
ELEKTRONIKAI TECHNIKUS KÉPZÉS

2 0 1 3

ANALÓG
ELEKTRONIKA IV.
MŰVELETI ERŐSÍTŐK

ÖSSZEÁLLÍTOTTA
NAGY LÁSZLÓ
MÉRNÖKTANÁR

Tartalomjegyzék

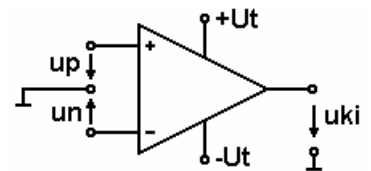
Műveleti erősítők	3
Műveleti erősítők fogalma, működési elve, felépítése.....	3
Műveleti erősítők jellemző paraméterei.....	7
Műveleti erősítő egyenáramú és váltakozó áramú erősítő alapkapcsolások.....	8
Műveleti erősítő egyenáramú munkapont-beállítása	10
Műveleti erősítő frekvenciakompenzálása	11
Műveleti erősítő alkalmazása	12
Áttekintés: a nyílthurkú erősítés hatása a visszacsatolt erősítésre	15

Műveleti erősítők

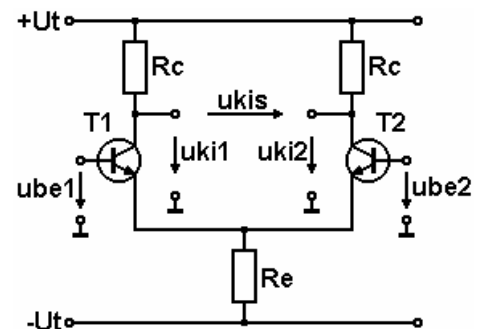
Az aszimmetrikus, diszkrét elemes tranzisztoros erősítő fokozatok felhasználhatóságát korlátozza, hogy a munkapontok erősen hőmérséklet függőek és többnyire csak váltakozó feszültség erősítésére alkalmasak. A hőmérséklet változás miatt fellépő munkapont vándorlás vagy más néven drift, megfelelő, több fokozatot átfogó visszacsatolással jelentősen csökkenthető. Az egyenáramú jelátvitelhez a bemeneti munkaponti feszültség földpotenciál közelébe helyezése szükséges, ami kettős tápfeszültséget igényel. A fokozatok közötti galvanikus csatolás feltétele a munkaponti feszültségek egyezése. Ez megoldható az egyes fokozatok tápfeszültségének lépcsőzésével, vagy NPN-PNP... típusú tranzisztoros fokozatok összekapcsolásával. A lépcsőzetes tápegység bonyolult, a komplementer fokozatok esetén előbb-utóbb elfogy a kivezérlési tartomány. Egyenfeszültség erősítésére a differenciál erősítők a legalkalmasabbak, mivel felépítésük miatt a hőmérséklet ill. a tápfeszültség változása a kimeneti feszültségükre, elvileg hatástalan. Az integrált áramkörös gyártástechnológia fejlődésének eredménye a műveleti erősítő. Az áramkör analóg számítások elvégzésére, matematikai műveletek megoldására készült, nevüket angol elnevezésük, Operational Amplifier vagy Operational Circuit fordításából kapták.

Műveleti erősítők fogalma, működési elve, felépítése

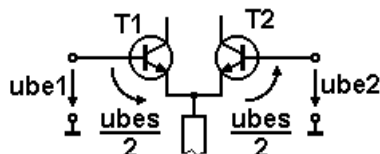
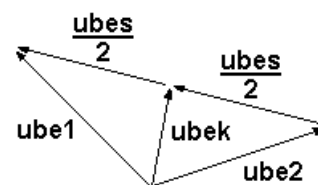
Azokat az egyenfeszültség erősítőket, melyek két szimmetrikus bemenettel és általában egy aszimmetrikus kimenettel rendelkeznek műveleti erősítőknak nevezzük. A műveleti erősítő kimenő feszültsége a neminvertáló (+) és az invertáló (–) bemenetekre kapcsolt feszültségek különbségével arányos. Az arányossági tényező a műveleti erősítő nyílthurkú azaz visszacsatolás nélküli erősítése. Blokkvázlat:



A differenciálerősítő, két FE erősítő fokozatból áll, melyeknek közös az emitter ellenállásuk. A tranzisztorok paraméterei és a kollektor ellenállások értékei azonosak. Ezt az biztosítja, hogy egyszerre készülnek. A tápfeszültség kettős, közös pontjuk a földpont. A fokozatok munkapont-beállítása miatt a bázisok földpotenciálra vagy a közelébe kerülnek. A differenciál erősítőknek két bemenete és két kimenete van. A bemenetek vezérelhetők külön-külön és együtt is. A kimenő feszültséghez vagy a kollektorok és a földpont vagy a két kollektor között lehet hozzáférni.

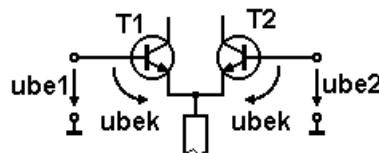


Általános esetben a bemeneti feszültségek bármilyen nagyságúak és fázishelyzetűek lehetnek, de minden esetben előállíthatók két azonos nagyságú és fázishelyzetű u_{be1} és u_{be2} , és két azonos nagyságú de ellentétes fázisú u_{bes} feszültségekből.



$$u_{bes} = u_{be1} - u_{be2}$$

$$u_{bek} = \frac{u_{be1} + u_{be2}}{2}$$



Differenciális szimmetrikus vezérlés esetén mindkét bemenet külön-külön kap bemenő feszültséget, aszimmetrikus vezérlés esetén csak az egyik bármelyik bemenet vezérelt, a másik földpontra van kötve. A két bemenőjel különbsége $u_{be1} - u_{be2} = u_{bes}$, a tranzisztorok BE diódáján oszlik meg. Az $u_{bes} / 2$ a tranzisztorokat azonos mértékben de ellentétesen vezérli. A kollektorokon az $u_{bes} / 2$ -vel arányosan felerősített de ellentétes irányú feszültség jelenik meg, így az $u_{ki1} - u_{ki2} = u_{kis}$ az u_{bes} -el arányos. A differenciál módusú feszültség-erősítés az FE kapcsolásra jellemzően:

$$A_{us} = -\frac{u_{kis}}{u_{bes}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot R_c$$

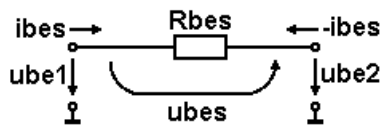
Érdemes megfigyelni, hogy ha az u_{be1} -t vezéreljük aszimmetrikusan, akkor az u_{ki} ellentétes, és ha az u_{be2} -t vezéreljük aszimmetrikusan, akkor az u_{ki} azonos fázisú lesz. Az egyik bemenet tehát fázist fordít, a másik bemenet nem fordít fázist.

Közös módusú vezérlés esetén mindkét bemenet vezérlő feszültsége azonos nagyságú és fázisú. A kollektorokban a megjelenő feszültségek nagysága és iránya is azonos, ezért ideális esetben az $u_{kis} = 0$. A tranzisztorok az $u_{be1} = u_{be2} = u_{bek}$ bemeneti feszültséget a közös emitter ellenálláson másolják, így a vezérlés miatt kialakuló emitter áram $I_e = u_{bek} / R_e$. A tranzisztorok az emitter áramot egyenlően osztják meg, ezért a kollektor ellenállásokon folyó $i_{c1} = i_{c2} = I_e / 2$ áram hozza létre az $u_{ki1} = u_{ki2} = u_{kik} = R_c \cdot I_e / 2$ kimenő feszültséget. A közös módusú feszültség-erősítés az emitterkörü negatív visszacsatolt FE-re jellemzően:

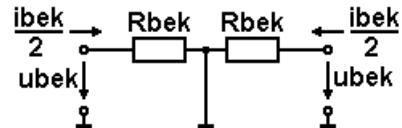
$$A_{uk} = -\frac{u_{kik}}{u_{bek}} = -\frac{R_c}{2R_e}$$

A közös módusú erősítés jelentősen csökkenthető az emitter ellenállás áramgenerátorral való kiváltásával. A gyakorlatban $u_{bes} = 0$ esetén az $u_{kis} \neq 0$. Ezt a hibafeszültség más néven ofszet, az alkatrészek aszimmetriája miatt jelenik meg. További problémát okoz a hőmérséklet változás miatt fellépő $u_{bek} = 2\text{mV}/^\circ\text{C}$ drift vagy munkapont vándorlás is. A kedvezőtlen hatásokat, a DC csatolás érdekében, szintén az emitterkörü áramgenerátor alkalmazása csökkenti jelentősen. A fennmaradó hibafeszültséget külső áramkörü elemekkel, munkapont-beállítással lehet kompenzálni. A differenciál erősítők differenciál módusú feszültség-erősítése kb. 50÷60 dB, közös módusú erősítése kb. -20÷-30 dB.

A differenciál erősítő bemeneti feszültségeinek szimmetrikus és közös összetevőkre bontása alapján, a bemeneti áramok is összetevőkre bonthatók. A bemeneti ellenállásokat a szimmetrikus illetve a közös feszültségek és áramok hányadosai határozzák meg.



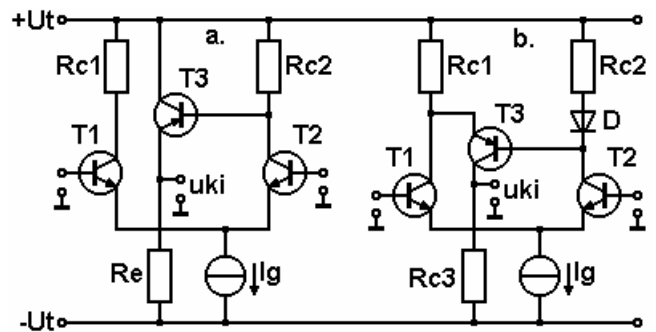
$$R_{bes} = \frac{u_{bes}}{i_{bes}} = 2 \cdot \frac{u_{be1} - u_{be2}}{i_{be1} - i_{be2}}$$



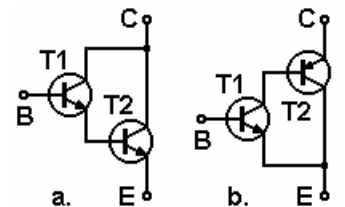
$$R_{bek} = \frac{u_{bek}}{i_{bek}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_{be1} + u_{be2}}{i_{be1} + i_{be2}}$$

A differenciál erősítő kimeneti ellenállása $\sim 2R_C$, a többnyire terheletlen üzemmód miatt nincs jelentősége.

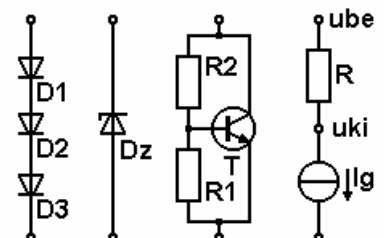
A fázisösszegző a differenciál erősítő szimmetrikus kimenő feszültségét aszimmetrikusra alakítja. Jelentős erősítése nincs, ≈ 1 . Megoldható "a." ábra szerint emitter követővel, ebben az esetben csak fele akkora kimenőjel továbbítható, vagy PNP tranzisztoros FE kapcsolással "b." ábra szerint. A D dióda a T3 nyitófeszültségét függetleníti a hőmérséklettől.



A főerősítő két tranzisztorból áll, a kollektorok párhuzamosan a bázis emitter diódák sorba vannak kapcsolva. Eredőben egy $B_1 \cdot B_2$ áramerősítésű NPN tranzisztor alakul ki "a" ábra. A elrendezést Darlington kapcsolásnak nevezzük. A bemeneti ellenállás $h_{11e} = h_{111} + h_{112} \cdot B_1$. Kedvezőtlen a soros nyitófeszültségek hőmérséklet függése. Ez csökkenthető komplementer tranzisztorok alkalmazásával, "b" ábra. Az eredő NPN tranzisztor áramerősítése az előzővel azonos, a bemeneti ellenállása $h_{11e} = h_{111}$. A kapcsolást kompozit párnak nevezzük.

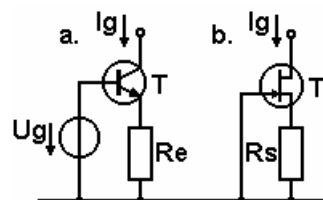


A szintáttevők feladata a különböző feszültségű munkapontok közötti hasznos jel csillapítatlan továbbítása. Szintáttevőnek olyan kétpólusok alkalmasak, melyeknek karakterisztikájában van áramtengellyel párhuzamos jellegű szakasz. Tipikus kialakítások: soros diódalánc, Zener dióda, tranzisztoros szinteltoló, áramgenerátoros szintáttevő. A tranzisztoros szinteltolónak hasonló karakterisztikája van, mint a Zener diódának záróirányban, de a letörési feszültség az R1 és R2 ellenállástól függ. A kétpólus egy soros ellenálláson kap feszültséget. Amíg az R1 feszültsége kisebb a tranzisztor nyitófeszültségénél, addig csak az R1 és R2 ellenállásokon folyik egy viszonylag kis áram. Ha R1 feszültsége eléri a nyitófeszültséget, akkor a tranzisztor kinyit és a kollektor árama elvezeti az ellenállások áramának egy részét, de ezzel a saját nyitófeszültségét is csökkenti. Végeredményben kialakul egy egyensúlyi helyzet, a

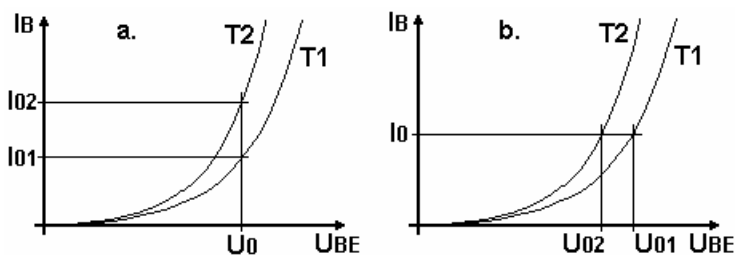


tranzisztor állandósítja az U_{CE} feszültségét.

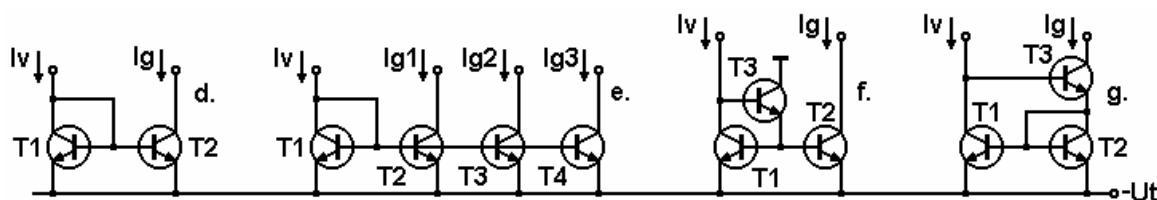
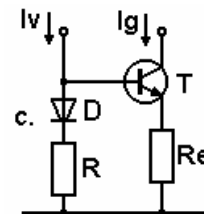
Egy erősítő fokozat feszültségerősítését az alkalmazott aktív elemen kívül a munkaellenállás határozza meg. Nagy erősítéshez nagy értékű munkaellenállás és emiatt nagy tápfeszültség is szükséges. Integrált áramkörös technológiával nagy értékű ellenállás előállítása hátrányokkal jár, a nagy tápfeszültség az alkalmazást teszi nehézkesé. Kis tápfeszültség mellett nagy ellenállást áramgenerátorral lehet megvalósítani. A tranzisztor felhasználható áramgenerátornak, mivel kollektor árama csak kis mértékben függ a kollektor - emitter feszültségtől. Az áramgenerátor alapelvét az emitterkövető kapcsolás valósítja meg, "a" ábra. A tranzisztor az állandó bázisfeszültséget, az emitter ellenálláson másolja. Mivel az emitter ellenálláson állandó a feszültség, ezért az emitter áram és így a kollektor áram is állandó. Az I_g forrás áramot az U_e / R_e hányados határozza meg, Az emitter feszültség U_{BE} -vel kisebb, mint az U_g és hőmérséklet függése az I_g forrásáramot is befolyásolja. JFET-es áramgenerátort mutat a "b" ábra. A forrásáramot az U_{gs} / R_s összefüggéssel lehet meghatározni.



A tranzisztor hőmérséklet függését, két azonos irányú hatás okozza. A hőmérséklet emelkedése következtében, egyrészt a bázis-emitter nyitó feszültség csökkenése, másrészt a kollektor-bázis záró áram növekedése miatt, a tranzisztor munkapontja nyitó azaz nagyobb áramú irányba tolódik el. Állandó bázis illetve kollektor áramot, állandó bázis-emitter feszültséggel nem lehet biztosítani. Állandó U_o munkaponti feszültség mellett a bázisáram I_{o1} -ről, I_{o2} -re változik, ha a hőmérséklet T_1 -ről, T_2 -re növekszik, "a." ábra. Az emitterkörü negatív soros-áram visszacsatolás csökkenti a munkapont hőmérséklet függését de a DC csatoláshoz ez sem elegendő megoldás. A bázisáram állandó lesz, ha a nyitófeszültséget U_{o1} -ről, U_{o2} -re változtatjuk, amikor a hőmérséklet T_1 -ről, T_2 -re növekszik. Hőmérséklet független áram generátorként a tranzisztor csak abban az esetben használható, ha a vezérlő feszültség is hőmérséklet függő. A "c." ábra mutatja, hogy ezt az elvet, hogyan lehet hasznosítani áramgenerátor hőmérséklet függetlenítésére. Az I_v vezérlőáram a D dióda és az R ellenállás eredőjén hozza létre a bázisfeszültséget. A dióda és a tranzisztor nyitófeszültsége jó közelítéssel azonos és a hőmérséklettel együtt változik. Az I_g forrásáram az $I_v \cdot R / R_e$ alapján számítható. Ha az ellenállásokat elhagyjuk és a diódát egy

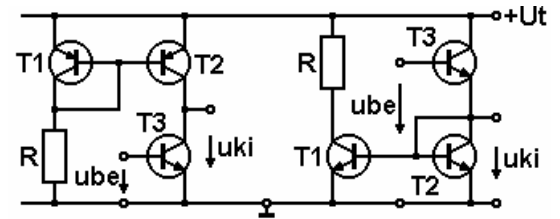


vezérlő feszültség is hőmérséklet függő. A "c." ábra mutatja, hogy ezt az elvet, hogyan lehet hasznosítani áramgenerátor hőmérséklet függetlenítésére. Az I_v vezérlőáram a D dióda és az R ellenállás eredőjén hozza létre a bázisfeszültséget. A dióda és a tranzisztor nyitófeszültsége jó közelítéssel azonos és a hőmérséklettel együtt változik. Az I_g forrásáram az $I_v \cdot R / R_e$ alapján számítható. Ha az ellenállásokat elhagyjuk és a diódát egy

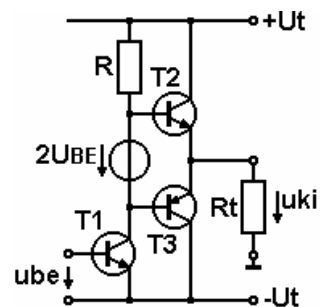


másik, azonos paraméterű "önszabályozott" diódként működő tranzisztorral állítjuk elő, akkor gyakorlatilag teljesen hőmérséklet független áramgenerátort kapunk, "d." ábra. Az I_v vezérlő és az I_g generátor áramok arányát az integrált emitter felületek aránya határozza meg. Egy vezérlő tranzisztorra több különböző forrásáramú generátor is kapcsolható, "e." ábra. Az elrendezést áramtükörnek is nevezi a szakirodalom. Az áramtükör javított paraméterű változatai a nagy pontosságú áramáttevő, "f." ábra, és a nagy belső ellenállású áramgenerátor, "g." ábra.

Aktív munkaellenállás alkalmazásával az erősítés egy áramgenerátor belső ellenállásán jön létre, így a nagy értékű integrált ellenállás kialakítása elkerülhető. Mindkét kapcsolásban a T2 tranzisztor az áramgenerátor. FE kapcsolással - baloldali rajz - 1000 ÷ 3000-szeres, FC kapcsolással - jobboldali rajz - 1-szeres erősítés és közel tápfeszültségnyi kivezérelhetőség érhető el.



A végfokozat általában komplementer tranzisztoros felépítésű. A $2U_{BE}$ generátor egy szinteltoló, feladata a végtranzisztorok AB osztályú beállítása, mellyel a nulla átmeneti torzítás szüntethető meg. A végtranzisztorok nyitófeszültségének hőmérséklet kompenzációját is a szinteltoló oldja meg (a rajzon nincs feltüntetve!). Az áramkör legtöbb esetben túlterhelés elleni védelemmel is el van látva, például 25 mA-re korlátozza a terhelő áramot. A végfokozatok általában a tápfeszültség 85-90%-ig kivezérelhetők.



Műveleti erősítők jellemző paraméterei

Az ideális műveleti erősítő jellemzői:

- nyílthurkú differenciális feszültségerősítés: ∞
- nyílthurkú közös módusú feszültségerősítés: 0
- bemeneti ellenállás: ∞
- kimeneti ellenállás: 0
- sávszélesség: ∞

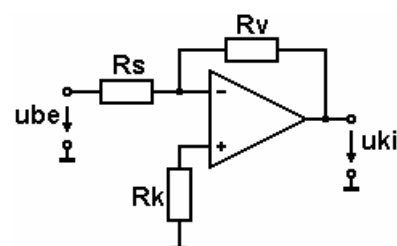
A műveleti erősítők katalógusban megtalálható jellemzői:

- Auo nyílthurkú differenciális feszültségerősítés: szimmetrikus bemeneti jellel, alacsony frekvencián, visszacsatolás nélkül, terheletlen kimenet esetén mért feszültségerősítés. (pl. 100 dB)
- Auk nyílthurkú közös módusú feszültségerősítés: közös bemeneti jellel, alacsony frekvencián, visszacsatolás nélkül, terheletlen kimenet esetén mért feszültségerősítés. (pl. 0,2)
- G közös módusú feszültség elnyomási tényező: differenciális és a közös módusú

	feszültségerősítés hányadosa, vagy logaritmikus mérőszáma (pl. $20 \lg A_{uo} / A_{uk} = 100 \text{ dB}$).
IBO	bemeneti munkaponti áram: bemeneti áramok átlaga (pl. $I_p + I_n / 2 = 100 \text{ nA}$).
Ibeo	bemeneti ofszet áram: az a szimmetrikus bemeneti hibaáram, mely a M.E. kimeneti feszültségét 0 V-ra állítja. (pl. $I_p - I_n = 50 \text{ nA}$)
Ubeo	bemeneti ofszet feszültség: az a szimmetrikus bemeneti hibafeszültség, mely a M.E. kimeneti feszültségét 0 V-ra állítja. (pl. $U_p - U_n = 1 \text{ mV}$)
Rbeo	bemeneti ellenállás: szimmetrikus bemeneti feszültség és a szimmetrikus bemeneti áram hányadosa (pl. $U_p - U_n / IBO = 2 \text{ M}\Omega$).
Rkio	kimeneti ellenállás: kimeneti üresjárású feszültség és rövidzárási áram hányadosa (pl. $U_{ki0} / I_{kir} = 10 \text{ }\Omega$).
Udmax	bemeneti differenciális feszültségtartomány: bemenetekre kapcsolható maximális differenciális feszültség (pl. $\pm 5 \text{ V}$).
Ukmax	bemeneti közös feszültségtartomány: bemenetekre kapcsolható maximális közös feszültség (pl. $\pm 5 \text{ V}$).
fo	sávzélesség: az a frekvencia, ahol az A_{uo} csökkenése 3dB (pl. 10 Hz).
S	jelkövetési sebesség: a kimeneti feszültség maximális változási sebessége (pl. $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$). Annak a szinuszos bemeneti feszültségnek a frekvenciája, melyet a M.E. kimenete még képes követni. Egy szinuszos feszültség nulla átmeneti változási sebessége: $S = \Delta U / \Delta t = 2 \pi f \hat{U}$.
Ut	tápfeszültség tartomány: az a kettős tápfeszültség tartomány, ahol már és ahol még üzemszerűen működtethető a M.E. (pl. $\pm 5 \div \pm 18 \text{ V}$).

Műveleti erősítő egyenáramú és váltakozó áramú erősítő alapkapsolások

Invertáló erősítő alapkapsolásban a műveleti erősítőt negatív visszacsatolással egészítjük ki. A visszacsatoló hálózat egy feszültségosztó, melyre a bemeneti és a műveleti erősítő kimeneti feszültsége kapcsolódik, az osztáspontja pedig az invertáló bemenetre van kötve. Az u_{be} hatására a M.E. ellenkező irányban úgy állítja be a kimeneti feszültségét, hogy az, az R_v - R_s feszültségosztó osztáspontján kialakuló u_n különbségi feszültség A_{uo} -szorosa legyen. Nagy A_{uo} esetén, a különbségi feszültség csaknem nulla, az $u_n \approx u_p$, ezért az invertáló bemenet látszólagos földpotenciálnak tekinthető. Az R_s ellenálláson az u_{be} -vel arányos áramot, mely teljes egészében az R_v ellenálláson folyik tovább, a M.E. kimenete "lenyeli". Az R_v -en az u_{ki} , az R_s -n az u_{be} feszültség esik, így az erősítés a két ellenállás hányadosa. A kimeneti ellenállás az R_v , R_s ellenállásokkal megvalósított negatív párhuzamos feszültség visszacsatolás mi-



$$A_{uv} = -\frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R_v}{R_s}$$

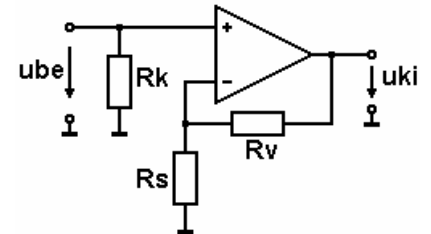
$$R_{be} = R_s$$

$$R_{ki} = R_{kio} \frac{A_{uv}}{A_{uo}}$$

$$R_k = R_s \otimes R_v$$

att kisebb lesz mint az R_{kio} . Az invertáló bemenet munkaponti árama a bemenetre csatlakozó ellenállásokon folyik át és a vezérléstől függetlenül hibafeszültséget hoz létre. Ez a hibafeszültség a neminvertáló bemenetre kapcsolt ugyanakkora úgynevezett kompenzáló ellenállással szüntethető meg, mint amekkorát a másik bemenet "lát", tehát $R_k = R_s \otimes R_v$.

Nem invertáló erősítő alapkapsolásban a műveleti erősítőt szintén negatív visszacsatolással látjuk el. A visszacsatoló hálózat ebben az esetben is egy feszültségosztó, mely a műveleti erősítő kimenő feszültsége és a földpont közé van kapcsolva, az osztáspont az invertáló bemenetet vezérli. Az u_{be} hatására a M.E. azonos irányban úgy állítja be a kimeneti feszültségét, hogy az, az R_v - R_s feszültségosztó osztáspontján kialakuló ún. különbségi feszültség A_{uo} -szorosa legyen. Nagy A_{uo} esetén az R_s -en gyakorlatilag az u_{be} feszültség, illetve azzal arányos áram alakul ki. Ez az áram az R_v -n teljes egészében átfolyik és rajta R_v / R_s arányú u_{be} -szeres feszültséget hoz létre. Mivel a két ellenálláson eső feszültség összege az u_{ki} , ezért a feszültségerősítés eggyel nagyobb mint az R_v / R_s .



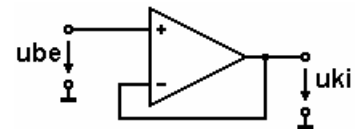
$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{u_{be} + \frac{u_{be}}{R_s} R_v}{u_{be}} = 1 + \frac{R_v}{R_s}$$

$$R_{be} = R$$

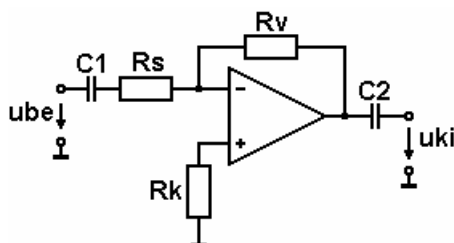
$$R_{ki} = R_{kio} \frac{A_{uv}}{A_{uo}}$$

$$R_k = R_s \otimes R_v$$

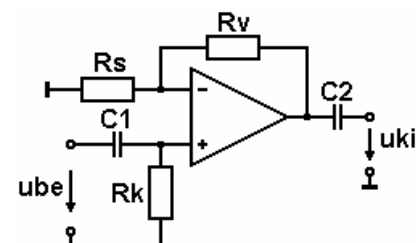
Az R ellenállás szerepe és értéke ugyanaz mint az invertáló kapcsolásban. Ha üzem közben biztosítható a bemenet állandó lezárása, akkor az R ellenállást sorosan is lehet kapcsolni a bemeneti feszültséggel, így kihasználható a műveleti erősítő nagy bemeneti ellenállása. Ebben az esetben az $R_{be} \approx \infty$. Ha az R_v rövidzár és az R_s szakadás, akkor az erősítés egységnyi lesz, követő vagy leválasztó erősítő jön létre.



Az ismertetett invertáló és neminvertáló alapkapsolások egyenáramú és váltakozó áramú jelek erősítésére is alkalmasak. Ha a bemenetekre és a kimenetekre csatoló kondenzátorokat helyezünk el, akkor kizárólag váltakozó áramú jelek erősítésére alkalmas kapcsolásokat kapunk. A fokozatok méretezése és jellemzőinek számítása sávközépen hasonló összefüggésekkel történik mint előzőleg.



$$A_{uv} = -\frac{R_v}{R_s} \quad R_{be} = R_s \quad R_k = R_v$$



$$A_{uv} = 1 + \frac{R_v}{R_s} \quad R_{be} = R_k \quad R_k = R_v \otimes R_s$$

A kapcsolások kimeneti ellenállása az előzőkkel azonos: $R_{ki} = R_{kio} \frac{A_{uv}}{A_{uo}}$

A bemeneti csatolókondenzátor a bemeneti ellenállással, a kimeneti csatolókondenzátor a terhelő ellenállással alkot frekvenciafüggő feszültségosztót. Mindkettő meghatároz egy-egy alsó határfrekvenciát, melyek közül a nagyobb lesz az alsó határfrekvencia.

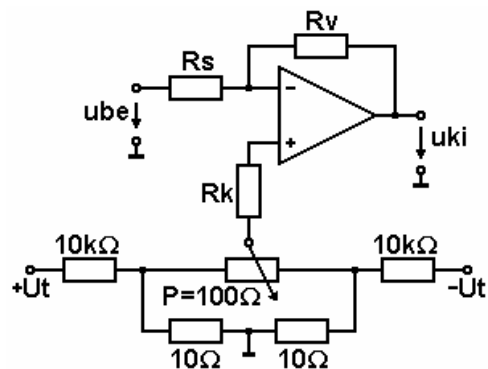
$$f_{abe} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot R_{be}} \qquad f_{aki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot R_t}$$

Műveleti erősítők egyenáramú munkapont-beállítása

Munkapont-beállítás alatt a bemeneti nyugalmi áram, az ofszet feszültség és az ofszet áram miatt, a kimeneti feszültségben fellépő nemkívánatos eltérések megszüntetését, kompenzálását értjük.

A differenciál erősítő bemeneti tranzisztorainak munkaponti árama a bemeneti nyugalmi áram. Ez az áram a visszacsatoló hálózat ellenállásain átfolyva feszültségesést hoz létre, melyet a műveleti erősítő mint vezérlőjelet felerősítve a kimenetén megjeleníti. A kimeneten tehát bemenőjel nélkül is megjelenik néhányszor 1mV-os vagy néhányszor 10mV-os egyenfeszültség. Váltakozó áramú erősítők esetén a kimeneti egyenfeszültség nem befolyásolja működést de egyenáramú, főleg mérés technikai alkalmazásoknál megengedhetetlen. A kimeneti hibafeszültség megszüntetésének elve, hogy a neminvertáló bemenetre csatlakozó ellenállások eredője legyen azonos az invertáló bemenetre csatlakozó ellenállások eredőjével. Ebben az esetben a nyugalmi áramok az ellenállásokon azonos nagyságú feszültségeséseket hoznak létre, ami a műveleti erősítő számára közös módusú vezérlést jelent és így nem jelenik meg a kimeneten hibafeszültség. A nyugalmi áram kompenzálását az alapkapcsolásoknál ismertetett R_k ellenállás oldja meg. A neminvertáló bemenetre tehát akkora ellenállást célszerű választani, amekkora az invertáló bemenetre csatlakozó összes ellenállás párhuzamos eredője egyenáramúlag.

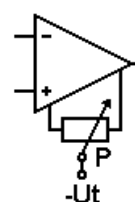
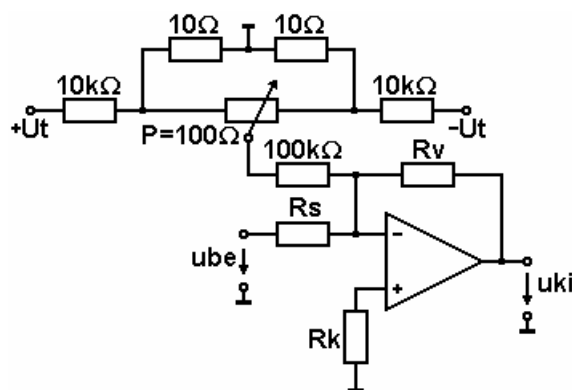
Az ofszet feszültség a differenciál erősítő bemenetén, a tranzisztorok paramétereinek eltéréseiből, a bázis-emitter átmenet geometriai és a rétegek szennyezettségének különbözőségéből származik. A kimeneti nyugalmi feszültség nullára állításához az ofszet feszültséget kell létrehozni a bemeneten. Az ofszet kompenzáció alatt azt az eljárást értjük, mely során a gyártáskor az áramkörben kialakult hibát külső alkatrészekkel létrehozott, ellentétes hatással szüntetjük meg. Ofszet feszültség kompenzáló áramköri megoldást mutat az ábra. Az R_k ellenállás nem a földpotenciálra, hanem attól néhány mV-al eltérő pontra csatlakozik.



Rövidrezárt bemenet esetén a potenciométerrel beállítható a nulla kimeneti feszültség. Ha a bemeneti rövidzár megszüntetésekor ismét fellép a kimeneten hibafeszültség, akkor áramkompenzációt kell alkalmazni.

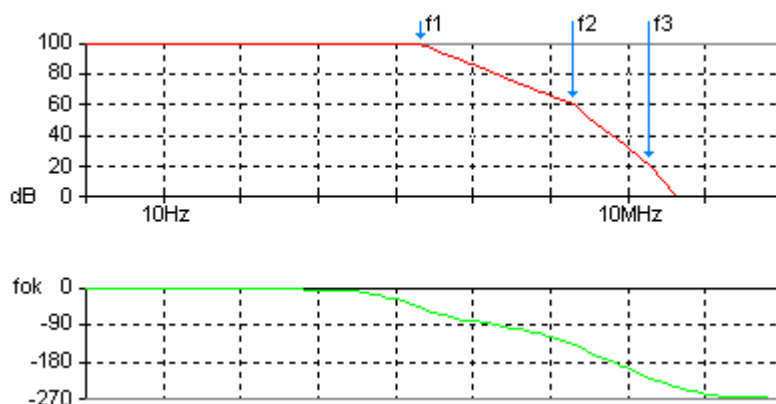
Az ofszet áram a bemeneti tranzisztorok áramerősítésének eltéréséből ered. Nagyságrendileg kisebb hibafeszültséget hoz létre, mint a nyugalmi áramból származó, de precíziós alkalmazásoknál szükséges lehet az ofszet áram kompenzálása. Az áramköri megvalósítást mutatja az ábra. Az invertáló bemenetre, mint látszólagos földpontra egy nagy értékű ellenálláson néhány mV feszültségről pontosan az ofszet áramot folytatjuk be. A beállítása az előzőhöz hasonló, rövidrezárt bemenet esetén a potenciométerrel nulla V-ra állítjuk a kimenetet.

Számos műveleti erősítő el van látva ofszet hiba kiegyenlítésére alkalmas kivezetésekkel, melyekre a gyártó által javasolt külső elemeket ráépítve a kompenzálás egyszerűen elvégezhető. Az ilyen típusú alkatrészeket nevezzük belső kompenzálású műveleti erősítőknek. A kivezetéseket nem kötelező felhasználni, az áramkör például AC erősítőnek kompenzálatlanul is felhasználható.



Műveleti erősítők frekvenciakompenzálása

A műveleti erősítő frekvencia vagy váltakozó áramú kompenzálásának célja a gerjedés mentes működés biztosítása. A valóságos műveleti erősítők nyílthurkú erősítése és fázistolása a nagyobb frekvenciás tartományban, erősen függ a frekvenciától. A műveleti erősítők belső áramköri kialakítása miatt, az integrált alkatrészek közötti parazita kapacitások nagyfrekvencián, hatásossá válnak. Az áramkör ellenállásaival ezek a kapacitások magasabb fokú aluláteresztő szűrőt hoznak létre, azaz az erősítés frekvenciamenetében több töréspont is megjelenhet. Minden töréspont -20 dB/dekád meredekségű erősítéscsökkenést és -90° fázistolást jelent. Az ábra egy olyan nyílthurkú frekvenciamenetet mutat, ahol az f_1 , f_2 és f_3 töréspontok 20kHz-nél, 2MHz-nél és 20MHz-nél vannak. A fázisforgatás eredőben -270°. Ha a műveleti erősítő kapcsolás frekvenciamenetében - több nagy frekvenciás töréspont esetén - létezik 180°-os fázisfordításhoz egyénnél nagyobb erősítés, akkor ezen a frekvencián a negatív visszacsatolás pozitívvá válik és az áramkör begerjed. A nagyfrekvenciás oszcilláció miatt az áramkör nem tudja ellátni a



feladatát, egyes esetekben a műveleti erősítő túlmelegszik és tönkremegy. A gerjedés megakadályozására több megoldás létezik.

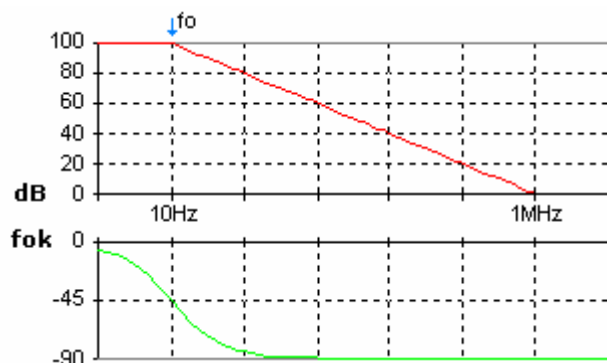
A kapcsolás bemenetén elhelyezett szűrővel nem engedjük meg, hogy a gerjedést okozó frekvencia a műveleti erősítőbe bejusson.

A gyártó ajánlása alapján, a műveleti erősítő erre a célra szolgáló kivezetéseire csatlakozó, általában R-C elemekből álló kompenzáló hálózat alkalmazása. A stabil működéshez szükséges külső áramköri elemek értékét és kapcsolási módját a gyártó adatlapokon közli. Általában a különböző erősítés értékekhez más és más kompenzáló elemek szükségesek, tehát egyedileg kell a kompenzációt elvégezni.

Belső kompenzálású műveleti erősítő alkalmazása esetén, a sávszélesség mesterséges beszűkítése miatt a gerjedés feltétele nem jöhet létre. A belső kompenzálású műveleti erősítőben a felső határfrekvencia, egy néhányszor 10 pF-es, beintegrált MOS kapacitás miatt kb. 10 Hz-nél jelenik meg. Az amplitúdó karakterisztika meredeksége -20 dB/dekád, a 0 dB-es tengelyt kb. 1 MHz-nél metszi. Az eredő fázistolás csak egyszer 90°, így a gerjedés feltétele, tehát az azonos fázisú visszacsatolás az és egységnyi hurokerősítés, nem jöhet létre. A gerjedés mentességért a viszonylag szűk sávszélességgel kell fizetni. A belső kompenzálású műveleti erősítők, például a uA741, elsősorban ipari irányító áramkörökben, hangfrekvenciás fokozatokban használhatók. A felső határfrekvencia számítása:

Egy invertáló fokozat erősítése
 $A_{uv} = -100$, a felső határfrekven-
 cia $A_{uo} = 100\,000$ esetén 10 kHz.

$$f_v = f_o \frac{A_{uo}}{A_{uv}}$$



Műveleti erősítők alkalmazása

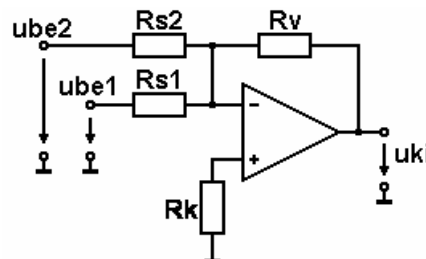
Invertáló összeadó kapcsolás kettő vagy több bemenetre kiegészített invertáló alapkapsolás. Az egyes bemenetek az invertáló bemenetre, tehát a látzólagos földpontra csatlakoznak. A bemeneti feszültség a soros ellenállásokon áramot hajt, melyeknek az összege a visszacsatoló ellenálláson folyik a kimenet felé. Az invertáló bemenetre felírható csomóponti törvény:

$$I_1 + I_2 + I_v = 0$$

A feszültségek és ellenállások behelyettesítése után, a kimeneti feszültség:

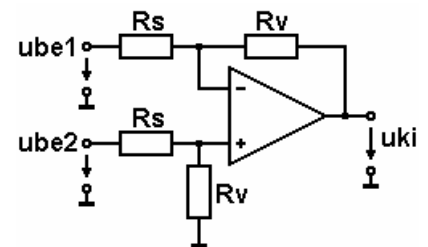
$$-U_{ki} = U_{be1} \frac{R_v}{R_{s1}} + U_{be2} \frac{R_v}{R_{s2}}$$

A kapcsolás tehát a bemeneti feszültségek előjelhelyes algebrai összegének -1-szeresét ál-



lítja elő a kimeneten. A rajz egy két bemenetű összeadót mutat be, a gyakorlatban a bemenetek száma nincs korlátozva. Az R_k kompenzáló ellenállás értékének, az invertáló bemenetre csatlakozó ellenállások párhuzamos eredőjét célszerű választani, jelen esetben $R_k = R_{s1} \otimes R_{s2} \otimes R_v$. A kapcsolás csatoló kondenzátorokkal kiegészítve, váltakozó feszültségek összeadására is alkalmas.

Különbségképző kapcsolás egy invertáló és egy neminvertáló alapkapcsolásból áll. Az így képződő két bemenet feszültségének előjelhelyes különbségét állítja elő a kapcsolás. A pontos működés feltétele, az azonos jelölésű ellenállások értékének azonossága. A kimeneti feszültség meghatározásához az neminvertáló és invertáló bemenetek feszültségét kell felírni:



$$U_p = U_{be2} \frac{R_v}{R_s + R_v} \quad \frac{U_{be1} - U_n}{R_s} = \frac{U_n - U_{ki}}{R_v} \Rightarrow U_n = \frac{U_{be1} \cdot R_v + U_{ki} \cdot R_s}{R_s + R_v}$$

Egyensúlyi helyzetben a műveleti erősítő bemeneti feszültségei azonosnak tekinthetők, tehát $U_p = U_n$.

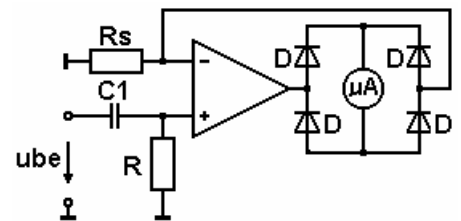
$$U_{be2} \frac{R_v}{R_s + R_v} = \frac{U_{be1} \cdot R_v + U_{ki} \cdot R_s}{R_s + R_v}$$

A kapott összefüggést a kimeneti feszültségre rendezve:

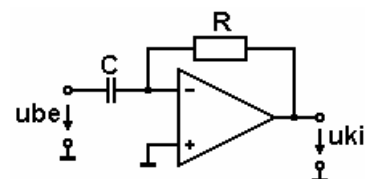
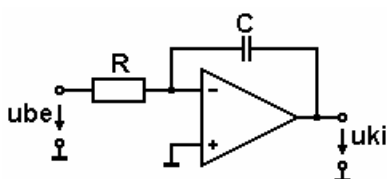
$$U_{ki} = \frac{R_v}{R_s} \cdot (U_{be2} - U_{be1})$$

Ha az R_s és R_v ellenállások azonosak, akkor a bemeneti feszültségek különbsége, ha nem, akkor a bemeneti feszültségek különbségének R_v / R_s -szerese jelenik meg a kimeneten.

Ideális egyenirányító kapcsolás jön létre, ha a diódás egyenirányító hidat a visszacsatoló ágban helyezük el. A R_s ellenálláson mindig az u_{be} feszültséggel arányos áram folyik, így a visszacsatoló ág meghajtása áramgenerátoros lesz. A diódák nyitófeszültségét a műveleti erősítő kimenete szedi magára, tehát nem jelenik meg a mérési eredményben. A Deprez műszeren átfolyó áram, a bemenet feszültség átlagértékének és az R_s ellenállásnak a hányadosával egyenlő. Az elrendezés igen előnyös tulajdonsága, hogy nyitófeszültségnél kisebb váltakozó feszültségek is mérhetők.



Integráló és differenciáló kapcsolásokkal integrálás és deriválás matematikai műveletek végezhetők el. Az integrálás művelet egy görbe alatti terület meghatározását, a deriválás vagy differenciál hányados képzése egy görbe változásfüggvényének előállítását jelenti.



Ha egy invertáló alapkapsolásban az R_v visszacsatoló ellenállást egy kondenzátorra cseréljük, akkor egy invertáló integráló kapcsolás keletkezik. A bemenetre kötött egyenfeszültség áramot hajt az R ellenálláson keresztül a látszólagos földpont felé. Mivel a műveleti erősítő bemenete szakadás ezért az áram a kondenzátorba folyik be, megemelve ezzel az invertáló bemenet potenciálját. A műveleti erősítő erre a potenciálváltozásra úgy válaszol, hogy kimeneti feszültségét negatív irányba egyenletes sebességgel növeli. A kimeneti feszültség az idővel arányosan nő. Négyyszög lefolyású bemeneti feszültség esetén, háromszög lefolyású lesz a kimeneti feszültség. Egy integrátor amplitúdó karakterisztikája egy -20 dB/dekád meredekségű egyenes mely, a 0 dB-es tengelyt $f_0 = 1 / 2 \pi R C$ értéknél metszi, a fázis karakterisztikája konstans -90° . Koszinuszos bemenőjel esetén a kimeneten 90° -al késő, tehát szinuszos jel keletkezik. Az ismertetett áramkör fázist fordít, tehát szinuszos bemenőjel esetén mínusz koszinuszos lesz a kimenőjel időbeli lefolyása.

Ha egy invertáló alapkapsolásban az R_s soros ellenállást egy kondenzátorra cseréljük, akkor egy invertáló differenciáló kapcsolás keletkezik. A bemeneti soros kondenzátor a bemenőjelnek csak a változását engedi át, a kimeneten a bemenőjel idő szerinti deriváltjával arányos feszültség jelenik meg. Háromszög lefolyású bemeneti feszültség esetén, négyyszög lefolyású lesz a kimeneti feszültség. A differenciátor amplitúdó karakterisztikája egy 20 dB/dekád meredekségű egyenes mely, a 0 dB-es tengelyt $f_0 = 1 / 2 \pi R C$ értéknél metszi, a fázis karakterisztikája konstans 90° . Szinuszos bemenőjel esetén a kimeneten 90° -al siető, tehát koszinuszos jel keletkezik. Az ismertetett áramkör fázist fordít, tehát koszinuszos bemenőjel esetén mínusz szinuszos lesz a kimenőjel időbeli lefolyása.

Az integrátor és a differenciátor kimeneti feszültségét leíró függvények:

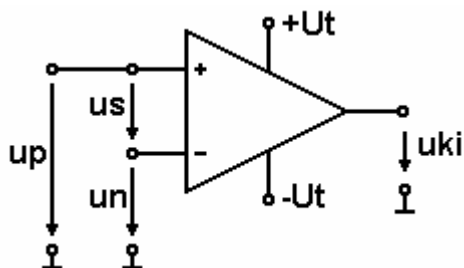
$$u_{ki}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t u_{be}(t) dt \qquad u_{ki} = -R \cdot C \cdot \frac{du_{be}}{dt}$$

Az integrátor és differenciátor kapcsolások csak az elvi felépítést mutatják be. A gyakorlatban használható áramkörökhöz kiegészítésekre van szükség, például integrátor esetén a kezdeti érték beállítása, az ofszet feszültség integrálásának megakadályozása, differenciátor esetén a gerjedésre való hajlam csökkentése, nagyfrekvencián jelentkező zaj elnyomása. A felsorolt kiegészítésekkel az áramkörök az analóg számítástechnika, a szabályozási és méréstechnikai rendszerek nagyon fontos eszközei.

A műveleti erősítők felhasználási területe, a felsoroltakon kívül is igen széles. Számos áramkör létezik hangerősítők, hangszínszabályozók, hangkeltők, aktív szűrők, teljesítményerősítők, tápegységek, analóg-digitális és digitális-analóg átalakítók témakörében. A nemlineáris alkalmazások közül a komparátor, Schmitt-trigger és multivibrátor kapcsolások a gyakoriak. A műveleti erősítők egy kicsiny néhány mm^2 -es szilícium lapka felületére integrálva készülnek. Az áramköröket 14 vagy 8 lábú DIP illetve DIL műanyag, valamint TO-99 es 8 kivezetéses kerek fém tokozással hozzák forgalomba. Az SMD technológiához is készülnek műveleti erősítők.

Áttekintés: a nyílthurkú erősítés hatása a visszacsatolt erősítésre

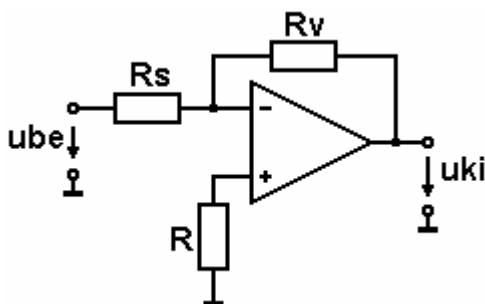
A műveleti erősítő feszültségei:



$$u_p - u_n = u_s$$

$$u_{ki} = A_{uo} u_s$$

Invertáló alapkapsolás:



$$u_p = 0$$

$$u_n = u_p - u_s = -u_s = -\frac{u_{ki}}{A_{uo}}$$

Az R_s - R_v ellenállásokon folyó áramok azonossága alapján:

$$\frac{u_{be} - u_n}{R_s} = \frac{u_n - u_{ki}}{R_v}$$

$$\frac{u_{be} - \frac{u_{ki}}{A_{uo}}}{R_s} = \frac{-\frac{u_{ki}}{A_{uo}} - u_{ki}}{R_v}$$

Az erősítés pontos értéke:

$$A_{uv} = -\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{A_{uo} R_v}{(A_{uo} + 1) R_s + R_v}$$

A nyílthurkú erősítés hatása a visszacsatolt erősítésre:

$$u_{be} = 100 \text{ mV}$$

$$R_s = 4 \text{ k}$$

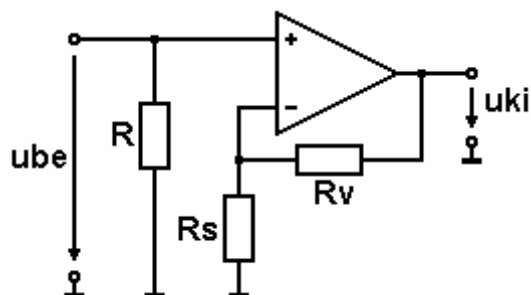
$$R_v = 200 \text{ k}$$

$A_{uo} =$	10	100	1000	10000
$u_{ki} [\text{V}] =$	-0,8197	-3,3113	-4,7574	-4,9746
$A_{uv} =$	-8,197	-33,113	-47,574	-49,746
$u_s [\text{V}] =$	-0,082	-0,0331	-0,00476	-0,000497

Az erősítés közelítő értéke $A_{uo} \rightarrow \infty$ esetén:

$$A_{uv} = -\frac{R_v}{R_s}$$

Neminvertáló alapkapsolás:



$$u_p = u_{be}$$

$$u_n = u_p - u_s = u_{be} - \frac{u_{ki}}{A_{uo}}$$

Az $R_v - R_s$ feszültségosztása alapján:

$$u_n = u_{ki} \frac{R_s}{R_s + R_v}$$

$$u_{be} - \frac{u_{ki}}{A_{uo}} = u_{ki} \frac{R_s}{R_s + R_v}$$

Az erősítés pontos értéke:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{A_{uo}(R_s + R_v)}{(A_{uo} + 1)R_s + R_v}$$

A nyílthurkú erősítés hatása a visszacsatolt erősítésre:

$$u_{be} = 100 \text{ mV}$$

$$R_s = 4 \text{ k}$$

$$R_v = 200 \text{ k}$$

$A_{uo} =$	10	100	1000	10000
$u_{ki} [\text{V}] =$	0,8361	3,3775	4,8525	5,0741
$A_{uv} =$	8,361	33,775	48,525	50,741
$u_s [\text{V}] =$	0,084	0,0338	0,00485	0,000507

Az erősítés közelítő értéke $A_{uo} \rightarrow \infty$ esetén:

$$A_{uv} = 1 + \frac{R_v}{R_s}$$
