10. Konzultáció: Erősítő fokozatok összekapcsolása, visszacsatolások, műveleti erősítők és műveleti erősítős kapcsolások

"Elektrós"-Zoli

2013. november 3.

Tartalomjegyzék

1. Erősítő fokozatok összekapcsolása **4**
1.1. Közvetlen csatolás: . . . 4
1.2. RC csatolás: . . . 4
1.3. LC csatolás: . . . 4
1.4. Transzformátoros csatolás: . . . 4

2. Visszacsatolások **5**
2.1. Pozitív és negatív visszacsatolás: . . . 5
2.1.1. Pozitív visszacsatolás: . . . 6
2.1.2. Negatív visszacsatolás: . . . 6
2.1.3. Impedancia transzformáció: . . . 7
2.2. A visszacsatolások egyéb elvi megvalósításai: . . . 7

3. Műveleti erősítők: **8**
3.1. Az ideális és a nem ideális műveleti erősítők paraméterei: . . . 8
3.2. A műveleti erősítő, mint komparátor: . . . 9

4. Negatív visszacsatolású kapcsolások: **10**
4.1. Nem invertáló erősítő: . . . 10
4.2. Invertló erősítő: . . . 10
4.3. Súlyozott összeadó: . . . 11
4.4. Különbségképző: . . . 11
4.5. Logaritmáló: . . . 12
4.6. Exponenciáló: . . . 12
4.7. Szorzó: . . . 13
4.8. Kváziintegráló: . . . 13
4.9. Kvázidifferenciáló: . . . 13
4.10. A harmónikus oszcillátor differenciálegyenletét megoldó áramkör: . . . 13

A jegyzetről

A jegyzet következő részei nélkülözhetőek: 1. fejezet: Erősítő fokozatok összekapcsolása; 2.2 fejezet: A visszacsatolások egyéb elvi megvalósításai; továbbá a maradék részekben lévő levezetések ismerete sem szükséges.

A jegyzet bárki szabadon letöltheti a honlapomról, viszont nem járulok hozzá, hogy a jegyzeteimet bárki más terjessze, továbbadja, vagy módosítsa!
Frissített változatért látogasd meg a honlapomat (ami jelenleg az ls86.net névre hallgat), vagy küldj e-mailt: lightside86@gmail.com

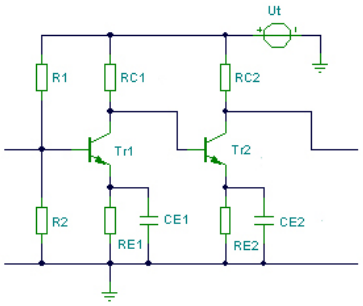
A jegyzet esetlegesen hibákat tartalmazhat, ha netán valaki találna ilyet, akkor kérem jelezze azt e-mailben!

2013.11.03.
Budapest

1. Erősítő fokozatok összekapcsolása

Általában egy erősítő kapcsolás önmagában nem sok dologra jó, és mint tapasztaltuk, nem mindegyik erősítő alkalmazható bárminek az erősítésére, továbbá általában amiben az egyik erősítő jó, abban egy másik nem. Szükséges, hogy az egyes erősítőket mefelelő módon összekapcsoljuk. Ennek módjait nézzük át kicsit.

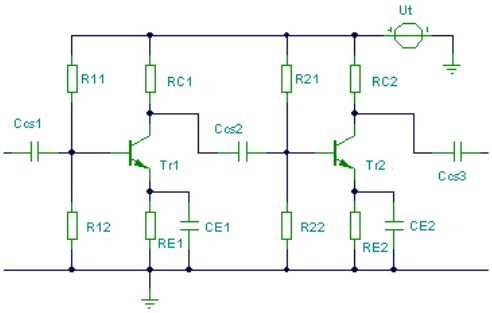
1.1. Közvetlen csatolás:



A legegyszerűbb megoldás természetesen, ha az egyik fokozat kimenetét közvetlenül a másik fokozat bemenetére kötjük. Ez nem más, mint az úgynevezett közvetlen csatolás (más néven DC-, vagy galvanikus csatolás).

Erősítőfokozatok összekapcsolásakor nem jó, ha a korábbi erősítő fokozatok eltolják a későbbiek munkaponjait. Ebbe az esetben konkrétan az a helyes eljárás, ha az előző fokozat R_C illetve R_E ellenllásaival állítjuk be a következő fokozat munkapontját (a későbbi fokozat munkapontját az előző fokozat kollektor egyenfeszültésge határozza meg, ez több fokozat esetén növekvő bázis-feszültséget okoz). Ez a fajta csatolás ugyan nagyon stabil, de csak korltozottan valósítható meg a munkapontbeállítási nehézségek miatt.

1.2. RC csatolás:



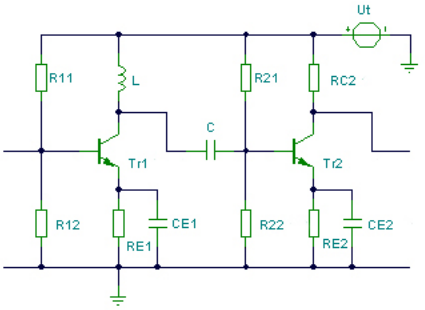
Egy erősítő fokozat kimenetén általában nem olyan jel van, amelyik csak a váltakozó feszültségű komponenst tartalmazza (általában jó, ha az előző fokozat nem szól bele a követező fokozat munkapontjába). A legegyszerűbb megoldás, ha úgynevezett csatoló kondenzátorokat használunk az egyes fokozatok között. Ekkor az egyenfeszültségű rész a kondenzátoron esik, míg a váltakozó rész a következő fokozatra jut (felüláteresztő szűrő).

Ez a leggyakrabban használt csatolási mód. Az egyetlen kikötés, hogy minél nagyobb kapacitást kell használni, hogy a hasznos frekvenciákat áteressze.

Tehát a mködési feltétel:

$$X_{C_{cs2}} \ll R_{be2}$$

1.3. LC csatolás:

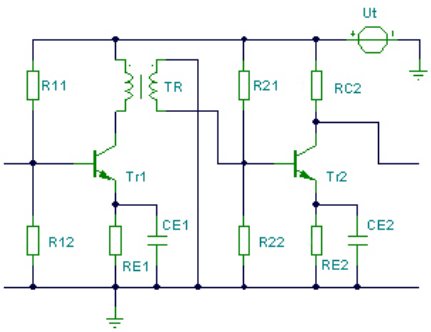


Ma már nagyon ritkán, általában nagy frekvenciára hangolt erősítőkben alkalmazzák csak. Ekkor az első fokozat munkaellenállása nem más, mint az L induktivitás, ami egynáramú szempontból nulla ellenállást képvisel. Az előbbi fokozat váltakozó áram munkaellenállását részben a második fokozat bemeneti ellenállása adja.

A működési feltételek:

$$X_L \gg R_{be2} \qquad\qquad X_C \ll R_{be2}$$

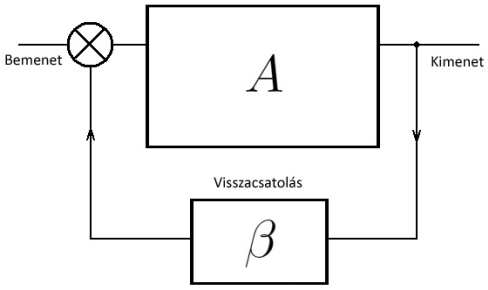
1.4. Transzformátoros csatolás:



Erős frekvenciafüggése miatt alig használják. Régebbi rádiók és televíziók középfrekvencás erősítőiben fordulnak elő. A trafó segítségével a következő fokozat bemenő jelét megnövelhetjük.

2. Visszacsatolások

A visszacsatolás elvi alapja, hogy egy áramkör bemenetére visszavezetjük a kimenetének valamekkora hányadát. Ez megvalósulhat azonos, vagy ellentétes fázisban, lehet áram, vagy feszültség, vagy ezek valamilyen függvénye. A lehetőségek száma szinte végtelen.



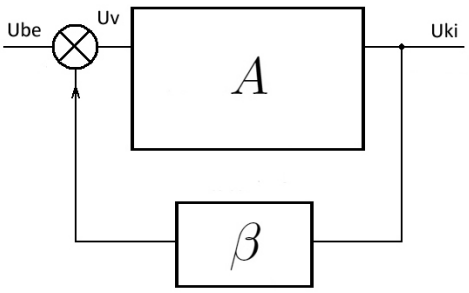
1. ábra. Visszacsatolás

Mi haszna lehet egy visszacsatolásnak? Tekintsünk egy hétköznapi példát: sokszor előfordulhat például, hogy valamit szeretnénk azonos hőmérsékleten tartani. Ekkor ha elkezd hülni az adott dolog, akkor melegíteni kell, ha meg túlmelegszik, akkor a melegítést csökkenteni kell, esetleg hűteni is. Ha egy ember végzi a vezérlést, akkor csak diszkrét lépésekben tudja elvégezni a változtatásokat, így lesznek ingadozások. Ha beállítunk egy vezérlőt, hogy a hőmérsékletet folyamatosan figyelve vezérelje a hűtést és a fűtést, akkor ideális eszközöket feltételezve elvileg tökletesen egy szinten tartható a kívánt hőmérséklet. Az ilyen jellegű vezérlés is egyfajta visszacsatolás, mivel a rendszer eredményével (a hőmérséklettel) arányosan vezéreljük a bemenetet, amitől függ az eredmény.

A továbbiakban általában véve négypólusokkal foglalkozunk.

Négypólusoknál a legtöbb esetben a β-val jelzett visszacsatoló tag nem más, mint egy szimpla feszültségosztó, de akár frekvencia vagy polaritásfüggő elemeket is beiktathatunk, vagy akár erősítőket.

2.1. Pozitív és negatív visszacsatolás:



2. ábra. Visszacsatolt feszültség

Most tekintsük azt az esetet, mikor a kimenettel arányos feszültséget iktatunk a bemenetre. Ekkor:

$$U_v = U_{be} + \beta U_{ki}$$

$$U_{ki} = AU_v = A(U_{be} + \beta U_{ki}) = AU_{be} + A\beta U_{ki} \quad \Longrightarrow \quad U_{ki}(1 - A\beta) = AU_{be}$$

$$\longrightarrow \qquad A_{\text{vcs}} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A}{1 - A\beta}$$

Az erősítő "eredeti" erősítése, más néven nyílt hurkú erősítése A. Viszont a visszacsatolást alkalmazva az erősítés immár az A_{vcs}-vel jelölt, úgynevezett visszacsatolt erősítés. Továbbá az $A\beta$ szorzatot hurokerősítésnek szokás nevezni.

A β előjelétől függően a visszacsatolás lehet pozitív vagy negatív.

2.1.1. Pozitív visszacsatolás:

Pozitív visszacsatolás: ez akkor valósul meg, ha a β előjele pozitív, aminek következtében az $A\beta$ szorzat is az, így a visszacsatolt erősítés nagyobb lesz, mint a visszacsatolás nélküli. Nem is csoda, elvégre gondoljunk bele, hogy mi is történik: ha a kimenetről a bemenetre egy olyan jelet kapcsolunk, ami azonos fázisba van a bemenettel, akkor kvázi megnöveljük a bemenő jelet (kisebb-nagyobb torzulások mellett). Mivel így nő az erősítendő jel, így az erősített is nőni fog, aminek hatására a visszacsatolás is nő újra. Hacsak az $A\beta$ szorzat nem egyezik meg 1-el, akkor véges nagy erősítés lesz, ha pedig $A\beta = 1$ (ami abszolút természetesen előfordulhat), akkor a visszacsatolt erősítés a képlet alapján végtelen. Ez természetesen nem valósul meg, mivel az összes erősítő véges tápfeszültséggel van táplálva, így nincs miből a kellő teljesítményt szerezze.

Oszcilláció (kimeneti jel bemeneti jel nélkül): Tekintsük a következő gondolatkísérletet (amit a laboratóriumi mérések során gyakorlatilag is el lehet végezni). Képzeljük el, hogy egy pozitív visszacsatolású rendszerünk van, aminél előfordulhat, hogy $A\beta = 1$. Induljunk ki egy köztes helyzetből, amikor a pozitív visszacatolás még nem túl nagy. Állítsunk be olyam amplitúdójú bemenő jelet, amelynek hatására a kimeneti jel még éppen nem vág le. Kezdjük el csökkenteni a bemenő jel amplitúdóját, de közben folyamatosan növeljük a pozitív visszacsatolás mértékét úgy, hogy a kimenő jel maximális maradjon. Előbb utóbb eljutunk odáig, hogy 0 bemenő jel mellett is lesz kimenő jel. Ekkor azt mondjuk, hogy a rendszer "oszcillál", és hogy ez az eszköz maga egy oszcillátor.

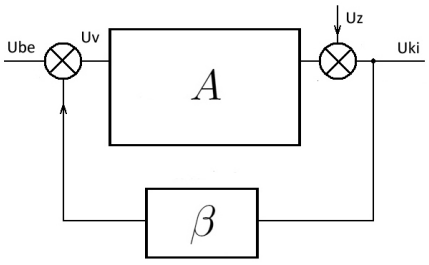
Az oszcilláció feltétele: az oszcilláció egyértelmű feltétele, hogy az $A\beta$ szorzat lehessen 1. Egyéb vizsgálati mód: Nyquist-féle analízis. Ennek lényege, hogy felvesszük a visszacsatolt erősítő Nyquist-görbéjét, és ha a görbe tartalmazza az 1 pontot, akkor a rendszer képes oszcillálni. Mindez lényegtelen most számunkra, mivel ilyen görbéket nem fogtok felvenni.

2.1.2. Negatív visszacsatolás:

Negatív visszacsatolás: ez akkor valósul meg, ha a β előjele negatív. Ezt a negatív előjelet szokás kihozni β-ból, és így az $A\beta$ szorzat pozitív előjellel szerepel a hányadosban. Rögtön látszik, hogy ekkor a visszacsatolt erősítés kisebb lesz, mint a visszacsatolás nélküli. Gondoljunk bele, hogy mi is történik: ha a kimenetről a bemenetre egy olyan jelet kapcsolunk, ami ellentétes fázisban van a bemenettel, akkor lecsökkentjük a bemenő jelet, tehát csökken az erősítendő jel és így az erősített jel is, aminek hatására a visszacsatolás mértéke csöken, vagyis a negatív visszacsatolás mértéke csökken. Így ebben az esetben nem lesznek "megfutások".

Felmerülhet a kérdés, hogy miért is akarnánk, hogy egy erősítő erősítése csökenjen?

Zajcsökkenés: tipikusan elő szokott fordulni, hogy zajfeszültség ül rá a jelre erősítés közben, illetve után. A jel és zaj egymáshoz képesti mértékét (Signal pro Noise Ratio: S/N ratio) lehet javítani a negatív visszacsatolással, ugyanis:



3. ábra. Zaj a visszacsatolt erősítőben

Ekkor az összefüggések:

$$U_v = U_{be} - \beta(U_{ki} + U_z)$$

$$U_{ki} = AU_v = A[U_{be} - \beta(U_{ki} + U_z)] = A(U_{be} - \beta U_{ki} + \beta U_z) = AU_{be} - A\beta U_{ki} - \beta U_z \quad \Longrightarrow \quad U_{ki}(1 + A\beta) = AU_{be} + \beta U_z$$

$$\longrightarrow \qquad U_{ki} = \frac{A}{1 + A\beta} U_{be} + \frac{\beta}{1 + A\beta} U_z$$

Látható, hogy a "hasznos" jel továbbra is erősítve lesz, míg a zaj csökkentve lesz. Ennek jobb szemléltetése végett nézzük azt az esetet, amikor $A\beta \gg 1$, akkor az 1 elhanyagolható:

$$\frac{A}{1 + A\beta} U_{be} + \frac{\beta}{1 + A\beta} U_z \approx \frac{A}{A\beta} U_{be} + \frac{\beta}{A\beta} U_z = \frac{1}{\beta} U_{be} + \frac{1}{A} U_z$$

Tekintsünk egy számbeli esetet: $A := 10^5$; $\beta := 10^{-2}$, ekkor $A\beta = 1000 \gg 1$, tehát a közelítés érvényes. A hasznos jel erősítése: $1/\beta = 100$, a zaj csökkentése: 10^{-5}. Így a hasznos jel és a zaj egymáshoz képesti aránya az eredetihez képest 10^7, ami egyértelműen jó.

Különböző frekvenciákon való erősítés: a legtöbb erősítő nyílt hurkú erősítése masszívan frekvenciafüggő. Ezt a frekvenciafüggést lehet még "javítani" az erősítés csökkentése árán. Az erősítés nagysága csökken, de szélesebb frekvenciatartományban használható az erősíté.
Az erősítés visszacsatolás nélkül:

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega\tau}$$

Az erősítés negatív visszacsatolással:

$$A_{\mathrm{vcs}}(\omega) = \frac{\frac{A_0}{1+j\omega\tau}}{1 + \frac{A_0\beta}{1+j\omega\tau}} = \frac{A_0}{(1 + j\omega\tau) \cdot \left(1 + \frac{A_0\beta}{1+j\omega\tau}\right)} = \frac{A_0}{1 + j\omega\tau + (1 + j\omega\tau) \cdot \left(\frac{A_0\beta}{1+j\omega\tau}\right)} = \frac{A_0}{1 + j\omega\tau + A_0\beta}$$

Ezt úgy is lehet írni, hogy

$$A_{vcs} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta + j\omega\tau} = \frac{A_0}{(1 + A_0\beta)\left(1 + \frac{j\omega\tau}{1+A_0\beta}\right)} = \frac{\frac{A_0}{1+A_0\beta}}{1 + j\omega\left(\frac{\tau}{1+A_0\beta}\right)}$$

Mintha másféle τ lenne (konkrétan kisebb):

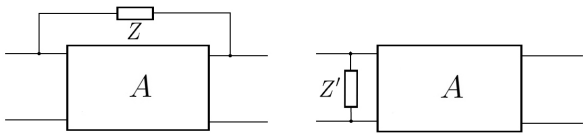
$$\tau' = \frac{\tau}{1 + A_0\beta}$$

Márpedig $\tau = \frac{1}{\omega_h}$, tahát a határfrekvencia megnőtt!!!

2.1.3. Impedancia transzformáció:

Ha egy Z impedanciát rakunk a kimenet és a bemenet közé, akkor az olyan, mintha a bemenet két pólusa közé egy Z' impedanciát raknánk, amelyek közt a következő kapcsolat áll fenn:

$$Z' = \frac{Z}{1 + A}$$



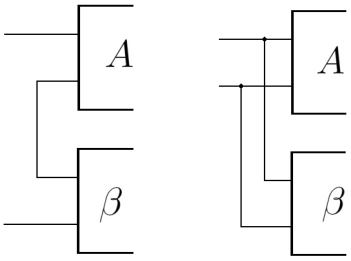
(a) Visszacsatolásban lévő impedancia (b) Transzformált impedancia

4. ábra. Impedanciatranszfotmáció

2.2. A visszacsatolások egyéb elvi megvalósításai:

A bemeneti és kimeneti oldal tekintetében két-két megvalósítás van:

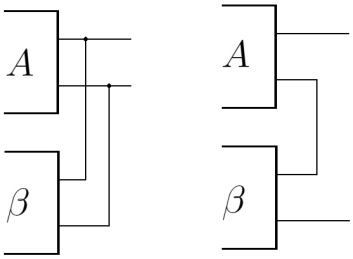
A bemenetet tekintve lehet soros, illetve párhuzamos visszacsatolás:



(a) Soros (b) Párhuzamos

5. ábra. Visszacsatolások a bemenet szempontjából

A kimenet tekintetében lehet áram, illetve feszültség-visszacsatolás.

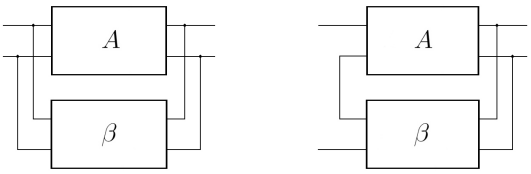


(a) Feszültség (b) Áram

6. ábra. Visszacsatolások a kimenet szempontjából

Feszültség-visszacsatolásnál a kimeneti feszültséggel arányos visszacsatolás valósul meg. Míg áram-visszacsatolásnál egyértelműen a kimeneti árammal arányos visszacsatolás van.

A kimenet és a bemenet tekintetében vett visszacsatolások tetszőlegesen kombinálhatók. Például:



(a) Párhuzamos feszültség (b) Soros feszültség

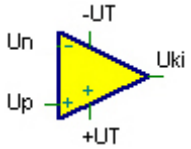
7. ábra. Példák kombinációkra

A 7. ábra baloldali alábráján párhuzamos feszültségvisszacsatolás, míg a jobboldalinál soros feszültség-visszacsatolás látható. De bármilyen egyéb kombináció is előfordulhat.

3. Műveleti erősítők:

Mik is a műveleti erősítők?

A műveleti erősítőket eredetileg analóg számítógépekben használták (a digitális technika előtt). Matematikai műveleteket valósíottak meg velük, ahol a változó a feszültség volt, innen jön a nevük.
A műveleti erősítők több erősítőfokozatból álló erősítők. Bemenetükön egy differenciálerősítő található, továbbá rendelkeznek egy kimenettel, és kettős (pozitív és negatív) tápfeszültséget igényelnek.



8. ábra. Visszacsatolás

A differenciális bemenet: ha mindkét bemenetre ugyan azt a jelet kapcsoljuk, akkor a kimeneten elvileg semekkora jel nincs. Legyen az erősítő nyílt hurkú erősítése A. Ha a $+$ előjellel jelzett neminvertáló bemenetre (U_p) földet kötünk, a $-$ jellel jelölt invertáló bemenetre (U_n) pedig egy tetszőleges bemenő (U_{be}) jelet, akkor a kimeneten lévő jel $-AU_{be}$ lesz. Ha az invertáló bemenet van földön és a neminvertálóra kötjük a bemenő jelet, akkor a kimenő jel AU_{be} lesz.
Természetesen a kimenő jel nem lehet nagyobb a tápfeszültségeknél, amivel tápláljuk a műveleti erősítőt!

3.1. Az ideális és a nem ideális műveleti erősítők paraméterei:

Egy ideális műveleti erősítő

- bemenő ellenállása: $R_{be} = \infty$
- kimeneti ellenállása: $R_{ki} = 0$

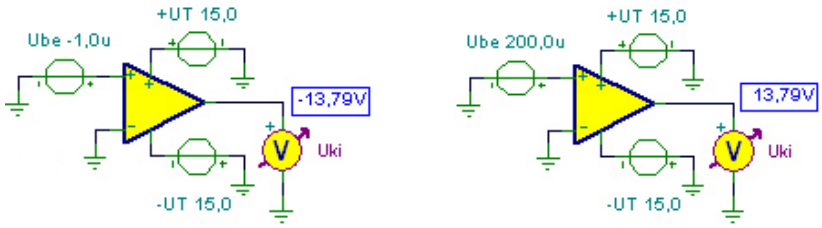
- feszültségerősítése: $A = \infty$
- sávszélessége: $f_h = \infty$ (nincs határfrekvencia, ami alatt, illetve felett csökken az erősítése)
- ...[1]

Egy valós műveleti erősítő paraméterei:

- bemenő ellenállása: $R_{be} = 10^5 - 10^6 \Omega$
- kimeneti ellenállása: $R_{ki} < 300\Omega$ $(n \cdot 10\Omega)$
- feszültségerősítése: $A = n \cdot 100 - 10^8$
- határfrekvenciája: $f_h \sim 10Hz$ (a műveleti erősítők $\sim MHz$-es tartományban már csupán egység körüli erősítéssel rendelkeznek)

3.2. A műveleti erősítő, mint komparátor:

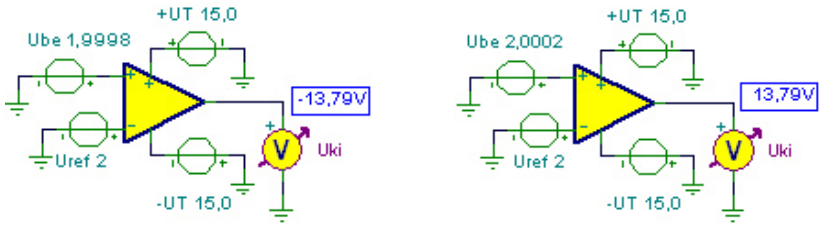
Tegyük fel, hogy az invertáló bemenet van a földön és a neminvertálóra kötünk egy nagyon kis (pl: $0.0002V$-os) feszültséget (9b. ábra). Az erősítés legyen 10^7, ami alapján a kimeneten ideális esetben lenne $0.0002V \cdot 10^7 = 2000V$, ami természetesen nem valósul meg, mivel a tápfeszültség tipikusan $10-20V$ közötti (a 9b. ábrán konkrétan $15V$). Tehát 2000V helyett $+U_T$ lesz a kimeneten (az ábrán nem ez látható, ami amiatt van, mert az eszköz nem ideális). Ha a $0V$-hoz képest hasonlóan kis negatív feszültség van a bemenetre kötve, akkor $-U_T$ lesz a kimeneten (9a. ábra).



(a) $U_{be} < 0V$ (b) $U_{be} > 0V$

9. ábra. A $0V$-ra való komparálás
(Azért nem $15V$, illetve $-15V$ van a két esetben a kimeneten, mert az eszközök nem ideálisak.)

Ha nem $0V$-ot kötünk az invertáló bemenetre, hanem mondjuk $2V$-ot, akkor a $2V$ lesz hasonló az előbbi $0V$-hoz, tehát ha akár egy kicsivel $2V$ alatti (10a. ábra), vagy feletti (10b. ábra) feszültséget kapcsolunk a neminvertáló bemenetre, akkor $-U_T$, illetve $+U_T$ lesz a kimeneten.



(a) $U_{be} < 2V$ (b) $U_{be} > 2V$

10. ábra. A $0V$-ra való komparálás
(Azért nem $15V$, illetve $-15V$ van a két esetben a kimeneten, mert az eszközök nem ideálisak.)

Mindezeket úgy is tekinthetjük, mintha a műveleti erősítő egy "összehasonlító" (idegen szóval komparátor) lenne. Ha a $-U_T$ kimenő feszültséghez a logikai NEM-et, illetve a $+U_T$-hez a logikai IGEN-t rendeljük, akkor a műveleti erősítő megmondja, hogy a (neminvertáló bemenetre kapcsolt) bemenő feszültség nagyobb-e, mint az (invertáló bemenetre kapcsolt) úgynevezett referencia feszültség.

A komparátorok leginkább az Analóg-Digitális átalakítókban (AD-konverterek) kapnak szerepet, melyek az analóg mérések adatait digitalizálják. Sokféle ilyen eszköz létezik, később megbeszéljük a legfőbb alaptípusokat.

[1] Van még sok paramétere egy műveleti erősítőnek, de mivel ezek ismerete szügségtelen, ezért nem írom tovább.

4. Negatív visszacsatolású kapcsolások:

Most vizsgáljunk meg néhánynegatív visszacsatolású kapcsolatot, melyek különböző műveleteket végeznek el.

A negatív visszacsatolású eszközök arra vannak "ösztönözve", hogy a bemenetei közé kapcsolt feszültség nulla legyen. Ez amolyan "ököl/ökörszabály". Ezeknél az eszközöknél általában abból indulunk ki, hogy $U_p = U_n$. Ez persze tökéletesen nem valósul meg, de általban jó közelítés.

4.1. Nem invertáló erősítő:

Ez egy olyan kapcsolás, melyben az ellenállások arányaival állítható be, hogy mekkora legyen az erősítés. Ez a kapcsolás a neminvertáló bemenetet használja bemenetként.
Hogyan is viselkedik ez az eszköz?

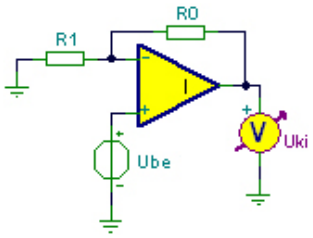
$$U_n = U_p \tag{4.1}$$

$$U_{ki}\frac{R_1}{R_1+R_0} = U_{be} \tag{4.2}$$

$$U_{ki}R_1 = (R_1+R_0)U_{be} \tag{4.3}$$

Tehát a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \left(1+\frac{R_0}{R_1}\right)U_{be} \tag{4.4}$$



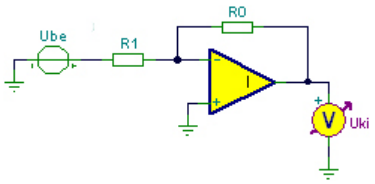
11. ábra. Nem invertáló erősítő

Más számítási mód: tekintsük magát a negatív visszacsatolást, és hogy ennek hatására hogyan alakul a visszacsatolt erősítés. A visszacatolási tényező: $\beta = -\frac{R_1}{R_1+R_0}$. A $-$ előjel azért jön be, mert a visszacsatolás az invertáló bemenetre van kötve. A visszacsatolt erősítés így:

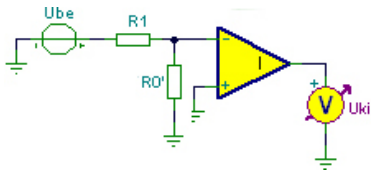
$$A' = \frac{A}{1-A\beta} = \frac{A}{1+\underbrace{A\frac{R_1}{R_1+R_0}}_{\gg 1}} \approx \frac{A}{A\frac{R_1}{R_1+R_0}} = \frac{R_1+R_0}{R_1} = 1+\frac{R_0}{R_1}$$

4.2. Invertló erősítő:

Ez is egy olyan kapcsolás, melyben az ellenállások arányaival állítható be, hogy mekkora legyen az erősítés. Csakhogy ez az invertáló bemenetet használja bemenetként.
Most induljunk ki az impedancia-transzformációból:



(a) Invertáló erősítő



(b) Impedancia transzformációval

12. ábra. Impedancia transzformáció az invertáló erősítő esetében

$$R_0' = \frac{R_0}{1+A} \approx \frac{R_0}{A}$$

A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = -AU_n = -AU_{be}\frac{\frac{R_0}{1+A}}{R_1+\frac{R_0}{1+A}} \approx -AU_{be}\frac{\frac{R_0}{A}}{R_1+\frac{R_0}{A}} = -U_{be}\frac{R_0}{\frac{AR_1+R_0}{A}} = \tag{4.5}$$

$$= -U_{be}\frac{AR_0}{AR_1+R_0} \approx -U_{be}\frac{AR_0}{AR_1} = -\frac{R_0}{R_1}U_{be} \tag{4.6}$$

Másik számítási mód:

$$U_{ki} = -AU_n = -A\left(U_{be}\frac{R_0}{R_0+R_1} + U_k i\frac{R_1}{R_0+R_1}\right) \tag{4.7}$$

$$U_{ki}\left(1+A\frac{R_1}{R_0+R_1}\right) = -AU_{be}\frac{R_0}{R_0+R_1} \tag{4.8}$$

$$U_{ki} = -U_{be}A\frac{\frac{R_0}{R_0+R_1}}{1+A\frac{R_1}{R_0+R_1}} = -U_{be}A\frac{R_0}{R_0+R_1+\underbrace{AR_1}_{\gg R_0+R_1}} \approx -U_{be}\frac{AR_0}{AR_1} = -\frac{R_0}{R_1}U_{be} \tag{4.9}$$

Tehát a lényeg:

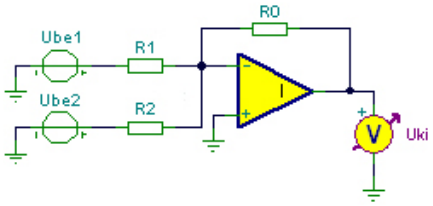
$$U_{ki} = -\frac{R_0}{R_1}U_{be} \tag{4.10}$$

4.3. Súlyozott összeadó:

Ez a kapcsolás az invertáló erősítőn alapszik, annak egy "kibővített" változata. Ezúttal csupán a (nem túl bonyolult) számítás eredményét közlöm a kimeneti feszültségre:

$$U_{ki} = -\left(\frac{R_0}{R_1}U_{be1} + \frac{R_0}{R_2}U_{be2}\right) \tag{4.11}$$

Látható, hogy a megfelelő ellenállásviszonyok megválasztásával különböző "súllyal" adhatók össze a feszültségek. Ha az ellenállásokat azonos nagyságúnak választjuk, akkor szimpla összeadót kapunk. De ügyeljünk rá, hogy ez ellentétes előjelű feszültség, mint a bemenő!!!

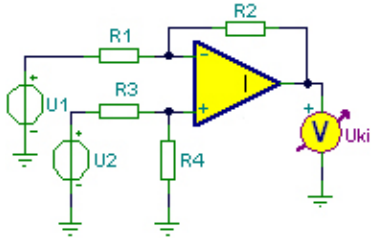


13. ábra. Súlyozott összeadó

Megjegyzés: jóformán akárhány jelet össze lehet adni, csupán be kell iktatni az extra tagokat.

4.4. Különbségképző:

Ez a kapcsolás a két bemenő jel különbségét állítja elő. Induljunk ki $U_p = U_n$-ből:



14. ábra. Különbség képző

$$U_p = U_2\frac{R_4}{R_3+R_4} \qquad U_n = U_1\frac{R_2}{R_1+R_2} + U_{ki}\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

Tehát:

$$U_p = U_n \tag{4.12}$$

$$U_2 \frac{R_4}{R_3+R_4} = U_1 \frac{R_2}{R_1+R_2} + U_{ki} \frac{R_1}{R_1+R_2} \tag{4.13}$$

$$U_2 R_4 (R_1+R_2) = U_1 R_1 (R_3+R_4) + U_{ki} R_1 (R_3+R_4) \tag{4.14}$$

A kimenő feszültséget kifejezve:

$$U_{ki} = \frac{U_2 R_4 (R_1+R_2) - U_1 R_1 (R_3+R_4)}{R_1 (R_3+R_4)} = U_2 \frac{R_4 (R_1+R_2)}{R_1 (R_3+R_4)} - U_1 \frac{R_2}{R_1} \tag{4.15}$$

Speciálisan, abba az esetben, ha $R_1 = R_3$, valamint $R_2 = R_4$, akkor

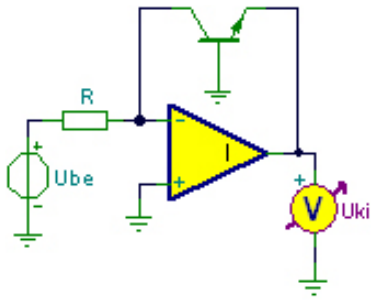
$$U_{ki} = U_2 \frac{R_4 (R_1+R_2)}{R_1 (R_3+R_4)} - U_1 \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \tag{4.16}$$

Még speciálisabb esetben, ha $R_1 = R_2$, akkor

$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) = U_2 - U_1 \tag{4.17}$$

4.5. Logaritmáló:

Ez az összeállítás a bemenő feszültséggel logaritmikus viszonyban lévő kimenő feszültséget ad le.

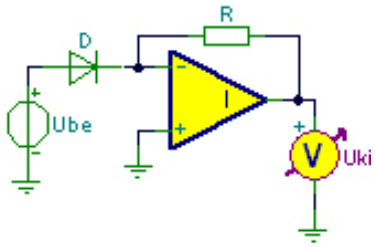


15. ábra. Logaritmáló

$$U_{be} = RI_C = RI_s e^{\frac{qU_{ki}}{k_B T}} \quad \Longrightarrow \quad U_{ki} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{U_{be}}{RI_s} \right) \tag{4.18}$$

4.6. Exponenciáló:

Ez az összellítás a bemenő feszültségtől exponenciálisan függő kimenő feszültséget ad le.



16. ábra. Exponenciáló

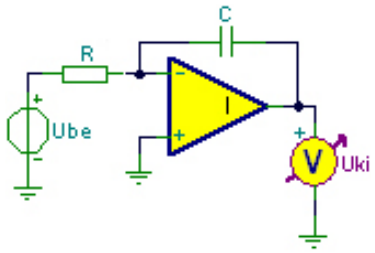
$$U_{be} = \frac{R}{A} I_{be} = \frac{R}{A} I_s \left(e^{\frac{qU_{ki}}{k_B T}} - 1 \right) \quad \Longrightarrow \quad U_{ki} = A U_{be} = R I_s \left(e^{\frac{qU_{ki}}{k_B T}} - 1 \right) \tag{4.19}$$

4.7. Szorzó:

Már néhány műveletet el tudunk végezni műveleti erősítős kapcsolásokkal, de a szorzás mg nincs meg és kifejezetten nincs is rá kapcsolás. Hogyan lehetne mégis megvalósítani?

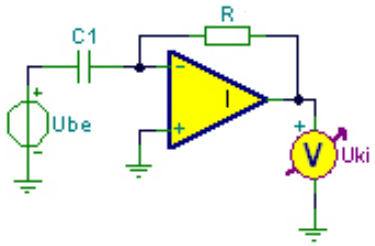
Első lépésben logaritmáljuk a szorozni kívánt jeleket, majd a logaritmált értékeket adjuk össze, végül ezt exponenciáljuk. Így megvalósítható a szorzás is.

4.8. Kváziintegráló:



17. ábra. Kvázi integráló

4.9. Kvázidifferenciáló:



18. ábra. Kvázi differenciáló

4.10. A harmónikus oszcillátor differenciálegyenletét megoldó áramkör:

A kváziintegráló és kvázidifferenciló áramkörök birtokában akár olyan kapcsolást is megvalósíthatunk, ami "megoldja" a harmónikus oszcillátor differenciálegyenletét.