

1 A műveleti erősítő

Horváth Márk
v15 2023.II.2.

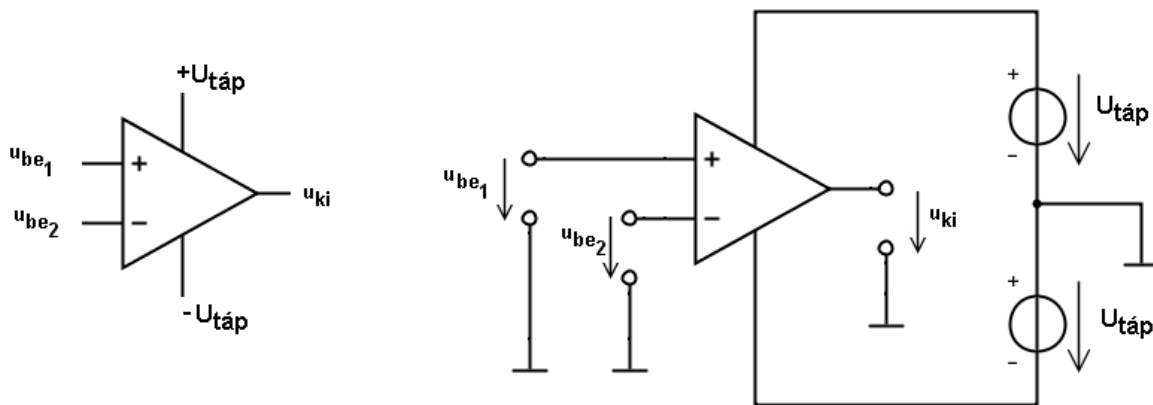
1.1 Bevezető

A műveleti erősítő (*operational amplifier*, "opamp") egy sokoldalúan felhasználható összetett áramkör, amely a legtöbb felhasználási céljára egy egyszerű modellel leírható, így be tudjuk alkalmazásait mutatni anélkül, hogy a belső felépítését részletesen kellene taglalnunk. Kiszámú külső alkatrész (főleg ellenállás és kondenzátor) segítségével számos különböző célú áramkör készíthető belőle. A gyakorlati alkalmazását jelentősen megkönnyíti, hogy integrált áramköri (*integrated circuit*, IC) kivitelben kapható.

Röviden jellemezve a műveleti erősítő egy DC-csatolt (azaz egyenáramú bemenettel is működő), nagyon nagy erősítésű, differenciális bemenetű erősítő. A differenciális bemenet azt jelenti, hogy (a nulla potenciálhoz képest) két bemeneti potenciál van, ezek különbsége adja a bemeneti feszültséget, amit erősít. A kimenete jellemzően aszimmetrikus, (vagyis a nullához képest egy pont), de léteznek differenciális kimenetű műveleti erősítők is. Negatív visszacsatolás segítségével könnyen beállítható az erősítés mértéke, és nagyon jó linearitás érhető el (azaz kicsi lesz a torzítás).

A műveleti erősítők hagyományosan kettős tápfeszültségről működnek (vagyis a nullához képest van egy pozitív és egy negatív tápfeszültség is). Egy tápfeszültségről is használhatóak (tehát nulla és egy pozitív táp), főleg az újabb típusok, amelyeknél a bemeneti és kimeneti jelek jobban megközelíthetik a tápfeszültség szintjeit (ún. rail-to-rail megoldás), az ilyen megoldás azonban nem tud negatív kimenő jelet adni (ha pl. AC jelet akarunk erősíteni).

1.2 A műveleti erősítő működése, tulajdonságai



1. ábra: Balra: a műveleti erősítő rajzjele; jobbra: tápfeszültség bekötése, be- és kimenetek értelmezése

A hagyományos műveleti erősítő általános szimbóluma látható az 1. ábra bal oldalán. Van két tápfeszültsége, két bemenete és egy kimenete. Az egyszerűsített rajzjelnél szokás a tápfeszültség lábakat leghagyni, ez főleg az általános alkalmazások bemutatásánál hasznos (átláthatóbb legyen a kapcsolás), míg a konkrét megépítési célú kapcsolási rajzoknál célszerű feltüntetni, főleg akkor, ha több lehetőség is van a bekötésére. (A továbbiakban többnyire el fogjuk hagyni a tápfeszültségek feltüntetését az átláthatóság kedvéért.) Az ábra jobb oldalán

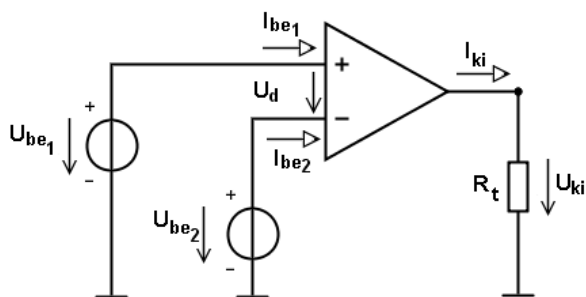
láthatjuk a tápfeszültségek bekötését, valamint a be- és kimenetek értelmezését. Vegyük észre, hogy a nulla potenciált önmagában nem kell bekötni az erősítőbe, de pl. ehhez képest nézzük a bemenetet és kimenetet. A nulla potenciál az erősítő számára a tápfeszültségek számtani közepe (tehát ha pl. a negatív sarkot földeljük, és így az a nulla potenciál, akkor az erősítő nulláját a pozitív táp potenciál felére kell megemelni, ilyenkor a bemenő jeleket is el kell tolni egyenszinttel).

1.2.1 Az erősítés

A műveleti erősítő paramétereinek és működésének a magyarázatához vegyük a 2. ábra szerinti kapcsolást (ahol a kimenetre az R_t terhelő ellenállást kötöttük, a bemenetre pedig egy-egy feszültségforrást). (Az egyes feszültségek és áramok egyenáramon és váltakozóáramon is értelmezhetőek, az erősítő paramétereit változhatnak a frekvencia függvényében.)

A mínusz jellel jelölt bemenetet *invertáló*, a plusszal jelöltet *nem invertáló* bemenetnek nevezzük. Az áramkör a két bemenet közti feszültséget (itt U_d , mint differencia azaz különbség) erősíti fel és adja ki a kimenet és a nulla között (a nem invertáló bemenet jeléből vonjuk ki az invertáló bemenetét). A két bemenet lehetővé teszi az ún. közös módusú zavarjelek elnyomását. Ez azt jelenti, hogy ha a bemeneteken (amely jeleket a nullához képest értelmezzük) valamilyen nagyjából azonos értékű zavar ül (a nullához képest), pl. amit a hozzávezetésen induktív módon szedtek fel (sugárzott zavar), akkor a különbségképzés miatt ez a zavaró komponens az erősítőben jelentősen csillapodik.

Itt jegyeznék meg, hogy (ebben a témakörben) általában a *bemenet* kifejezést az információ tartalommal bíró jelek bevezetésére értjük, a tápfeszültség bevezetéseket nem szoktuk bemenetnek hívni. A műveleti erősítőnél azért is fontos a megkülönböztetés, mert a bemeneteket a rajzjelen + és – szimbólumok jelölik, ezeket könnyű összekeverni a pozitív és negatív tápfeszültséggel.



2. ábra: Segítség a műveleti erősítő jellemzőinek értelmezéséhez (tápfeszültség feltüntetése nélkül)

A nyílthurkú feszültség erősítés (*open-loop gain*) a kimeneti feszültség és bemenetek közötti feszültségkülönbség hányadosa:

$$A_{U0} = \frac{U_{ki}}{U_{be1} - U_{be2}} = \frac{U_{ki}}{U_d}$$

Az A_{U0} jelölésben az A az *amplification*¹ (erősítés) szóra utal, U a feszültségre, az O pedig jelzi, hogy *open loop*, nyílthurkú, azaz visszacsatolatlan esetről van szó (de O helyett gyakran nullát mondunk és írunk).

¹ Amikor az erősítés nagyságáról van szó (és nem a fogalomról), az angolban inkább a *gain* kifejezést használják. Az *amplificatio* viszont a latinból eredően szélesebb körben ismert.

Ritkábban találkozhatunk szimmetrikus kimenetű műveleti erősítővel. Ilyenkor a bemeneti különbséget erősítésszeresést a két kimenet közötti különbségként kapjuk meg.

Az ideális műveleti erősítő nyílthurkú erősítése végtelen. A gyakorlatban jellemzően a több százéertől a többmillióig terjed, amit gyakran végtelennek vehetünk a számításokban.

1.2.2 Szimmetrikus és közös módusú vezérlés, közös módusú elnyomás

A bemenő jeleket felírhatjuk őket két komponens összegeként. Ha a két bemenő jel U_{be1} és U_{be2} , az egyes komponensek:

$$K = \frac{U_{be1} + U_{be2}}{2}$$

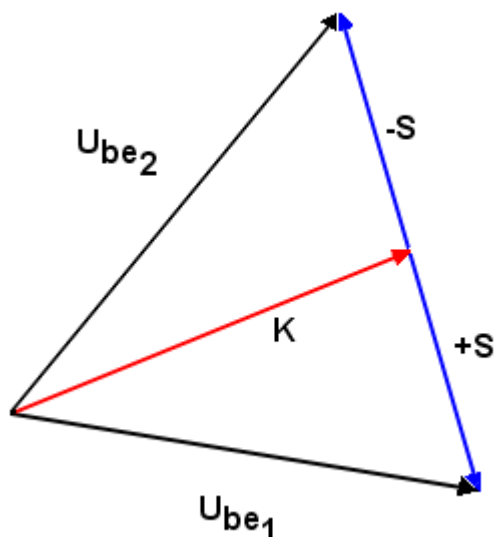
$$S = \frac{U_{be1} - U_{be2}}{2}$$

ahol K az ún. közös módusú összetevő, S az ún. szimmetrikus összetevő. Ekkor a bemenő jelek felírhatóak ezek segítségével:

$$U_{be1} = K + S$$

$$U_{be2} = K - S$$

Ez a felbontás váltakozóáramú jeleknél is megtehető. Ekkor az U_{be} , S és K értékek komplex számok (avagy vektorok, illetve villamosságtani kifejezéssel fazorok) lesznek (hiszen amplitúdó és fázis információt is hordoznak). Azonos frekvenciájú bemenő jelek esetén felrajzolhatunk egy fazorábrát:



3. ábra: szimmetrikus és közös módusú komponensek vektoriális ábrázolása

Ha a két bemenő jel megegyezik ($U_{be1}=U_{be2}=K=U_{beK}$), akkor a szimmetrikus komponens nulla, csak közös módusú összetevő van. Ezt a vezérlési módot önmagában nem használjuk, hanem ezzel modellezzük a korábban említett közös módusú zavarok (*common mode interference*) hatását. Ideális esetben egy erősítő kimenete tisztán közös módusú vezérlés

esetén nulla. A valóságban az áramköri elemek pontatlansága, aszimmetriája miatt valamekkora (kis) kimenet ilyenkor is van.

Ha a két bemenő jel egymás ellentettje ($U_{be1} = -U_{be2} = S = U_{beS}/2$), tisztán szimmetrikus vezérlésről beszélünk. Ilyenfajta (ún. differenciális) jelátvitelt sok helyütt használnak mind az analóg technikában (pl. stúdiótechnika *balanced audio*), mind a digitális technikában (pl. USB, RS-485, CAN-busz). A differenciális jelátvitelnél a sugárzottan érkező zavarok a két jelvezetéken körülbelül hasonló nagyságúak lesznek (a két vezeték egymáshoz közel van), így a zavar közös módusú, míg a hasznos jel szimmetrikus. Így amikor a két vezeték feszültségének különbségét vesszük (pl. egy műveleti erősítő segítségével), akkor a kivonás miatt a hasznos jel erősödik, a zavar, zaj pedig csökken.

Szimmetrikus bemenet esetén a szimmetrikus erősítést definiálhatjuk:

$$A_{U_S} = \frac{U_{ki}}{U_{beS}}$$

Közös módusú bemenet esetén a közös módusú erősítést definiálhatjuk:

$$A_{U_K} = \frac{U_{ki}}{U_{beK}}$$

A közös módusú elnyomás (*common mode rejection ratio*, *CMRR*, vagy KME) a kétfajta erősítés hányadosa:

$$CMRR = \frac{A_{U_S}}{A_{U_K}}$$

vagy decibelben kifejezve:

$$CMRR[dB] = 20 \lg \frac{A_{U_S}}{A_{U_K}}$$

Ideális erősítőnél a közös módusú bemenethez tartozó kimenet, így a közös módusú erősítés is nulla, ezért a közös módusú elnyomás végtelen.

1.2.3 Bemeneti ellenállás

A bemeneti ellenállás az egyes bemeneti feszültségek és a hozzá tartozó bemenő áramok hányadosa, ebből viszont többféle is értelmezhető.²

$$R_{be1} = \frac{U_{be1}}{I_{be1}} ; R_{be2} = \frac{U_{be2}}{I_{be2}} ; R_{be_d} = \frac{U_d}{I_d}$$

² Itt nagybetűvel jelölt statikus ellenállást használtunk, mert a műveleti erősítők egyenáramon is működnek. Valójában beszélni kellene a bemeneti ellenállás frekvenciafüggéséről is, ezt azonban mellőzzük, a műveleti erősítőknek ugyanis egyik lényeges tulajdonsága az, hogy a bemeneti ellenállásuk eléggé nagy és nagyfrekvencián egyébként se működnek jól.

Ha a bemeneti ellenállás végtelen, akkor a bemeneti áram nulla lesz. A gyakorlatban mindhárom ellenállás elég nagy (megaohmtól a teraohmig akár)³, ezért a megkülönböztetésükkel nem szoktunk foglalkozni, és gyakran végtelennek vesszük.

1.2.4 Kimeneti ellenállás

A kimeneti ellenállás az erősítő kimeneti fokozatának a Thevenin-féle (feszültséggenerátoros) helyettesítőképében szereplő belső ellenállásként értelmezhető, azaz:

$$R_{ki} = \frac{U_{ki_Ü}}{I_{ki_RZ}},$$

ahol $U_{ki_Ü}$ az üresjárású feszültség (amikor $R_i = \infty$), I_{ki_RZ} a rövidzárási áram (amikor $R_i = 0$).

Ha a kimeneti ellenállás nulla, akkor a kimenő feszültség független lesz a terheléstől. A gyakorlatban a kimeneti ellenállás száz ohm alatt van, gyakran tíz-húsz ohm körül. Negatív visszacsatolás alkalmazásakor az eredő kimeneti ellenállás közel nulla lesz. A nagy bemeneti és kis kimeneti ellenállás kombináció teszi a műveleti erősítőt alkalmassá sokféle kapcsolás megvalósítására.

A gyakorlatban nem célszerű a képlet szerinti módon mérni a kimeneti ellenállást, ugyanis az erősítők kimeneti fokozata általában nem bírja el a rövidzárási áramot, hanem vagy tönkremegy, vagy van benne áramkorlát (többnyire néhány 10mA), ekkor viszont az meghamisítja a mérést. Ellenállásokkal való terhelésnél is felírható megfelelő képlet a kimeneti ellenállás kiszámítására a mérés céljaira.

1.2.5 Linearitás

A linearitás az $U_{ki}-U_{be}$ függvényt jellemzi. Ha ez a függvény egy origón átmenő egyenes (vagyis lineáris), akkor a kimenő feszültség mindig konstansszoros a bemenő feszültségnek. Ilyenkor a kimenő jelalak hasonlít a bemenő jelalakhoz, nincsen torzítás. Ha a függvény egyenes, de nem az origón megy át, akkor a kimenő jel egyenáramúlag eltolódik az előbbi esethez képest. Ha a függvény nem egyenes (nemlineáris), akkor a kimenő jelalak torzul a bemenőhöz képest. A linearitás azt mondja meg, mennyire közel van a függvény az egyeneshez.

A műveleti erősítő tranzistorokból épül fel, így elvileg nemlineáris. Nyílthurkú üzemmódban azonban a közel végtelen erősítés miatt a kimenő jelünk le lesz vágva, így a linearitás nem számít. Negatívan visszacsatolt módban az átviteli függvény közel lineáris lesz (amíg a tápfeszültség le nem vágja).

1.2.6 Ofszethiba

A bemeneti ofszethiba azt jelenti, hogy a belső felépítés tökéletlensége folytán a kimeneten akkor is mérhetünk nem nulla feszültséget, ha a bemenetek különbsége nulla. A bemeneti

³ A bipoláris tranzistoros bemenetűeknek kisebb, a FET-es bemenetűeknek nagyobb bemeneti ellenállása van. Néhány típusnál a bemenetek között diódaként kötött tranzistorok vannak ($\pm 0,7$ voltos vágó), ilyenkor az ellenállása jóval kisebb lesz

offset feszültség (*input offset voltage*) az a feszültség, amit a bemenetek közé kell kapcsolni ahhoz, hogy a kimeneten nulla legyen.

Ez jellemzően mV nagyságú a hagyományos erősítőkből. Speciális, ún. zero-drift (ill. auto-zero) opampoknál ez ennek töredéke, μV vagy nV nagyságú lehet.

A kimeneti offset hiba a bemeneti offset erősítésszerese. Egy visszacsatolt erősítőnél ez könnyebben mérhető lehet a bemeneti offsetnél.

1.2.7 Slew Rate

A Slew Rate (SR) az erősítő maximális kimeneti jelváltozási sebessége, egységnyi idő alatti feszültségváltozásként értelmezve, általában $\text{V}/\mu\text{s}$ mértékegységben. Ezt legegyszerűbben négyszögjel bemenettel lehet szemléltetni és mérni. Ha a bemeneti négyszög- (trapéz-) jel felfutási sebessége nagyobb, mint az erősítő SR-je, akkor a kimeneti jel felfutási sebessége az SR lesz. Ha a periódusidő túl rövid, akkor a kimenő jel nem fut fel a csúcserőig, mielőtt a bemenő jel újra csökkenni kezd, így a kimenet háromszögjel lesz. Általánosságban ha van egy bemenő jelünk, azt az erősítéssel megszorozva megkapjuk a kívánt kimeneti jelet. Ennek a legnagyobb felfutási meredekségét kell összehasonlítani az SR-rel. Ha utóbbi a nagyobb, akkor az erősítő elő tudja állítani a kimeneti jelet torzulás nélkül.

Ha a bemenő jelünk egy szinuszos jel:

$$u_{be} = U_{be\text{cs}} \sin \omega t$$

a kívánt kimeneti jel:

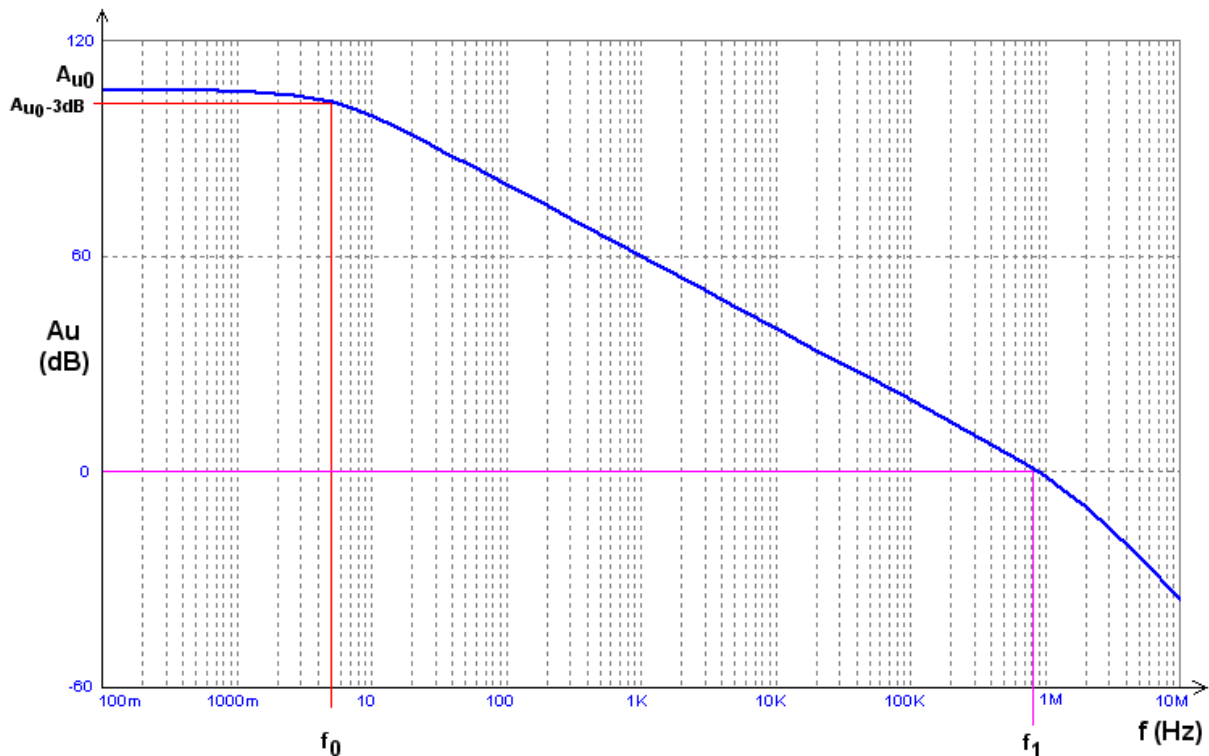
$$u_{ki} = A_u \cdot U_{be\text{cs}} \sin \omega t$$

Ennek a legnagyobb meredeksége a nullátmenetnél van, deriválással kapható meg:

$$\left. \frac{du_{ki}}{dt} \right|_{t=0} = \omega \cdot A_u \cdot U_{be\text{cs}} \cos \omega t \Big|_{t=0} = \omega \cdot A_u \cdot U_{be\text{cs}}$$

A Slew Rate jellemzően a néhány tized $\text{V}/\mu\text{s}$ -tól a többszáz $\text{V}/\mu\text{s}$ -ig terjed a gyakorlatban.

1.2.8 Frekvenciatartománybeli viselkedés



4. ábra: Műveleti erősítő frekvenciafüggése (visszacsatolás nélkül)

A műveleti erősítők a frekvenciatartományban vizsgálva aluláteresztő jelleget mutatnak, vagyis a frekvencia növelésével az erősítés csökken. Törésponti frekvenciának (f_0 , az ábrán piros vonallal jelölve) - villamosságtani tanulmányaink alapján - a nulla frekvenciához tartozó erősítéshez képest 3 decibellel kisebb erősítéshez tartozó frekvenciát nevezzük. Nyílthurkú (visszacsatolás nélküli) esetben a valódi műveleti erősítőknél ez egy nagyon alacsony érték (néhány hertztől néhány tíz hertzig terjed). A gyakorlatban sokszor nem adják meg az adatlapon sem a törésponti frekvenciát, sem a nyílthurkú erősítést (ezeknek úgyszólván nagy gyártási szórása van), hanem a kettő szorzatát, az ún. *Gain Bandwidth Product*-ot (erősítés-sávszélesség szorzat, GBWP vagy GBP). Az átviteli függvény a töréspont után -20dB/dekád meredekségű, ezért ezen a szakaszon a frekvencia (sávszélesség) és a hozzátartozó erősítés szorzata állandó. Így ez itt megegyezik az egységnyi erősítéshez (0dB) tartozó frekvenciával is (f_1 , ábrán lila vonallal jelölve). A törésponti frekvencia (egyben a felső határfrekvencia) nagyon alacsony, de negatív visszacsatolással növelhető; így is azonban jellemzően hangfrekvenciás tartományban lehet jól használni (de maximum néhány megahertzig).

Megj.: az ábrán is látható, hogy egynél több töréspontja van a függvénynek, azonban az elsőt kivéve ezek a 0dB erősítésnél kisebbhez tartoznak, ahol nem szoktuk használni az erősítőt, így ezekkel általában nem foglalkozunk.

1.2.9 Az ideális műveleti erősítő

A műveleti erősítős áramkörök viselkedését sok szempontból jó közelítéssel leírhatjuk az ideális műveleti erősítő segítségével. Jellemzői:

- Végtelen nagy bemeneti ellenállás (vagyis $I_{be1}=I_{be2}=0$, más jelöléssel I_{be+} és I_{be-})
- Végtelen nagy erősítés ($A_{U0}=\infty$)
- Nulla kimeneti ellenállás (ideális feszültséggenerátoros kimenet)
- Tökéletes linearitás (az $U_{ki} - U_{be}$ függvény lineáris)
- Nulla ofszethiba (ha a bemenetek közötti feszültség nulla, akkor a kimenet is nulla)
- Végtelen sáv szélesség (frekvenciafüggetlen)
- Végtelen közös módusú elnyomás

1.2.10 A valódi műveleti erősítő

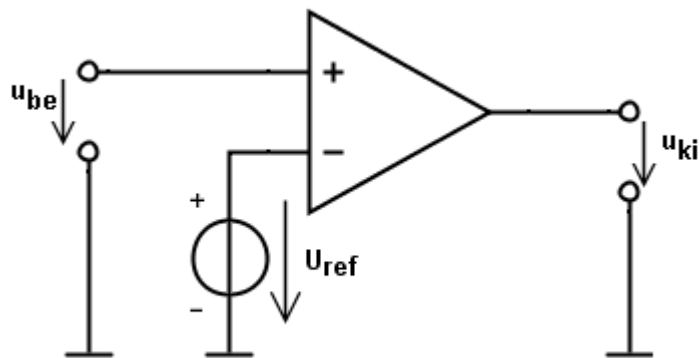
A valódi műveleti erősítő jellemzői az egyes típusoknál nagyon különbözőek lehetnek. Alább megadjuk az egyik legrégebb óta használt típus, a $\mu A741$ néhány paraméterének átlagos értékét, illetve bizonyos jellemzőit. (A modern típusoknál bizonyos értékek sokkal előnyösebbek is lehetnek, továbbá az értékeknek nagy gyártási szórása illetve hőmérsékletfüggése lehet.)

- Bemeneti ellenállás : $2M\Omega$
- Kimeneti ellenállás : 75Ω
- Bemeneti kapacitás : $1,4pF$
- A kimeneti feszültséget a tápfeszültség korlátozza (ami max. kb. $\pm 20V$), azaz a kimeneti feszültségek maximális értéke U_{kimax} , minimális értéke $-U_{kimax}$ lehet, ami kb. 1...1,5 voltal kisebb a tápfeszültségnél (abszolútértékben)
- A bemeneti feszültség korlátozott (szintén nem haladhatja meg a tápfeszültséget)
- Ofszethiba (bemenetek között) : max. $1mV$ (azaz a bemenetek között ennyi feszültség kell ahhoz, hogy a kimenet nulla legyen)
- Közös módusú elnyomás (CMRR) : $70...90dB$
- Nyílthurkú erősítés (A_{U0}) : $2 \cdot 10^5$
- Maximális jelváltozási sebesség (*slew rate*, *SR*) : $0,5V/\mu s$
- Több töréspontos aluláteresztő jellegű átviteli függvény
- Törésponti frekvencia ($5...10Hz$)

1.3 A műveleti erősítő alkalmazásai

1.3.1 Komparátorok

1.3.1.1 Referencia-feszültséggel ellátott komparátor



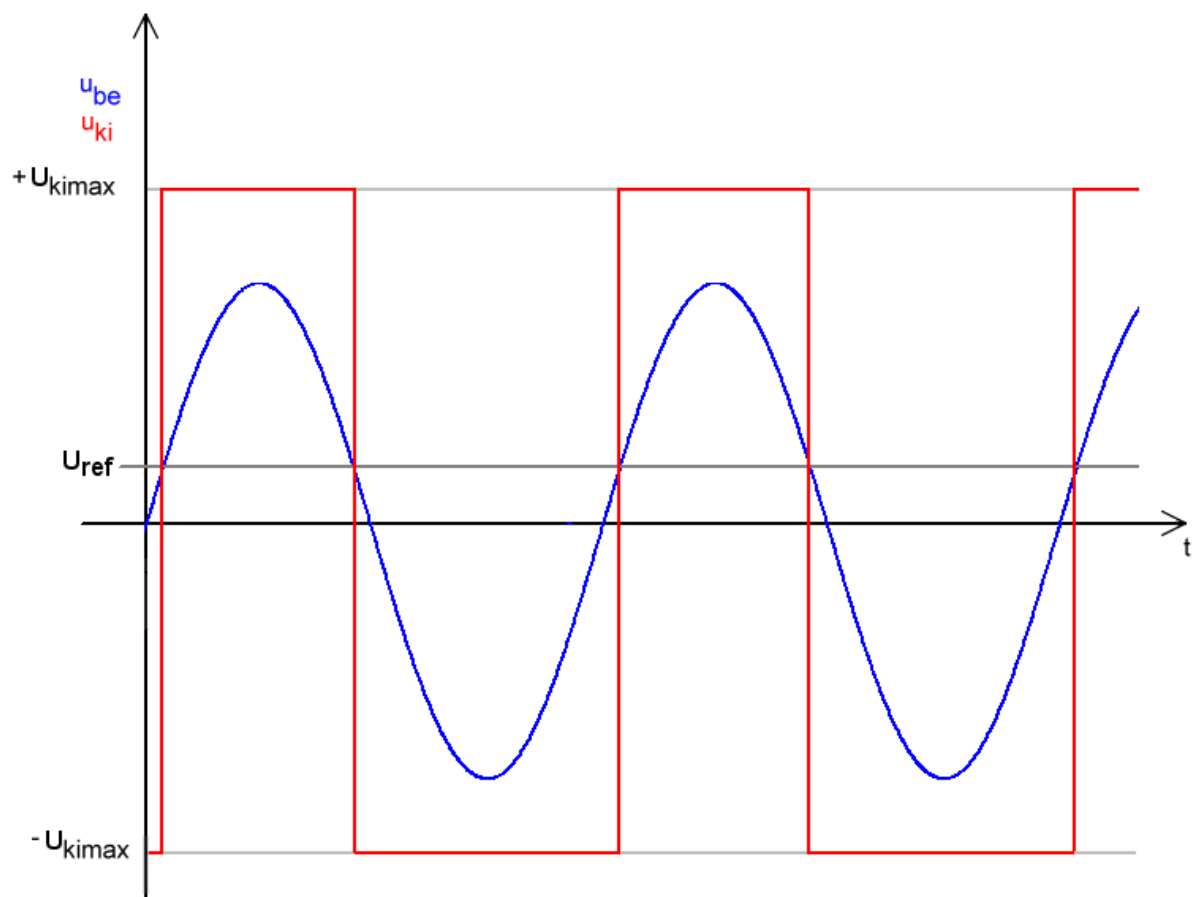
5. ábra: Referenciafeszültséggel ellátott neminvertáló komparátor

A 5. ábra egy referenciafeszültséggel ellátott komparátor (összehasonlító) kapcsolást mutat. Ha a referenciafeszültség nulla, akkor a kapcsolást nullkomparátornak hívják.

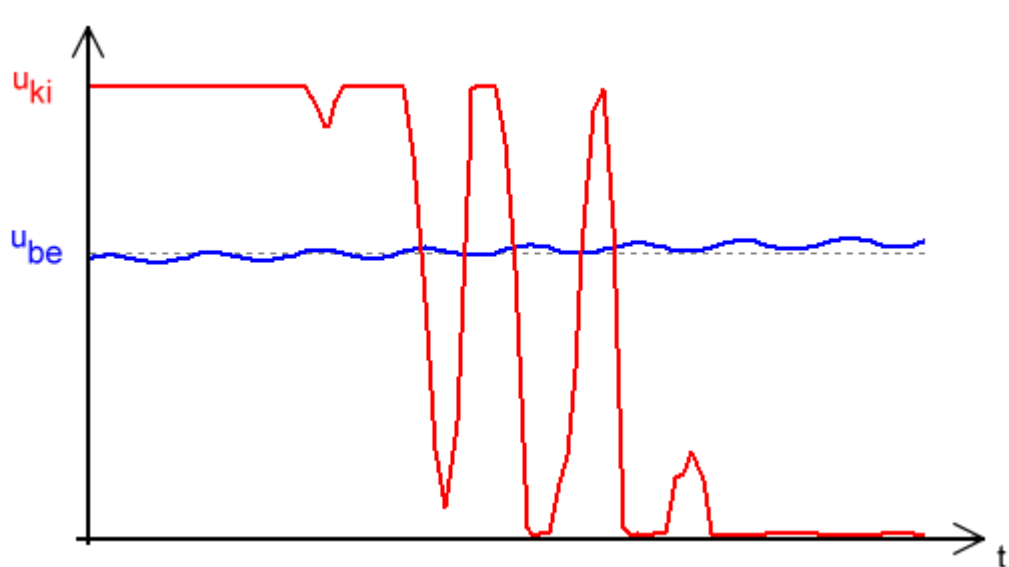
A komparátor a bemenő jelet egy referencia feszültséggel hasonlítja össze. A kapcsolás nyílthurkú (vagy más változatban pozitív visszacsatolású), ezért a kimenő jel már nagyon kis bemenő jelnél kiül a maximális (szaturációs) kimeneti szintre ($\pm U_{kimax}$), ami a tápfeszültségnél (abszolút értékben) valamivel kisebb. Ily módon az ábrán látható neminvertáló bekötésű komparátornál ha a bemenő jel nagyobb, mint a referencia feszültség, a kimenet a $+U_{kimax}$ szintre ül ki; ha pedig a bemenő jel kisebb, mint a referencia, a kimenet a $-U_{kimax}$ értéket veszi fel. A kimenetet tehát binárisnak is tekinthetjük. Egy pozitív referenciafeszültséggel ellátott komparátor szinuszos bemenőjelre adott válaszát mutatja a 6. ábra.

A komparátor csak kisebb-nagyobb jellegű összehasonlításra képes, két (független) jel egyenlőségét nem állapítja meg. Ez azért van, mert a bemenő feszültségek már nagyon kis eltérésénél is kiül a maximális szintre a kimenet; két független feszültséget pedig nagyon nehéz kellően egyező értékre beállítani.

A fix referenciafeszültségű komparátoroknál ideális esetben amikor a bemeneti jel eléri és meghaladja referencia értékét, a kimeneti jelben egy fel- vagy lefutó él jelenik meg (ahogy a 6. ábrán is látszik). Ha a bemeneti jel zajos, akkor a referencia közelében a zaj miatt többször oda-vissza átmegy a jel a referencia szinten, így a kimeneten is több él fog megjelenni gyors egymásutánban. Ezt mutatja a 7. ábra, ahol a szürke szaggatott vonal a referencia szintje, kék a bemeneti jel, piros a kimenő jel. Ez probléma lehet pl. olyan digitális rendszereknél, amelyek fel- vagy lefutó élekre reagálnak; hiszen egy helyett véletlenszerűen több élt kapnak. A kapott feszültség jelalak hasonló ahhoz, amit kapcsolóknál is gyakran látunk - ezt pergésnek vagy prellnek hívjuk -, és amit a kapcsoló fémlemezének a mechanikai rezgése okoz.

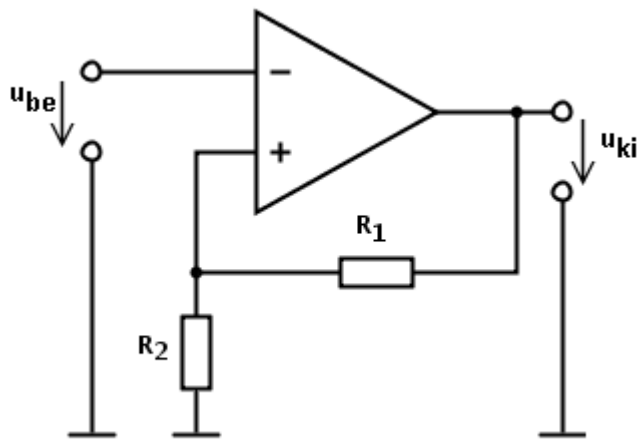


6. ábra: Neminvertáló komparátor kimenő jele szinuszos bement és pozitív U_{ref} esetén



7. ábra: Zajos jel hatása komparátor kimenetére (szimulációs szoftverben)

1.3.1.2 Hiszterézises komparátor



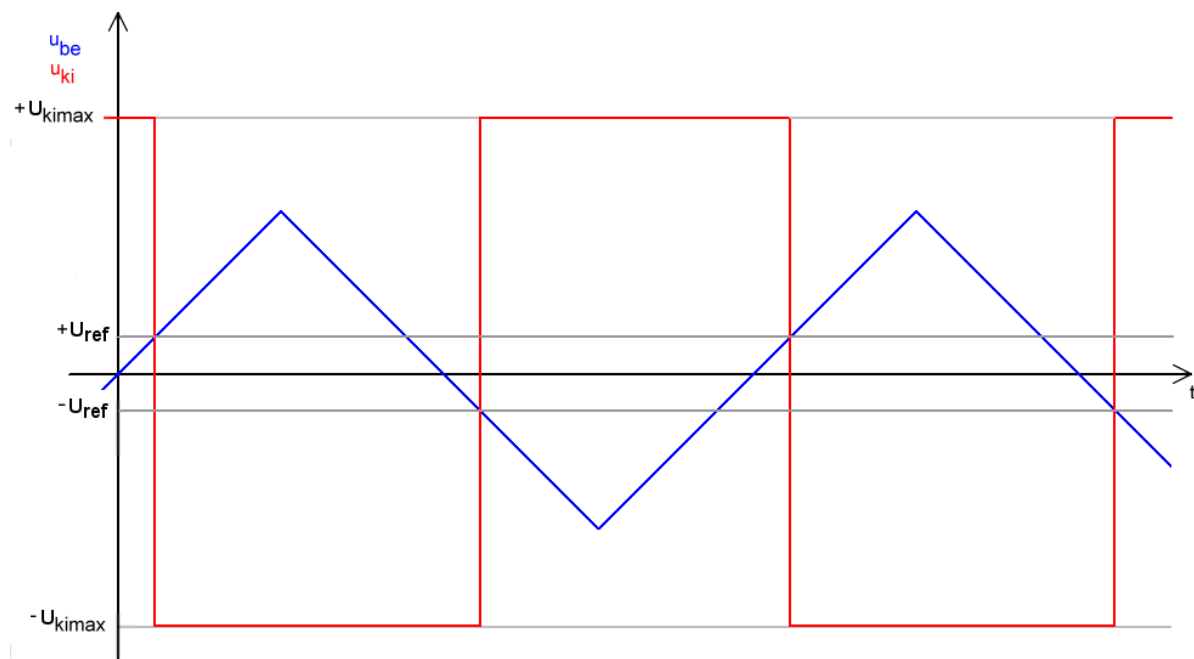
8. ábra: Invertáló hiszterézises komparátor

A 8. ábra egy ún. hiszterézises invertáló komparátor kapcsolást ábrázol. Ennél a referenciefeszültség nem állandó (és nem generátor állítja elő), hanem a kimeneti jelből van visszaosztva az R_1 és R_2 által képzett feszültségosztóval (azaz az R_2 feszültsége lesz a referencia). A kimeneti jel a korábbiak szerint $+U_{ki\max}$ és $-U_{ki\max}$ értékeket veheti fel, így a referenciefeszültség a

$$+U_{ref} = +U_{ki\max} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

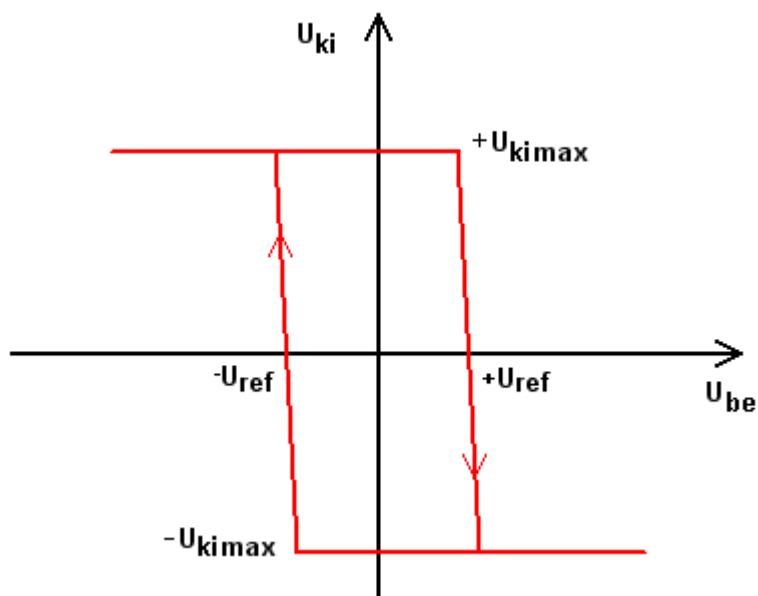
$$-U_{ref} = -U_{ki\max} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

értékek valamelyikét fogja felvenni, a kimenet aktuális állapotától függően.



9. ábra: Hiszterézises invertáló komparátor kimeneti jele háromszög bemenő jel esetén

A 9. ábrán látható egy ilyen kapcsolás kimeneti jele, ha a bemeneti jel háromszög alakú. Amikor a bemenő jel nagyobb, mint $+U_{ref}$, a kimenet (az invertáló jelleg miatt) $-U_{kimax}$ -ra billen, ezzel együtt a $-U_{ref}$ lesz az aktuális referencia. Amikor ezután a bemenő jel kisebb lesz, mint $-U_{ref}$, a kimenet átbillen $+U_{kimax}$ -ba, és az aktuális referencia a $+U_{ref}$ lesz. Ezzel a kapcsolás összehasonlítási pontossága romlik, hiszen nem egy feszültséghez hasonlítunk, hanem lényegében egy ($+U_{ref}$ és $-U_{ref}$ közötti), ún. hiszterézistartományhoz képest. Ez azonban nem gond olyankor, amikor a bemenő jel nagy (az említett tartománynál nagyobb) változásait akarjuk figyelni. Cserébe a kapcsolás kevésbé lesz érzékeny a zajokra, zavarokra, mint a fix referencia feszültségű komparátor. A hiszterézises megoldásnál, ha a hiszterézis tartomány nagyobb, mint a várható zajszint, amint a kimenő jel átbillen, a referencia is billen, így a zaj „nem éri utol”. Így a kimenet zajos bemenet esetén sem fog olyan többszöri élváltást mutatni, mint amit a 7. ábrán láttunk.



10. ábra: Hiszterézises invertáló komparátor átviteli karakterisztikája

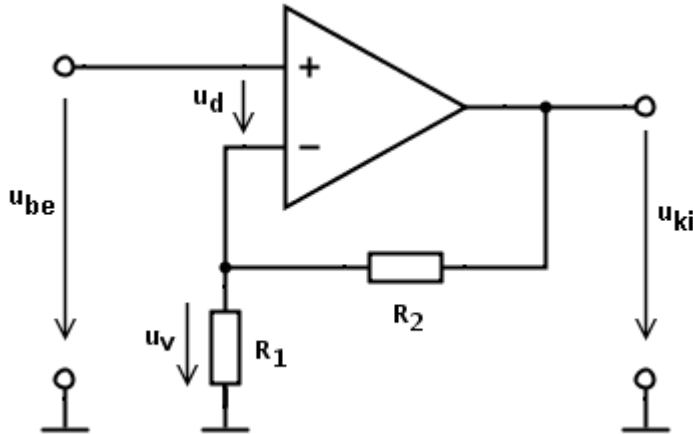
A 10. ábrán látható a kapcsolás U_{be} - U_{ki} átviteli karakterisztikája. A nyilak mutatják, hogy az alsó ($-U_{kimax}$) állapotból a negatív U_{ref} -nél, a felső ($+U_{kimax}$) állapotból a pozitív U_{ref} -nél billen át. A $+U_{ref}$ és $-U_{ref}$ közötti feszültségkülönbséget hiszterézisnek hívjuk.

Az ilyen elvű kapcsolásokat Schmitt-triggernek is hívják.

Bár komparátort építhetünk a fentiek szerint műveleti erősítőből, a gyakorlatban célszerű az eleve erre a célra tervezett komparátor IC-k használata. A műveleti erősítők ugyanis alapvetően visszacsatolt üzemi módra vannak tervezve, telítési üzemi mód esetén a jelváltozási sebességük csökkenhet (vagyis lassabban reagál a bemenő jelszint váltásra), illetve a hagyományos opampok kimenő feszültsége nem kompatibilis a szokásos digitális technikai jelszintekkel. Bizonyos műveleti erősítőknél probléma lehet az is, hogy a belső kapcsolásában a bemenetek között diódás vágóáramkör van, ami nem engedi a bemenetek közötti feszültséget egy bizonyos érték fölé nőni.

1.3.2 Negatív visszacsatolású erősítő alapkapsolások

1.3.2.1 Neminvertáló erősítő kapcsolás



11. ábra: Neminvertáló erősítő alapkapsolás

Vizsgáljuk meg a 11.ábrán látható neminvertáló erősítő kapcsolást! Itt a kimenet egy ellenálláson keresztül az invertáló bemenetre van kötve, ezzel egy negatív visszacsatolást valósítunk meg. Úgy tekinthetjük, hogy a kimenő jel egy részét kivonjuk a bemenetből, azaz a kapcsolás U_{be} bemeneti jeléből a kimenettel arányos U_v -t kivonva kapjuk U_d -t, ami a műveleti erősítő „valódi” bemeneti feszültsége. Ez azt eredményezi, hogy a bemenetek közötti u_d feszültség nagyon kicsi, közel nulla lesz. Ha ugyanis a bemeneti szimmetrikus feszültség nő, akkor a kimenet is nő, viszont akkor a visszacsatolás által a bemenetből kivont mennyiség is nő, ami tehát csökkenti a bemenetet, ezzel ellentartva a bemenet növekedésének.

Az U_d (negatív visszacsatolás esetén) közel nulla voltának igazolásához tekintsük az alábbi levezetést. Abból indulunk ki, hogy a műveleti erősítő bemeneti árama közel nulla, így az R_1 - R_2 alkotta feszültségosztó terheletlennek tekinthető. Felírjuk a feszültségosztót, a bemeneti feszültségekre vonatkozó hurkot és az erősítő alapegyenletét. Az átláthatóság kedvéért használjuk a visszacsatolások elméletéből ismert B jelölést a feszültségosztó átvitelére és az A jelölést a nyílthurkú erősítésre.

$$\begin{cases} U_v = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_{ki} \cdot B \\ U_{ki} = U_d \cdot A_{u0} = U_d \cdot A \\ U_{be} = U_d + U_v \end{cases}$$

$$U_d = U_{be} - U_v = U_{be} - U_{ki} \cdot B = U_{be} - U_d \cdot AB$$

$$U_d \cdot (1 + AB) = U_{be}$$

$$U_d = U_{be} \frac{1}{1 + AB} = U_{be} \frac{1}{1 + A_{u0} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$\lim_{AB \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + AB} = 0$$

Amíg az AB szorzat elég nagy (A_{u0} elég nagy, és B nem túl kicsi), addig az U_d értéke is elég kicsi lesz. A következő levezetésből kiderül, hogy ez azt jelenti, hogy az eredő erősítést nem szabad túl nagyra (A_{u0} -hoz közel lévőre) választanunk, hogy teljesüljön a feltétel.

Az $U_d=0$, illetve a műveleti erősítő bemeneteire vonatkozó $I_{be+}=I_{be-}=0$ közelítésből kiindulva levezethetjük a kapcsolás erősítését. Ha $U_d=0$, akkor $U_v=U_{be}$ és így

$$U_{be} = U_v = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_{u_ninv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Pontosabban levezetve (az U_d levezetéséhez hasonló módon):

$$\begin{cases} U_v = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_{ki} \cdot B \\ U_{ki} = U_d \cdot A_{u0} = U_d \cdot A \\ U_{be} = U_d + U_v \end{cases}$$

$$U_{ki} = U_d \cdot A = A \cdot (U_{be} - U_v) = A \cdot (U_{be} - U_{ki} \cdot B)$$

$$U_{ki}(1 + AB) = A \cdot U_{be}$$

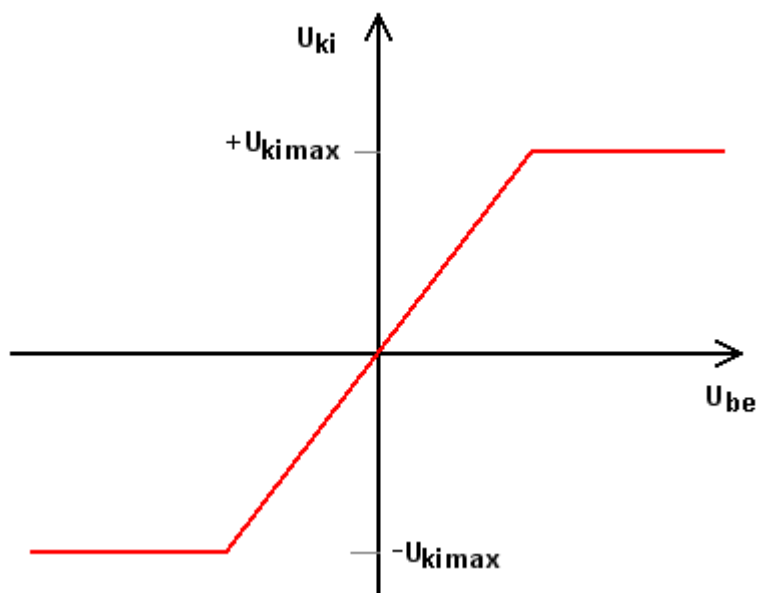
$$A_{u_ninv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A}{1 + AB} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{1}{AB} + 1}$$

$$\lim_{AB \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{B}}{1 + \frac{1}{AB}} = \frac{1}{B} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Látjuk tehát, hogy itt is a közelítő képlet ($1/B$) addig igaz, amíg az AB szorzat kellően nagy, másképpen, amíg az eredő erősítés kellően alatta marad A_{u0} értékének. Ezt egyéb szempontból is szerencsés betartani, egyrészt a linearitás is javul a negatív visszacsatolással, másrészt a felső határfrekvencia is nagyobb lesz, mint a következőkből kiderül.

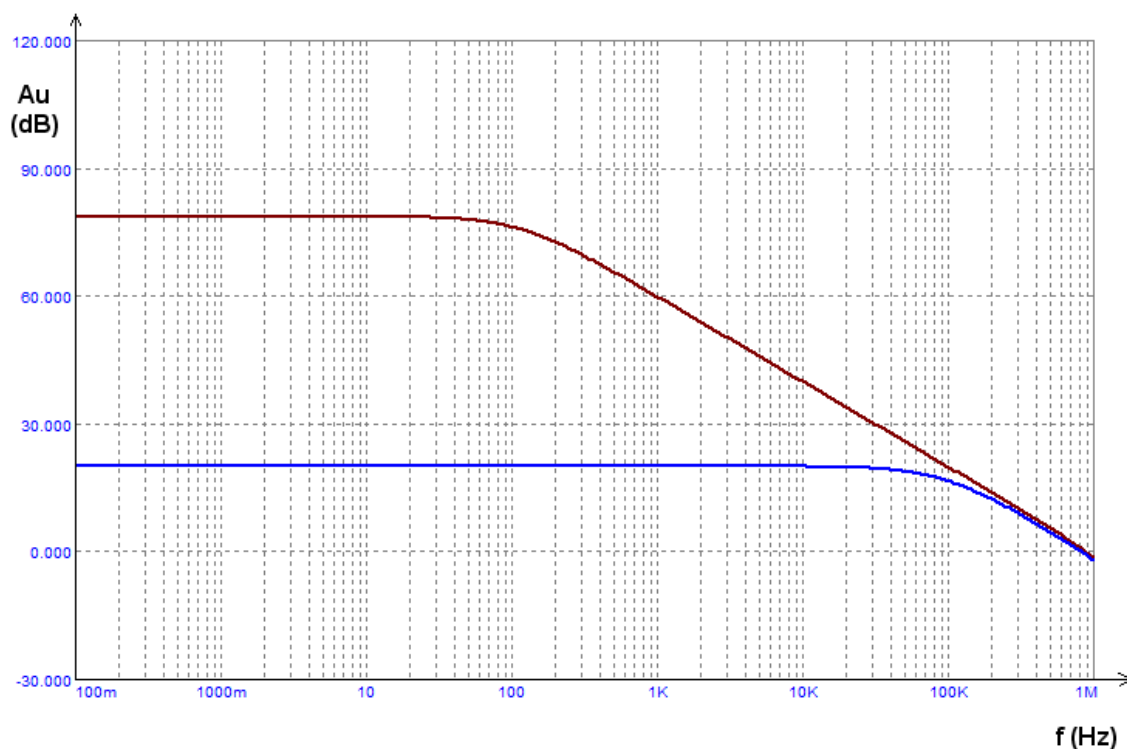
A kapcsolás bemeneti ellenállása a neminvertáló bemenet ellenállásával megegyezik, ideális esetben végtelen.

A 12. ábra mutatja az erősítő $U_{be}-U_{ki}$ átviteli karakterisztikáját alacsony frekvencián. Az invertáló erősítőre hasonló függvényt kapunk (a függőleges tengelyre tükrözve). A kivezérlési tartományban ($+U_{ki\max}$ és $-U_{ki\max}$ között) a függvény lineáris, ez azt jelenti, hogy nem torzítja a jelalakot. Nagyobb frekvenciákon nő a kapcsolás fázistolása, ezért az átviteli karakterisztika alakja módosul.



12. ábra: Neminvertáló erősítő átviteli karakterisztikája

Az erősítés frekvenciafüggése



13. ábra: Visszacsatolt erősítő frekvenciafüggése két különböző esetben. Piros: tízszeres erősítés, kék: tízszeres erősítés

Az erősítés frekvenciafüggése megváltozik a visszacsatolással. Ugyanúgy aluláteresztő szűrő jellegű, de alacsonyabb A_U értékről indulunk nulla frekvencián (egyenáramon), ami alig változik, amíg el nem éri az eredeti görbe meredek részét, ahonnan nagyjából azzal együtt megy tovább. Tekintve, hogy a meredek rész (az első töréspont előtt) meredeksége 20dB/dekád, megadhatjuk az összefüggést a törésponti frekvenciák és erősítések között. A nyílthurkú esetet A_{U0} és f_0 , a visszacsatoltat A_U és f_0' értékek jellemzik. Ekkor

$$\left| \frac{A_{UO}}{A_U} \right| = \frac{f'_0}{f_0}$$

$$f'_0 = f_0 \left| \frac{A_{UO}}{A_U} \right|$$

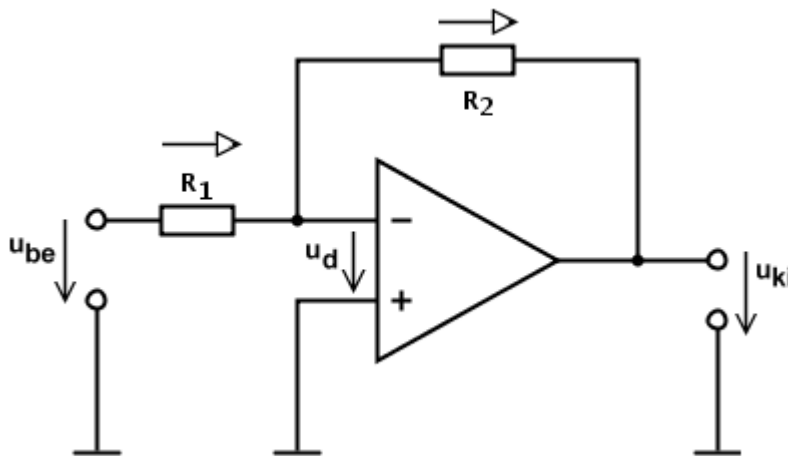
Azaz, ahányadára csökkentem az erősítést (a nyílthurkúhoz képest), annyszorosára növelem a törésponti frekvenciát (azaz a felső határfrekvenciát).

Tehát ha pl. $A_{UO}=10^5$, $f_0=5\text{Hz}$ és $A_U=10$:

$$f'_0 = f_0 \frac{A_{UO}}{A_U} = 5\text{Hz} \cdot \frac{10^5}{10} = 5 \cdot 10^4 \text{Hz} = 50\text{kHz}$$

Ugyanez a számolás az invertáló erősítő kapcsolásra is érvényes. Ott az erősítés negatív, de a frekvencia nem lehet az, emiatt használtunk abszolút értéket a képletben.

1.3.2.2 Invertáló erősítő kapcsolás



14. ábra: Invertáló erősítő alapkapsolás

Vizsgáljuk meg a 14. ábrán látható invertáló erősítő kapcsolást! Itt a kimenet egy ellenálláson keresztül az invertáló bemenetre van kötve, ezzel egy negatív visszacsatolást valósítva meg. Úgy tekinthetjük, hogy a kimenő jel egy részét kivonjuk a bemenetből. Ez azt eredményezi, hogy a bemenetek közötti u_d feszültség nagyon kicsi, közel nulla lesz. Ha ugyanis a bemeneti szimmetrikus feszültség nő, akkor a kimenet is nő, viszont akkor a visszacsatolás által a bemenetből kivont mennyiség is nő, ami tehát csökkenti a bemenetet, ezzel ellentartva a bemenet növekedésének.

Az u_d közel nulla voltának igazolásához tekintsük az alábbi levezetést. Itt abból indultunk ki, hogy R_2 feszültsége egyrészt $U_d - U_{ki}$, másrészt az $u_{be} - u_{ki}$ potenciálkülönbségből az $R_2 - R_1$ feszültségosztóval számolható.

$$U_d - U_{ki} = (U_{be} - U_{ki}) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ki} = U_d \cdot A_{u0}$$

$$U_d - U_d \cdot A_{u0} = (U_{be} - U_d \cdot A_{u0}) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_d \left(1 - A_{u0} + A_{u0} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = U_{be} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_d = U_{be} \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + A_{u0} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - 1 \right)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 - A_{u0} R_1} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} (1 - A_{u0})}$$

$$\lim_{A_{u0} \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} (1 - A_{u0})} = 0$$

Az $u_d=0$, illetve a műveleti erősítő bemeneteire vonatkozó $I_{be+}=I_{be-}=0$ közelítésből kiindulva levezethetjük a kapcsolás erősítését. Ha a $u_d=0$, akkor az invertáló bemenet potenciálja is 0. Ha az invertáló bemenet árama nulla, akkor a kapcsolás bemenő (R_1 -en átmenő) árama megegyezik az R_2 -n átmenő árammal. A csomóponti potenciálok módszerével:

$$\frac{u_{be} - 0}{R_1} = \frac{0 - u_{ki}}{R_2}$$

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Pontosabban levezetve (az u_d levezetéséhez hasonló módon):

$$U_d - U_{ki} = (U_{be} - U_{ki}) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = B \quad ; \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1 - B$$

$$U_d = (U_{be} - U_{ki}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{ki} = (1 - B)(U_{be} - U_{ki}) + U_{ki} =$$

$$= U_{be}(1 - B) - U_{ki}(1 - B) + U_{ki} = U_{be}(1 - B) + U_{ki}B$$

$$U_{ki} = U_d \cdot A_{u0}$$

$$U_{ki} = U_{be}A(1 - B) + U_{ki}AB$$

$$U_{ki}(1 - AB) = U_{be}A(1 - B)$$

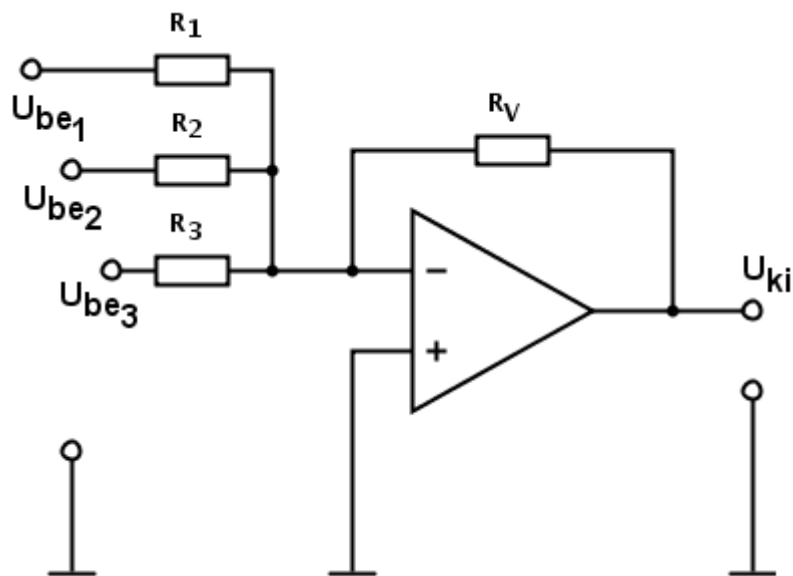
$$\frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A(1 - B)}{1 - AB} = \frac{A - AB}{1 - AB} = \frac{\frac{1}{B} - 1}{\frac{1}{AB} - 1}$$

$$\frac{1}{B} - 1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\lim_{AB \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{B} - 1}{\frac{1}{AB} - 1} = 1 - \frac{1}{B} = -\frac{R_2}{R_1}$$

A kapcsolás bemeneti ellenállása R_1 (hiszen azon $U_{be}=0$ esik és I_{be} folyik).

1.3.3 Összegző erősítő



15. ábra: Összegző erősítő

A szokásos $U_d=0$ és $I_{be-}=I_{be+}=0$ közelítésekből kiindulva:

$$\frac{U_{be1} - 0}{R_1} + \frac{U_{be2} - 0}{R_2} + \frac{U_{be3} - 0}{R_3} = \frac{0 - U_{ki}}{R_v}$$

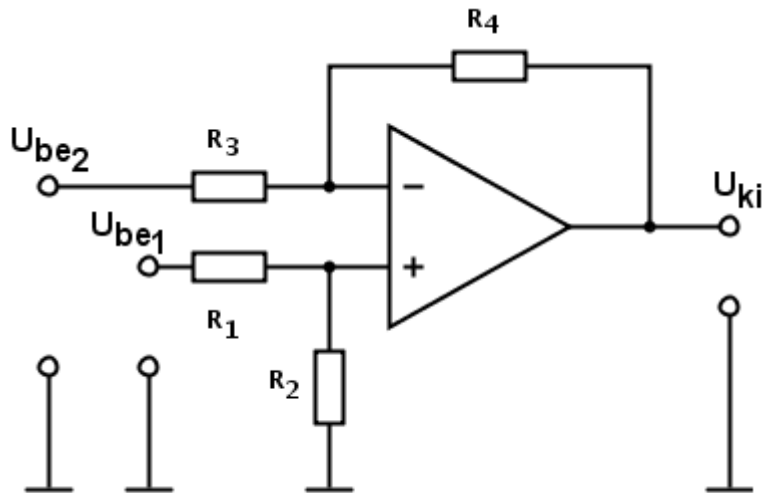
$$U_{ki} = R_v \left(\frac{U_{be1}}{R_1} + \frac{U_{be2}}{R_2} + \frac{U_{be3}}{R_3} \right)$$

A kimenő feszültség a bemenő feszültségeknek az ellenállásokkal súlyozott összege. Ha $R_1=R_2=R_3=R_v$, akkor

$$U_{ki} = R_v \left(\frac{U_{be1}}{R_1} + \frac{U_{be2}}{R_2} + \frac{U_{be3}}{R_3} \right) = U_{be1} + U_{be2} + U_{be3}$$

A kapcsolás bemeneteinek száma bővíthető.

1.3.4 Kivonó erősítő



16. ábra: Kivonó erősítő

A műveleti erősítő ugyan „alaplól”, nyílthurkú üzemmódban is kivonást valósít meg a két bemenet között, a nagyon nagy erősítésből eredő túlvezérlés, illetve az alacsony határfrekvencia miatt nem használható kivonó áramkörként. A korábban megismert negatív visszacsatolást kihasználva azonban építhetünk kivonó kapcsolást.

A szokásos $U_d=0$ és $I_{be-}=I_{be+}=0$ közelítésekkel használjuk a szuperpozíció elvét: első lépésben $U_{be2}=0$, második lépésben $U_{be1}=0$, majd a kimeneti részeredményeket összeadjuk. Az első lépésben neminvertáló erősítőt kapunk, aminek a bemenő feszültsége U_{be2} leosztva az R_2 - R_1 osztóval. A második lépésben egy invertáló erősítőt kapunk. Felhasználva a már megismert képleteket:

I.

$$U_{be2} = 0$$

$$U_{ki1} = U_{be1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = U_{be1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right)$$

II.

$$U_{be1} = 0$$

$$U_{ki2} = -\frac{R_4}{R_3} U_{be2}$$

III.

$$U_{ki} = U_{ki1} + U_{ki2} = U_{be1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - U_{be2} \frac{R_4}{R_3}$$

Ha $R_4=R_3$ és $R_2=R_1$:

$$U_{ki} = U_{be1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - U_{be2} \frac{R_4}{R_3} = U_{be1} \frac{R_1}{R_1 + R_1} \left(\frac{R_3 + R_3}{R_3} \right) - U_{be2} \frac{R_3}{R_3} = U_{be1} - U_{be2}$$

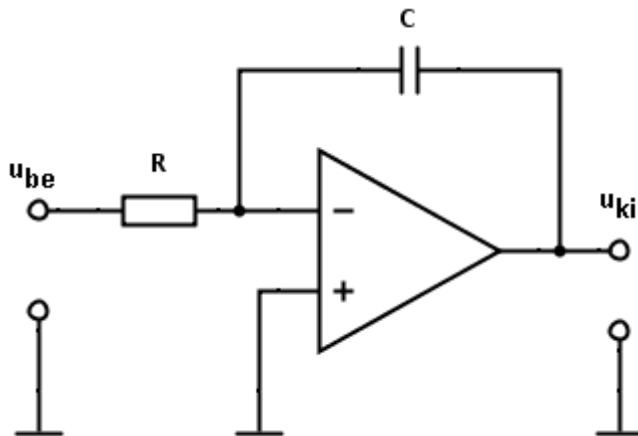
vagyis a kimeneten a két bemenő feszültség különbségét kapjuk.

Ha pedig $R_3=R_1$ és $R_4=R_2$, akkor

$$U_{ki} = U_{be1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - U_{be2} \frac{R_4}{R_3} = U_{be1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - U_{be2} \frac{R_4}{R_3} = (U_{be1} - U_{be2}) \frac{R_4}{R_3}$$

$$A_U = \frac{R_4}{R_3}$$

1.3.5 Integráló kapcsolás



17. ábra: Integráló kapcsolás

Ha az invertáló erősítő alapkapsolásban a visszacsatoló ellenállás helyére egy kondenzátort teszünk, integráló kapcsolást kapunk. Az egyenleteket az erősítőhöz hasonlóan felírhatjuk, a visszacsatoló ágnál a kondenzátor áramának egyenletét behelyettesítve:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

Ez alapján

$$\frac{u_{be} - 0}{R} = i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{-du_{ki}}{dt}$$

$$u_{ki}(t) = -\frac{1}{RC} \int_{\tau=0}^t u_{be}(\tau) d\tau$$

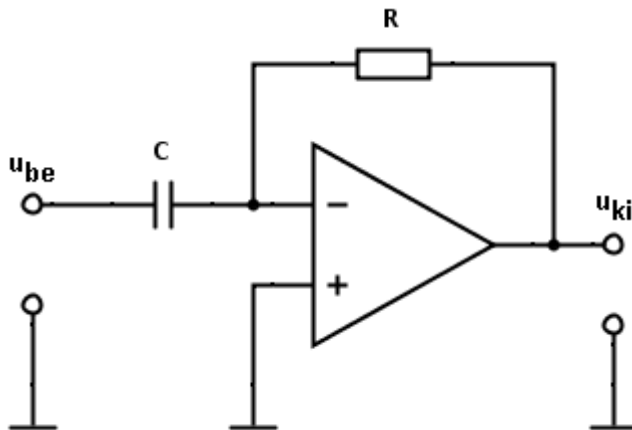
tehát a kimenő jel arányos a bemenő jel idő szerinti integráljával. Ezzel a kapcsolással (vagy változatával) gyakran találkozhatunk szabályozástechnikai áramkörökben. A gyakorlatban a kondenzátorral párhuzamosan be szoktak tenni egy nagy értékű ellenállást (pl. megaohm körül).

Az áramkör átviteli függvénye az invertáló erősítő erősítésének képletéből kiindulva:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{1}{j\omega C R} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

Ez alapján nagy frekvencián az erősítés csökken.

1.3.6 Differenciáló (deriváló) kapcsolás



18. ábra: Deriváló kapcsolás

Ha az invertáló erősítőben a bemeneti ellenállást cseréljük ki kondenzátorra, differenciáló (deriváló) kapcsolást kapunk. Az előzőek alapján itt is felírhatjuk az egyenletet:

$$i_{be} = \frac{0 - u_{ki}}{R}$$

$$i_{be} = i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du_{be}}{dt}$$

$$u_{ki} = -RC \frac{du_{be}}{dt}$$

tehát a kimenő jel arányos a bemenet idő szerinti deriváltjával.

A kapcsolás átviteli függvénye:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC$$

A kapcsolás erősítése a frekvenciával nő. Ez azt eredményezi, hogy a magas frekvenciájú zajösszetevők erősen jelentkezhetnek a kimeneten, az áramkört ezért ebben a formában a gyakorlatban nem használják. A stabil működés érdekében a kondenzátorral sorosan be szoktak iktatni egy ellenállást, így magas frekvencián (ahol a kondenzátor impedanciája közel nulla), invertáló erősítőként fog működni, véges erősítéssel.

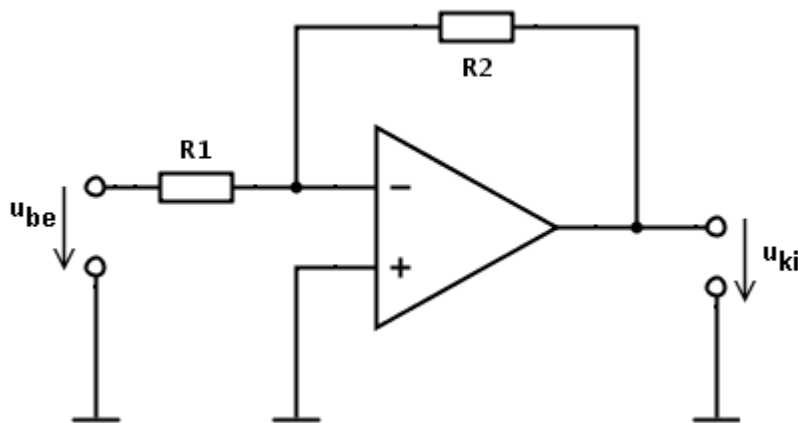
1.4 Feladatok

I.

Feladat: Tervezzen invertáló erősítő kapcsolást $A_{uv}=-20$ erősítéssel és $R_{be}=1k\Omega$ bemeneti ellenállással! Határozza meg a kapcsolás felső határfrekvenciáját! Ki tudja-e adni a kapcsolás a kívánt kimenő jelet, ha a bemenet $u_{be}(t)=1,5 \cdot \sin 10^5 t$ [V] ?

Adatok: $R_{be}=1k\Omega$; $A_{uv}=-20$; $f_0=5Hz$; $A_{u0}=2 \cdot 10^5$; $SR=0,5V/\mu s$; $U_{táp}=\pm 15V$

Megoldás:



19. ábra: Invertáló erősítő kapcsolás

A kapcsolás rajz a 19. ábra látható. A kapcsolás bemeneti ellenállása megegyezik az R_1 ellenállással.

$$R_1 = R_{be} = 1k\Omega$$

$$A_{uv} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$R_2 = -A_{uv} R_1 = 20 \cdot 1k\Omega = 20k\Omega$$

A felső határfrekvencia:

$$f_v = \frac{A_{u0}}{|A_{uv}|} f_0 = \frac{2 \cdot 10^5}{20} \cdot 5Hz = 50kHz$$

Az előállítani kívánt kimeneti jel:

$$u_{ki}(t) = A_{uv} \cdot u_{be}(t) = -20 \cdot 1,5 \sin(10^5 t) = -30 \cdot \sin(10^5 t) \text{ (V)}$$

Három dolgot kell megvizsgálunk:

- 1) Kimeneti max feszültség vs tápfeszültség
- 2) Jel frekvencia vs határfrekvencia
- 3) Jelváltozási sebesség vs SR

Vizsgálat:

1) A kimeneti jel csúcserőértéke 30V lenne, ami nagyobb, mint a tápfeszültség (15V), tehát a kimeneten egy levágott, négyszögszerű jel lesz.

2) A jelváltozási sebesség a nullátmenetnél (ahol az a legnagyobb)⁴:

$$\max \frac{dU_{ki}}{dt} = U_{ki_cs} \cdot \omega = 20 \cdot 1,5 \cdot 10^5 \frac{V}{s} = 3 \cdot 10^6 \frac{V}{s} = 3 \frac{V}{\mu s}$$

$$\max \frac{dU_{ki}}{dt} > SR$$

Ez az érték nagyobb a slew rate-nél, tehát ez alapján a kimeneten nem jelenik meg a kívánt jel torzítatlanul.

3) Az 50kHz határfrekvencia viszont nagyobb, mint a jel $f=10^5/2\pi=15\,915$ Hz frekvenciája, ennek tehát megfelelt.

Javítási javaslat:

Ha a bemeneti jel csúcserőértékét lecsökkentjük, torzítatlan kimenetet kaphatunk. A maximális bemeneti csúcserőérték, a $du_{ki}/dt=SR$ határesetben (de célszerű ennél kisebb értéket választani!)

$$\max \frac{dU_{ki_jav}}{dt} = U_{ki_cs_jav} \cdot \omega = A_{uv} \cdot U_{be_cs_jav} \cdot \omega = SR = 0,5 \frac{V}{\mu s} = 0,5 \cdot 10^6 \frac{V}{s}$$

$$U_{be_cs_jav} = \frac{SR}{|A_{uv}| \cdot \omega} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \frac{V}{s}}{20 \cdot 10^5 \frac{1}{s}} = 0,25V$$

Ekkor a kimenő jel csúcserőértéke $0,25V \cdot 20=5V$ lesz, ami a tápfeszültség kritériumot is teljesíteni fogja. (A kritériumok mindegyikének meg kell felelni, jelen esetben a SR kritérium volt erősebb.)

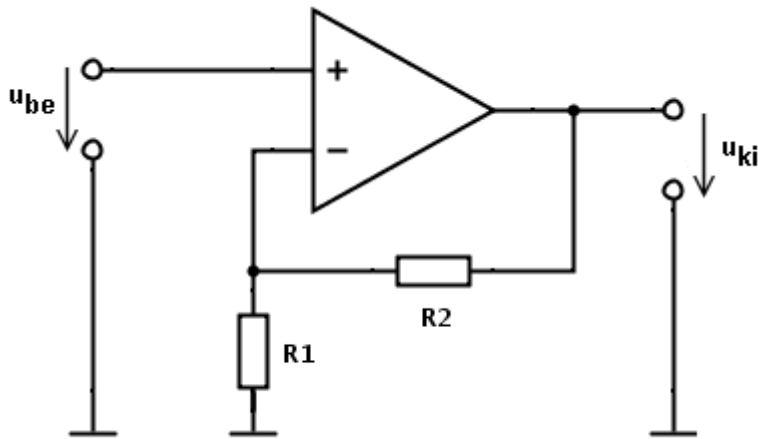
⁴ Szigorúan nézve $u_{ki_kívtant}$ vagy hasonlót kéne írunk, hiszen lehet, hogy nem fog létrejönni pont ez a jel, de ez már az átláthatóság rovására menne

II.

Feladat: Tervezzon neminvertáló erősítő kapcsolást $20\text{k}\Omega$ visszacsatoló ellenállással és $20,83\text{dB}$ erősítéssel.

Adatok: $\text{GBP}=5\text{MHz}$; $R_2=20\text{k}\Omega$; $A_{uv}=11$

Megoldás:



20. ábra: Neminvertáló erősítő kapcsolás

A kapcsolási rajz a 20. ábra látható. Az erősítést a képleteink normál számként adják meg, így számoljuk vissza a decibelből⁵:

$$a = 20 \lg A_U$$

$$A_U = 10^{\frac{a}{20}} = 10^{\frac{20,83}{20}} = 11$$

Az erősítés képletéből:

$$A_{Uv} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{(A_{uv} - 1)} = \frac{20\text{k}\Omega}{10} = 2\text{k}\Omega$$

A határfrekvencia számolásához a GBP (gain-bandwidth product, erősítés-sávszélesség szorzat) is használható, hiszen ez egyenlő az $A_{u0} \cdot f_0$ szorzattal vagy másképp az f_1 értékkel.

$$f_v = \frac{A_{u0}}{A_v} f_0 = \frac{\text{GBP}}{A_v} = \frac{5\text{MHz}}{11} = 454,5\text{kHz}$$

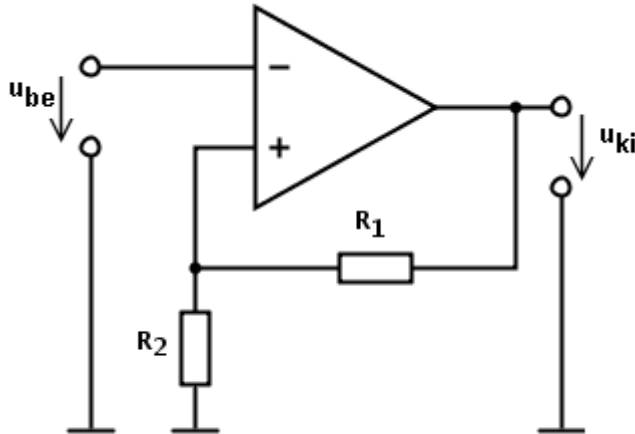
⁵ Az ilyen példánál gondoljunk arra, hogy ha pl. 50,99 jön ki, akkor valószínűleg 51-re gondolt a példa megalkotója, csak a dB számítás érzékeny a pontosságra, ezért kerekítsünk a végén.

III.

Feladat: Tervezzen hiszterézises invertáló komparátort 4V hiszterézis tartománnyal!

Adatok: $U_{ki\max} = \pm 10V$; $U_H = 4V$

Megoldás:



21. ábra: Hiszterézises invertáló komparátor

A hiszterézis tartomány a két referencia szint közötti feszültségtartomány, ebből $U_{ref} = U_H/2 = 2V$. A referencia érték a maximális kimeneti feszültségből az R_1 - R_2 feszültségosztóval képződik:

$$U_{ref} = U_{ki\max} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ref}}{U_{ki\max}} = \frac{2V}{10V} = 0,2$$

Tehát a két ellenállás aránya 2:8. Az ellenállások konkrét értéke széles tartományon belül megválasztható (ne legyen nagyon kicsi, hogy ne terheljük le a kimeneti fokozatot, illetve ne fogyasszon sokat), így például választhatjuk $R_2 = 2k\Omega$ és $R_1 = 8k\Omega$ -nak (az E24 ellenállás sorozatban $2k\Omega$ és $8,2k\Omega$ található 5% szórással). Másik lehetőségként a két ellenállás helyett használhatunk egy potenciómétert (ilyenkor a csúszkát kötjük a neminvertáló lábra).