÷ 107

- vstupní odpor (při použití tranzistoru FET na vstupu OZ) dosahuje hodnot až 1014 Ω

- výstupní odpor je malý o hodnotách desítky Ω

- kmitočtový rozsah sahá od zesilování stejnosměrných změn napětí až do desítek MHz

- vlastní šum a zkreslení OZ je malé

Těchto špičkových parametrů nelze dosáhnou současně jediným zapojením obvodu. To je důvod, proč existuje tak obrovské množství různých typů OZ. Vlastnosti OZ se vyjadřují celou řadou parametrů. Nejdůležitější parametry OZ jsou:

**- napěťové zesílení otevřené smyčky** A0, což je zesílení rozdílu napětí mezi vstupy OZ, tedy mezi vstupem neinvertujícím (+) a invertujícím (-). Rozdíl napětí je U1 = Unein. – Uin. Napěťové zesílení otevřené smyčky se určí podle vztahu 

**- potlačení souhlasného signálu** přivedeného na oba vstupy udává činitel potlačení souhlasného signálu CMRR (**c**ommon **m**ode **r**ejection **r**atio) podle obr. 3.64, který se určí jako poměr napěťového zesílení otevřené smyčky A0 k zesílení souhlasného signálu ACM a vyjádřený v dB

 Tato hodnota, závislá na kmitočtu, má být co největší.

.

Obr. 3.64 Zesílení souhlasného napětí

Obr. 3.65 Zesílení stejných nesouhlasných napětí

0 V

+ 1 V

+ 1 V

-- UN

+ 1 V

- 1 V

**- napěťová nebo proudová nesymetrie vstupů**. Je to nutný rozdíl vstupních napětí nebo proudů, potřebný k dorovnání nuly na výstupu.

**- odpory**: **vstupní odpor** vstupů proti zemi, **rozdílový odpor** vstupů proti sobě, **výstupní odpor**.

* + 1. **Struktura OZ**

Zjednodušené zapojení OZ je na obr. 3.66. Obsahuje **vstupní rozdílový zesilovač (**tvořený tranzistory T1 a T2) se **zdrojem konstantního proudu** (T3), **napěťový budící stupeň** (Darlingtonova dvojice T4 a T5) **a koncového stupně** v komplementárním zapojení (T6 a T7). Vazba mezi jednotlivými stupni je galvanická.

UN2

UN1

zdroj konstantního proudu

T1

T2

T5

D4

T3

T4

T6

T7

U2

D3

Unein

Uin

D2

D1

U1 = Unein - Uin

U1

Obr. 3.66 Struktura operačního zesilovače

R

RE

Zdroj konstantního proudu má mít co největší vnitřní odpor. Ve struktuře OZ je tvořen tranzistorem T3, diodami D1 a D2 a odporem RE. Odpor R s diodami D1 a D2 tvoří parametrický stabilizátor napětí, který udržuje stálé napětí na bázi tranzistoru T3 proti zemi T3 je zapojen jako emitorový sledovač konstantního napětí diod. Stabilizace proudu využívá zpětnou vazbu. Pokud by proud tranzistorem T3 začal klesat, zmenší se úbytek napětí na odporu RE, tím se zvětší rozdíl napětí mezi bází a emitorem UBE, tranzistor T3 se více otevře a hodnota proudu se nezmění.

Princip zesílení OZ je následující. Zvětšením napětí na neinvertujícím vstupu Unein. vzhledem k napětí na vstupu invertujícím Uin. se T2 více otevře než T1. Tím se zvětší úbytek napětí na kolektorovém odporu T2 a napětí přiváděné na Darlingtonovo zapojení tranzistorů T4 a T5 zmenší. Tím se tyto tranzistory přivřou a napětí na jejich kolektorech vzroste (zapojení SE). Nárůst tohoto napětí více otevře NPN tranzistor T6 a přivře PNP tranzistor T7 koncového komplementárního zesilovače, pracujícího v AB třídě. Výstupní napětí U2 vzroste. Při zvětšení napětí na vstupu invertujícím vzhledem k neinvertujícímu vstupu se výstupní napětí U2 zmenší. Protože vnitřní struktura OZ používá galvanickou vazbu mezi jednotlivými stupni, bude OZ zesilovat i stejnosměrné změny vstupních napětí a jeho dolní mezní kmitočet fdse rovná nule.

I přes malý výstupní odpor jsou OZ konstruovány pro malé odebírané proudy do zátěže (mA). Moderní IO mají elektronické pojistky proti přetížení.

Výhodou monolitických IO je stejná teplota všech jeho prvků. Minimální délka spojů mezi prvky je příznivá z hlediska parazitních vazeb a kmitočtových vlastností OZ. Dva vstupy – invertující a neinvertující umožňují jednoduché zavedení zpětné vazby. Vstupní impedance OZ je vysoká, protože zdroj konstantního proudu v emitorech vstupního zesilovače představuje velký odpor, který se převedením do vstupu ještě vynásobí proudovým zesílením. Výstupní impedance je naopak velmi malá, protože výstupní zesilovač pracuje s tranzistory v zapojení SC.

Ohromné napěťové zesílení OZ bez zpětné vazby A0 umožňuje při návrhu obvodů použít vztah (11) z kapitoly 3.7.2.3  a tím se návrh zesilovače redukuje na návrh velikosti ZV.

* + 1. **Základní zapojení OZ**

Většinou se nevyužívá možnost zesilování rozdílového napětí mezi vstupy OZ a invertující vstup (-) se využívá k zavedení – ZV. Velikostí –ZV se nastaví požadovaná hodnota zesílení a přitom –ZV příznivě ovlivňuje ostatní vlastnosti zesilovače (viz kapitola 3.7.2.2).

* + - 1. **Zapojení neinvertujícího OZ**

Je nakresleno na obr. 3.67. Požadovaná velikost zesílení neinvertujícího OZ se nastaví pomocí –ZV sériové napěťové. Velká vstupní impedance umožňuje zanedbat proudy, tekoucí do vstupů OZ. Zesílení OZ bez zpětné vazby A0 se dá považovat za nekonečně velké. Potom při konečné hodnotě U2 se hodnota vstupního napětí U1 blíží hodnotě 0 V, protože 

Obr. 3.67 Zapojení neinvertujícího OZ

R2

R1

U1´

A0 → ∞

U1

I1+ = 0

U2

IR2

IR1

I1-= 0

Protože hodnota vstupního odporu OZ je veliká, proudy I1+ aI1- = 0, potom proud IR1 = IR2 = IR a hodnota napětí U1´ je dána dělícím poměrem nezatíženého odporového děliče R2 a R1 podle vztahu 

Zesílení neinvertujícího OZ se –ZV je určeno vztahem 

* + - 1. **Zapojení invertujícího OZ**

Obr. 3.68 Zapojení invertujícího OZ

U2

R2

R1

A0 → ∞

virtuální zem

napětí = 0 V

I2

U1

I1

Je nakresleno na obr. 3.68. Velikost zesílení invertujícího zesilovače se nastaví pomocí –ZV paralelní napěťové.

Potenciál invertujícího vstupu je totožný se zemí a tomuto vstupu se říká **virtuální** (zdánlivá) **zem**. Na tomto vstupu je nulové napětí za předpokladu, že proudy I1 a I2 jsou stejně velké a opačného směru.

 a proto bude platit  =>

 a velikost zesílení invertujícího OZ

 (znaménko **–** znamená otočení fáze)

* + - 1. **OZ jako sledovač**

Obr. 3.68 Zapojení OZ jako sledovače

U1

U2

Zapojení OZ jako sledovače je na obr. 3.68. Výstupní napětí U2 je co do velikosti i fáze stejné jako napětí vstupní U1, protože v zapojení je zavedena stoprocentní –ZV tím, že celé výstupní napětí U2 je přivedeno zpět na invertující vstup OZ. Zapojení se vyznačuje velkým vstupním odporem a malým výstupním odporem a slouží jako impedanční transformátor.

* + - 1. **OZ jako součtový zesilovač**

V principu je to invertující zesilovač s více vstupy. Schéma je obr. 3.70.

Obr. 3.70 Zapojení součtového OZ

U2

R2

R11

U10

R10

R1n

U11

U1n

I10

I2

I11

I1n

Stejně jako u invertujícího OZ musí platit  a podle prvního Kirchhoffova zákona

 a proto  a tak 

z předchozí rovnice vyplývá, že když se

R10 = R11 = R1n = R2  potom výstupní napětí je 

* + - 1. **OZ jako komparátor**

Komparátor je zapojení OZ jako invertujícího zesilovače s otevřenou smyčkou (bez –ZV) a tím jeho zesílení A0 se blíží nekonečnu. Jeho zapojení a průběhy vstupního a výstupního napětí jsou na obr. 3.71. Je-li vstupní napětí U1 na invertujícím vstupu větší jak napětí komparační Ukop. na vstupy neinvertujícím, bude výstupní napětí U2 kladné o velikosti napájecího napětí (+12 V). V okamžiku, kdy vstupní napětí U1 dosáhne hodnoty napětí komparačního Ukop., změní se hodnota výstupního napětí U2 **skokem** na hodnotu záporného napájecího napětí (-12 V). Při poklesu vstupního napětí U1 pod hodnotu napětí komparačního Ukomp. obvod opět skokem překlopí.

Komparátor převádí pomalu a spojitě se měnící napětí U1 na napětí dvouhodnotové – binární. Svojí funkcí patří mezi klopné obvody.

Obr. 3.71 Zapojení OZ jako komparátoru a průběhy vstupního a výstupního napětí

U1

U2

Ukomp.

UN1

+ 12 V

UN2

- 12 V

+12 V

t

-12 V

Ukomp,

U1

0

U2

t

0

* + - 1. **OZ jako integrátor**

Zapojení OZ jako integrátoru je na obr. 3.72. Výstupní napětí U2 je úměrné integrálu vstupního napětí U1 a konstantou úměrnosti je časová konstanta obvodu τ = RC 

Výstupní napětí bude rovnoměrně klesat (nebo stoupat) v závislosti na velikosti U1. Klesání nebo nárůst výstupního napětí závisí na použitém vstupu OZ. Obvod integrátoru se používá např. v číslicových voltmetrech jako převodníku napětí na čas.

U2

C

R

U1

Obr. 3.72 Zapojení OZ jako integrátor a průběhy vstupního a výstupního napětí

U1

0

U2

t

0

t

* + - 1. **Další možná zapojení OZ**

Existuje řada dalších možných zapojení OZ ve funkci diferenciátoru, zesilovače náboje, převodníku proud na napětí, lineárního usměrňovače, klopných obvodů, oscilátorů, korekčních zesilovačů, pásmových propustí, přesného zdroje proudu a mnoha dalších.

V kapitole 3.11.2.6 bylo popsáno několik typů integrovaných nf. výkonových zesilovačů, které nejsou ničím jiným než OZ.