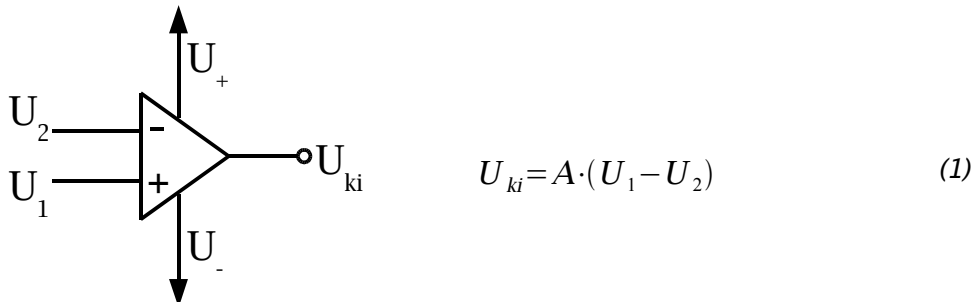


Műveleti erősítők alapkapcsolásai

A Miller-effektus

1. Bevezetés

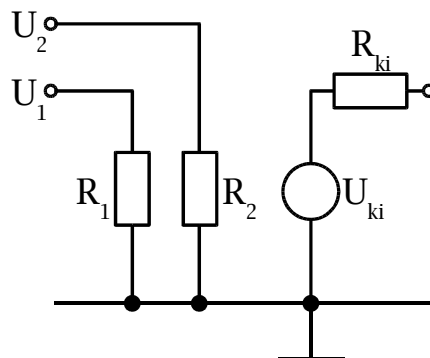
A műveleti erősítő – pl. a gyári standard $\mu A741$ – (1. ábra) olyan áramkör, amelynek a kimeneti feszültsége a következőképpen függ a bemenetére kapcsolt két feszültségértéktől:



1. ábra Műveleti erősítő jelölése

Itt U_1 az erősítő nem-invertáló (+) bemenetére adott feszültség, U_2 pedig az erősítő invertáló (-) bemenetére adott feszültség (figyeljünk az előjelekre!).

A műveleti erősítők fontos paraméterei a bemeneti és kimeneti ellenállások. A bemeneti ellenállás azt mutatja meg, hogy az erősítő bemenete mekkora ellenállással terheli az előtte lévő áramkört, a kimeneti ellenállás pedig azt, hogy a kimenetet terhelő áram mennyire változtatja meg a kimeneti feszültség értékét. A műveleti erősítő egyenáramú helyettesítő képét mutatja a 2. ábra.



2. ábra Műveleti erősítő egyenáramú helyettesítő képe

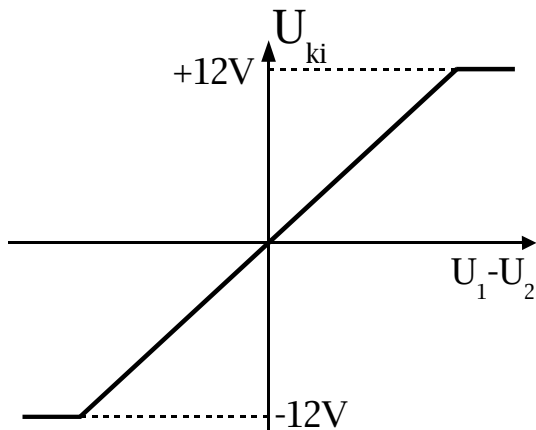
A bemeneti ellenállásokat R_1 és R_2 jelöli, a kimeneti ellenállást pedig R_{ki} . A kimeneten egy ideális feszültséggenerátort látunk, melynek elektromotoros ereje U_{ki} . Az (1) összefüggésből látható, hogy a kimeneti és bemeneti oldal között a feszültségerősítés teremt kapcsolatot. Természetesen a műveleti erősítőkben bonyolult elektronika valósítja meg a fent leírtakat, de a továbbiak szempontjából számunkra a belső részletek érdektelenek.

Lineáris üzemmód és telítés

A műveleti erősítőre tápfeszültséget kell kapcsolni ahhoz, hogy a szükséges funkciókat el tudja látni. Legcélszerűbb a 0 V-hoz képest szimmetrikus tápfeszültséget alkalmazni (± 12 V, ± 9 V, vagy ± 5 V), de sok esetben egyszerűbb és olcsóbb aszimmetrikus táplálást használni (pl. +5 V és 0 V). Figyelem! Az erősítők adatlapján feltüntetik a lehetséges tápfeszültség-üzemmódokat. Általános esetben szimmetrikus táplálást alkalmaznak, de ha egy erősítő üzemel aszimmetrikus feszültségről is, azt külön jelölik (single supply mód).

Egy általános műveleti erősítő nem működik aszimmetrikus táplálással (pl. +9 V-ról)!!!

A tápfeszültséget a kapcsolási rajzokon nem mindig szokták feltüntetni, de mindig oda kell hogy gondoljuk! Természetesen a kimeneti feszültség csak a tápfeszültségek - mint határok - között mozoghat. A műveleti erősítő egyenáramot is erősít. Egyenáramú karakterisztikája az előbbi korlátok miatt a 3. ábrán látható módon alakul.



3. ábra A műveleti erősítő egyenáramú karakterisztikája

Azt a tartományt, ahol az (1) egyenlet érvényesül, lineáris üzemmódnak nevezzük. Ezen a tartományon kívül a műveleti erősítő telítésbe megy, kimenő feszültsége független lesz a bemenő feszültségektől. Vegyük észre, hogy ha az erősítés (A) nagy érték, akkor a lineáris tartomány nagyon kicsi. Például a 3. ábrán látható karakterisztika esetén ha $A=10^6$, akkor $|(U_1-U_2)| < 12 \mu\text{V}$, azaz csak $12 \mu\text{V}$ -nál kisebb bemeneti feszültségkülönbség ad a kimeneten a tápfeszültségnél kisebb amplitúdójú jelet. Az átviteli függvény tehát nagyon meredek.

2. Ideális műveleti erősítő

Ma már nagyon jó minőségű műveleti erősítőket lehet kapni a kereskedelemben. Paramétereik megközelítik az ideális értékeket, ezért áramkörünk számításánál nem követünk el nagy hibát, ha azokkal számolunk. Nézzük meg, milyen paraméter-szélsőértékeket vehetünk számításba!

Ideális műveleti erősítő az az eszköz, amelynél (a korábbi ábrák jelöléseit használva)

- $A=\infty$
- $R_{be}=R_1=R_2=\infty$
- $R_k=0$
- $U_{be}=0$ esetén $U_{ki}=0$
- $B=\infty$ („B” az erősítő sávszélességét jelenti)
- $\text{CMRR}=\infty$ (CMRR =közös jel elnyomási tényező. Jelentése: $U_{ki}=0$ akkor is, ha $U_{be1}=U_{be2}=\infty$)
- végtelen feszültség-ugrási sebesség (angolul: slew rate. A kimeneti feszültség megváltozási sebessége; a valóságban általában $5\text{-}10 \text{ V}/\mu\text{s}$ nagyságrendű)

Ezeknek igen érdekes következményei vannak.

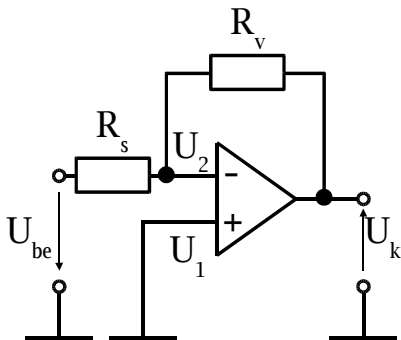
- a) Az erősítő lineáris tartománya nagyon szűk. Ez nem azt jelenti, hogy ezek az erősítők nem működhetnek lineáris üzemmódban, hanem azt, hogy ha az erősítő lineáris üzemmódban működik, akkor $|U_1-U_2|$ elhanyagolhatóan kicsiny marad. Más szavakkal: lineáris üzemmódban $U_1=U_2$ -nek vehető. Ez nagyon megkönnyíti az ilyen áramkörök számítását.
- b) Az erősítő bemenő ellenállása végtelen nagy, azaz bemenő árama nulla. Ez a tény egyes kapcsolásokban nagyon megkönnyíti a bemeneti pontra vonatkozó csomóponti törvény felírását.
- c) Az erősítő kimeneti ellenállása nulla, azaz a kimeneti kapocsfeszültség megegyezik az U_{ki} elektromotoros erővel. Ez egyes visszacsatolt kapcsolások kiszámítását könnyíti meg.

A valóságos műveleti erősítők igyekeznek megközelíteni az ideálist, azaz egyenáramú erősítésük igen nagy (több milliószoros), a bemenő ellenállásuk is nagy (esetenként több ezer $\text{M}\Omega$), a kimenő ellenállásuk pedig nagyon kicsi (néhány Ω).

3. Műveleti erősítők felhasználása

A gyakorlatban a műveleti erősítőket két alapkapcsolás valamelyikében használjuk. Mindkét esetben az erősítő feszültségerősítését a kimenet és a bemenet közötti visszacsatolás határozza meg. Figyelem! Erősítőkben visszacsatolás mindig a negatív bemenetre történik!

3.1 Invertáló kapcsolás



R_v : visszacsatoló ellenállás

R_s : soros ellenállás

A kapcsolás neve is mutatja, hogy a bemenetre adott pozitív feszültség a kimeneten negatív feszültséget eredményez. Nézzük meg hogyan!

Mivel $U_1 - U_2 \approx 0$, U_2 virtuális földpontonak tekinthető. U_{be} hatására R_s -en átfolyó áram az erősítőbe nem tud befolyani, ezért R_v -n keresztül a kimenet felé folyik. Az R_v -n eső feszültség megegyezik a kimeneti feszültséggel, s mivel ez a feszültség a virtuális földponthoz (U_2) képest csökkent, negatív előjelű lesz. Negatív bemeneti feszültség esetén az áram fordított irányba, azaz a kimenettől a virtuális földpont irányába folyik, és pozitív kimeneti feszültséget fogunk mérni. Ezek ismeretében láthatjuk, hogy az erősítést csupán az ellenállások (R_v és R_s) aránya határozza meg.

4. ábra Invertáló műveleti erősítő

Lássunk egy példát ugyanezzel a gondolatmenettel:
Legyen $R_v = 22 \text{ k}\Omega$ $R_s = 2,2 \text{ k}\Omega$ $U_{be} = 1 \text{ V}$.

Ekkor az R_v -n és R_s -en folyó áram: $I = 454 \mu\text{A}$. $U_{R_v} = I \cdot R_v = 454 \mu\text{A} \cdot 22 \text{ k}\Omega = 10 \text{ V}$

U_{R_v} a virtuális földhöz képest negatív, tehát $U_{ki} = -10 \text{ V} \rightarrow A = U_{ki} / U_{be} = 10 \text{ V} / 1 \text{ V} = 10$

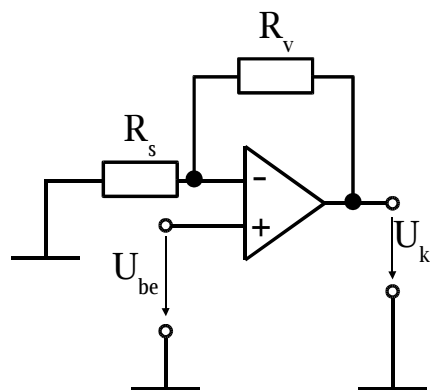
A 4. ábrán látható kapcsolás paramétereit (A_{uv} a visszacsatolásos feszültség erősítést jelenti):

$A_{uv} = -\left(\frac{R_v}{R_s}\right)$ $R_{be} = R_s$ $R_{ki} \approx 0$ (2)

A 4. ábrán látható kapcsolás paramétereit (A_{uv} a visszacsatolásos feszültség erősítést jelenti):

$$A_{uv} = -\left(\frac{R_v}{R_s}\right) \quad R_{be} = R_s \quad R_{ki} \approx 0 \quad (2)$$

3.2 Nem invertáló kapcsolás



R_v : visszacsatoló ellenállás

R_s : soros ellenállás

5. ábra Nem invertáló műveleti erősítő

Az 5. ábrán látható kapcsolás paramétereit:

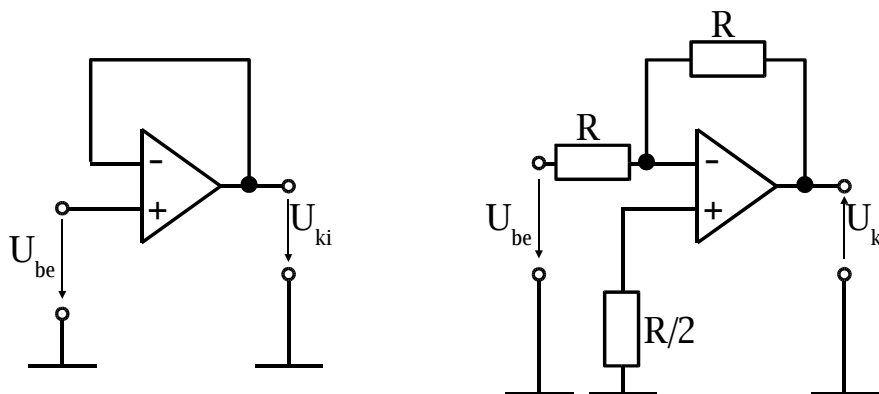
$$A_{uv} = 1 + \frac{R_v}{R_s} \quad R_{be} = \infty \quad R_{ki} \approx 0 \quad (3)$$

Fontos megjegyezni, hogy az invertáló kapcsoláshoz képest itt egy nagyon nagy bemeneti ellenállású erősítővel van dolgunk!

Elméleti feladat:

E1: Vezesse le a (3) összefüggést ideális műveleti erősítő esetén!

3.3 Követő erősítők



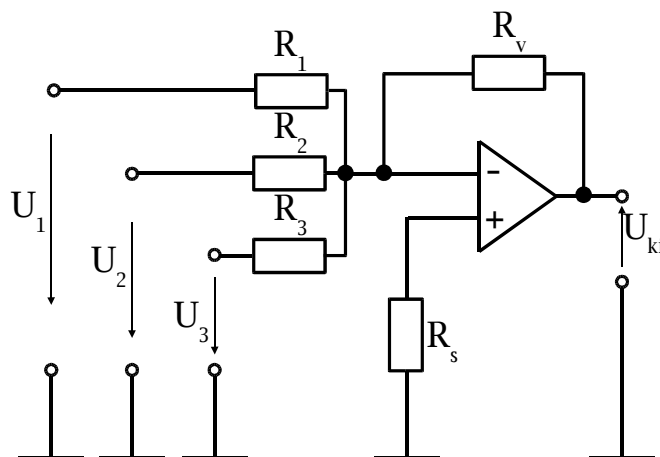
6. ábra Követő erősítők

A 6. ábrán a nem invertáló és az invertáló, egységnyi erősítésű - követő - erősítők kapcsolásait látjuk. Ezek a korábban megismert erősítőkapcsolások speciális esetei. Különösen jelentős a nem invertáló követő erősítő, mivel nagy bemeneti ellenállása következtében nem terheli a meghajtó fokozatot, ugyanakkor feszültséggenerátoros meghajtást biztosít a terhelés számára.

3.4 Műveletvégző áramkörök

A műveleti erősítő elnevezés abból származik, hogy a fenti áramkörökkel analóg (feszültség-) jelek közötti műveletek valósíthatók meg. A következőkben ezekre látunk néhány példát.

3.4.1 Összeadó áramkör



7. ábra Összeadó áramkör

$$U_{ki} = -\frac{R_v}{R} (U_1 + U_2 + U_3),$$

ahol $R = R_1 = R_2 = \dots = R_x$

A 7. ábra szerinti kapcsolásban a bemeneti feszültségek a hozzájuk tartozó ellenállásokon hoznak létre áramot, míg a kimeneti feszültség a visszacsatoló ellenálláson. Amennyiben a bemeneti ellenállások azonos értékűek, az összeadó minden feszültséget azonos súllyal vesz figyelembe. Ha $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_x$, akkor az ellenállások értékével fordítottan arányos súlyozású összeadót készíthetünk.

Írjuk fel R_1, R_2, R_3, R_v közös pontjára a csomóponti törvényt: $\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \frac{U_{ki}}{R_v} = 0$ (4)

(az erősítőbe befolyó áramot elhanyagoltuk, mert ideális erősítő esetén $R_{be} = \infty$).

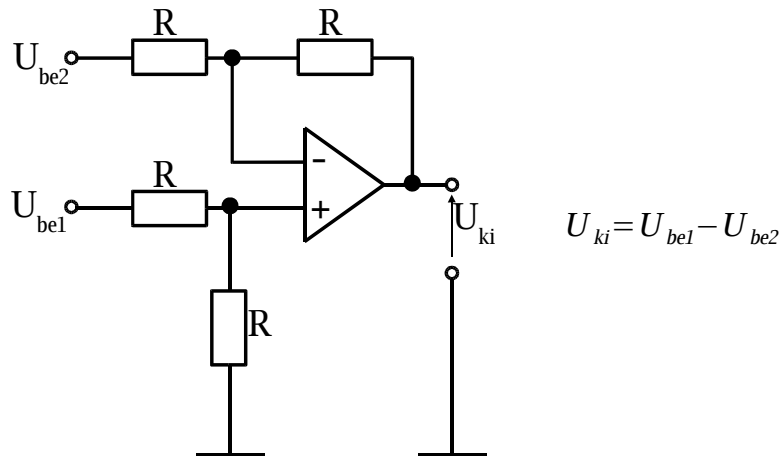
(4)-ből kifejezve a kimeneti feszültséget, látjuk, hogy U_{ki} arányos a bemeneti feszültségek összegével.

$$U_{ki} = -\left(\frac{R_v}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_v}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_v}{R_3} \cdot U_3 \right) \quad (5)$$

Így olyan „analóg számológépet” hozhatunk létre, amely három feszültség lineáris kombinációját (súlyozott összegét) számítja ki.

3.4.2 Kivonó áramkör

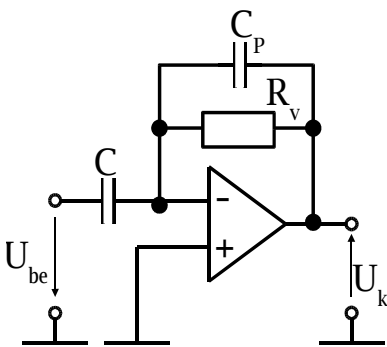
Kivonó áramkör például a műveleti erősítő két bemenetét felhasználva építhető fel. Ilyen kapcsolást mutat a 8. ábra.



8. ábra Kivonó áramkör

3.4.3 Differenciáló áramkör

Az analóg számítógépek megalkotásakor fontosak voltak az olyan áramkörök, amelyekkel megvalósíthatók voltak a differenciálás és az integrálás műveletei. Erre láthatunk példákat a következőkben.



9. ábra Deriváló áramkör

Differenciáló áramkörrel a bemeneti feszültség változásának sebességével arányos feszültséget tudunk előállítani a kimeneten. A bemeneti feszültséggel egy kondenzátort töltünk, illetve sütünk ki, s az azon átfolyó áramot alakítjuk át feszültséggé. Az invertáló bemenet ismét virtuális földpontnak tekinthető, ezért a kondenzátorba be- illetve az abból kifolyó áram az R_v ellenálláson folyik át a kimenetről a virtuális földpont irányába. Az R_v -n mérhető feszültség esés lesz a kimeneti feszültség, ami arányos U_{be} feszültség-változásának sebességével. Pozitív, lineáris bemeneti feszültség változás esetén állandó, negatív feszültség mérhető a műveleti erősítő kimenetén. A feszültségfordítás annak az

eredménye, hogy a bemeneti jelet az erősítő invertáló bemenetére vezetjük, így egy invertáló erősítőt kapunk (lásd a 4. ábrán).

A kondenzátoron folyó áram:

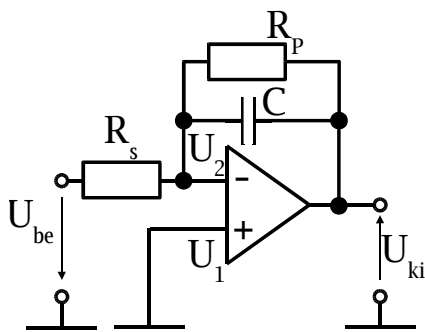
$$I = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dCU_c(t)}{dt} = C \frac{dU_c(t)}{dt}, \text{ ahol } U_c(t) \text{ a kondenzátoron mérhető feszültség, és } U_c(t) = U_{be}(t).$$

Az invertáló bemenetre felírt csomóponti törvény alapján: $I + \frac{U_{ki}}{R_v} = 0 \rightarrow U_{ki}(t) = -CR_v \frac{dU_{be}(t)}{dt}$

Az analóg számítógépek mellett differenciáló áramköröket használnak még például a szabályozástechnikában olyan helyeken, ahol egy folyamatot jellemző tulajdonság megváltozása nem szabad hogy túllépjen egy határértéket (pl. hőtágulás miatt a hőmérséklet-emelkedés sebessége egy kazánban). Ilyenkor a kimeneti egyenfeszültséget egy komparátorra (feszültség összehasonlító) kötik, ami a beállított maximális szint elérésekor vészjelet aktivál, vagy beavatkozást indít el.

Megjegyzendő, hogy áramkörünk akkor fog pontosan differenciálni, ha a $\tau = R_v C$ időállandó sokkal kisebb a deriválandó jel periódus idejénél: $\tau \ll T$, azaz $f \ll 1/\tau$. Ekkor a kimeneti jelszint is nagyon kicsi. Nagyobb amplitúdójú kimeneti jelet elő lehet állítani ugyanezzel a kapcsolással, de akkor a deriválás pontatlanabb lesz.

3.4.4 Integráló áramkör



10. ábra Integráló áramkör

Előfordul, hogy az előbbieken bemutatott áramköri funkciónak pontosan az ellentéte van szükségünk: a bemeneten található jel 0 V-tól mért nagyságával és időtartamával arányos kimeneti jelet szeretnénk kapni. Ehhez integráló áramkört kell felhasználnunk. Az előző kapcsoláshoz képest csupán annyit kell tennünk, hogy megcseréljük a kondenzátort és az ellenállást – ekkor integrátort kapunk.

U_2 most is virtuális földpont, így ha a bemeneti feszültség 0 V, a kimeneten - ha nem is 0 V-ot -, de mindenképpen konstans feszültséget kapunk. Ha pozitív, állandó feszültséget adunk a bemenetre, akkor U_2 -be befolyó áram a kondenzátoron kényszerül átfolyni, s abban növekvő töltést halmoz fel. Ennek hatására a kimeneti feszültség folyamatosan csökkenni fog, mert a kondenzátor kimenet felőli fegyverzetén is ugyanekkora töltés halmozódik fel, amelyet a kondenzátorba U_{ki} felől befolyó, egyre növekvő áram kell hogy bejuttasson. Hasonlóképpen egy negatív bemeneti jel lineárisan emelkedő pozitív feszültséget eredményez a kimeneten. A kimeneti jel változási sebessége arányos lesz a bemeneti feszültséggel.

A kimeneti feszültséget leíró egyenletet az alábbiak alapján írhatjuk fel:

Jelölje i a kondenzátoron folyó áramot, ekkor az (U_2 -re felírt) csomóponti törvény alapján:

$$\frac{U_{be}}{R_s} + i = 0 \quad (6)$$

Itt felhasználtuk, hogy az ideális erősítőnél $R_{be} = \infty$, s ezért abba áram nem folyik be. Azt is kihasználtuk, hogy ha az ideális erősítő lineáris üzemmódban működik, akkor $U_2 - U_1 = 0$, s ezért ebben a kapcsolásban $U_2 = 0$.

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_c}{dt} \quad (6) \text{ - ba való behelyettesítésével} \quad C \frac{dU_c}{dt} = - \frac{U_{be}}{R_s}$$

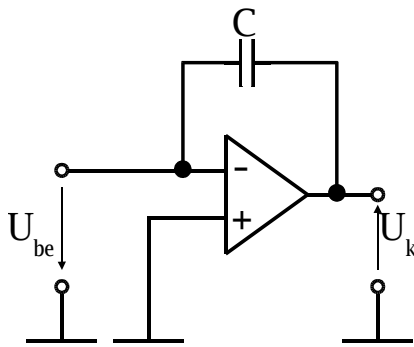
A kondenzátor feszültsége (s ezzel a kimeneti feszültség): $U_c(t) = U_{ki}(t) = - \frac{1}{R_s C} \int_0^t U_{be} dt$

Az integráló áramkör egy tipikus alkalmazási területe a nukleáris technikában a besugárzási szint, vagy a dózis mérése egy proporcionális detektor jelei alapján. Mint tudjuk, egy sugárzásból elnyelt dózis a detektor által átalakított beütésekéből származó impulzusok időbeli integrálja. Azonos dózis létrejöhet hosszú idő alatt kis intenzitású, és rövid idő alatt nagy intenzitású sugárzásból is. E két esetben a kimeneti feszültség meredeksége különböző, de végeredményben a feszültség szintje azonos lesz. Az integrátor tehát figyelembe veszi a bemeneti jel intenzitását és időtartamát is, és ezek alapján generálja a kimeneti jelet.

Itt is meg kell jegyezzük, hogy áramkörünk akkor fog pontosan integrálni, ha a $\tau = R_s C$ időállandó sokkal nagyobb az integrálandó jel periódus idejénél, azaz $\tau \gg T$, azaz $f \gg 1/\tau$. Ekkor a kimeneti jelszint is nagyon kicsi. Nagyobb amplitúdójú kimeneti jelet is elő lehet állítani ugyanezzel a kapcsolással, de akkor az integrálás is pontatlanabb lesz.

4. Miller effektus

A műveleti erősítők erősítése magas frekvenciákon csökken. Ennek az a magyarázata, hogy az IC belsejében kialakított áramkörökben, vezetékben a frekvencia növekedésével nő a szórt kapacitások hatása is. Ha ezek a kapacitások egy erősítő kapcsolás kimenete és bemenete között vannak, hatásuk megsokszorozódik. Erre vonatkozóan tekintsük a 11. ábrát, de most ne vegyük végtelennek az erősítést (hiszen éppen azt akarjuk meghatározni, hogy az erősítés hogyan befolyásolja a kondenzátor látszólagos értékét)!



11. ábra Miller-kapacitás egy erősítő kapcsolásban

$$i_c = C \frac{d(U_{ki} - U_{be})}{dt}, \text{ valamint tudjuk hogy } U_{ki} = -AU_{be}.$$

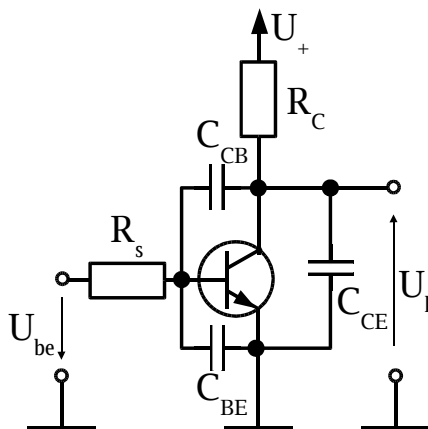
Ez utóbbit behelyettesítve:

$$i_c = C \frac{d}{dt}(-AU_{be} - U_{be}) = -C(1+A) \frac{dU_{be}}{dt}$$

Láthatjuk, hogy az erősítő invertáló bemenete és a kimenete közé kapcsolt kapacitás úgy viselkedik a bemenet felől nézve, mintha $(1+A)C$ kapacitása lenne. Ha A nagyon nagy, akkor még kis szórt kapacitások is jelentős hatásokat okozhatnak. Ezt nevezzük Miller-effektusnak.

A továbbiakban ezt vizsgáljuk egy tranzisztor esetében.

A tranzisztorok három kivezetése között mindig mérhető valamekkora kapacitás. Igaz, hogy a gyártás során ezeket igyekeznek minimalizálni, de mégis számolnunk kell egy nullától különböző értékkel. Különösen jelentőssé válhat ezen kapacitások hatása magasabb frekvenciákon. A 12. ábra szemlélteti egy tranzisztor kapacitásait.

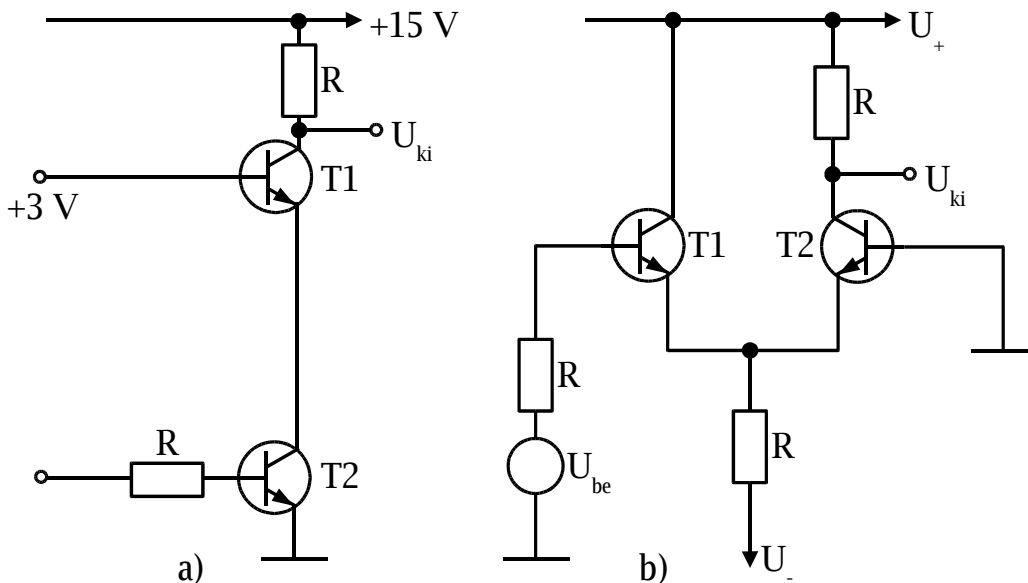


12. ábra Tranzisztor kapacitásai

Az előbbieknél alapján láthatjuk, hogy - amennyiben a tranzisztort feszültség erősítésre használjuk - a kollektor-bázis átmenet kapacitásánál fellép a Miller-effektus. Ilyen kapcsolásban a bázisfeszültség növekedése a kollektorfeszültség csökkenését vonja maga után, tehát itt valóban invertáló bemenet és kimenet közé kapcsolt kapacitásról van szó. Ez jelentősen befolyásolja a tranzisztor frekvenciamenetét.

Tegyük fel, hogy tranzisztorunk feszültségerősítése A , akkor C_{CB} -t helyettesíthetjük egy $(1+A)C_{CB}$ értékű kapacitással a bázis és a föld között. Nagy erősítés mellett C_{CB} frekvencia korlátozó hatása jelentőssé válhat. Látható, hogy a Miller-kapacitás értékét az erősítés határozza meg, így - ha erősíteni akarunk - az időálló csökkentésére csak a bemeneti ellenállás csökkentése ad módot.

A 13. ábra két megoldást mutat a Miller effektus csökkentésére. Mindkét kapcsolás trükkje az, hogy a kimenetről nincs közvetlen visszacsatolás a bemenetre, így az áramkör erősítése nem sokszorozza a tranzisztorok C_{CB} kapacitásait.



13. ábra a.)Kaszád erősítő

b.)Differenciál erősítő

A kaszkád kapcsolás esetében a második tranzisztor beiktatása azt eredményezi, hogy a kimeneti feszültséget nem a T_2 tranzisztor kollektoráról vesszük. A T_1 tranzisztoron a Miller-hatást az védi ki, hogy a bázisa egyenfeszültségre van kötve, így itt a kapacitásnak nem jut szerep.

A differenciál-erősítő esetében a helyzet nagyon hasonló, de T_2 bázisa ebben az esetben föld potenciálra kerül, így a kapacitás hatása itt sem tud megnyilvánulni.

Megjegyezzük, hogy bár vannak megoldások a Miller-hatás csökkentésére, a ténylegesen meglévő szórt kapacitásokat nem tudjuk kiküszöbölni. Ennek súlyos következményei vannak, amelyek például a számítástechnikában használt mikroprocesszoroknál nagyon jól megfigyelhetők. Az integrált áramkörök bonyolultságának növekedése, ennek következtében az alkatrész méretek folyamatos csökkenése folytán az alkatrészek és a vezetékek egyre közelebb vannak egymáshoz. A chipekben futó vezetékek szélessége például ma már a mikrométer tört része ($0,18-0,065 \mu\text{m}$). A vezetékek közötti szigetelő réteg szélessége is ebbe a nagyságrendbe esik, és ez a folyamatos méretcsökkenés elkerülhetetlenül a szórt kapacitások növekedéséhez vezet (emlékezzünk arra, hogy a két fémlemezről készült kondenzátor kapacitása fordítva arányos a közöttük lévő távolsággal...). A megnövekedett szórt kapacitások lecsökkentik az áramkör maximális működési sebességét. Ezt csak úgy lehet kiküszöbölni, hogy lecsökkentik a meghajtó fokozatok kimeneti ellenállását, s ezzel elérik, hogy a (parazita és gate – azaz tranzisztor-vezérlő) kondenzátorok nagy árammal, gyorsan töltődjenek fel. Az ellenállásokon átfolyó áramok Joule-hőt termelnek aminek mértéke I^2 -tel arányos, tehát a megnövekedett áramok jóval nagyobb fűtőteljesítményt jelentenek. Érdekes belegondolni, hogy végeredményben ez az oka annak, hogy a gyors, nagy frekvenciájú órajelekkel működő, nagy bonyolultságú mikroprocesszorok erőteljesen melegsznek, és a sebesség növelésével egyre erőteljesebb hűtést igényelnek. Végeredményben az egyszerű RC tag működése alapján megérthetjük, hogy miért olyan nehéz egyre nagyobb teljesítményű mikroprocesszorokat kifejleszteni!

Ellenőrző kérdések:

- E1: Milyen jellemző paraméterekkel bír egy ideális műveleti erősítő?
- E2: Írja fel a nem invertáló műveleti erősítő erősítését!
- E3: Mi az előnye egy nem invertáló követő erősítőnek az invertálóhoz képest?
- E4: Mely kapacitás játszik szerepet a Miller-effektusban?
- E5: Mekkora a megnövekedett Miller-kapacitás értéke, és hol jelentkezik?

5. Mérési feladatok

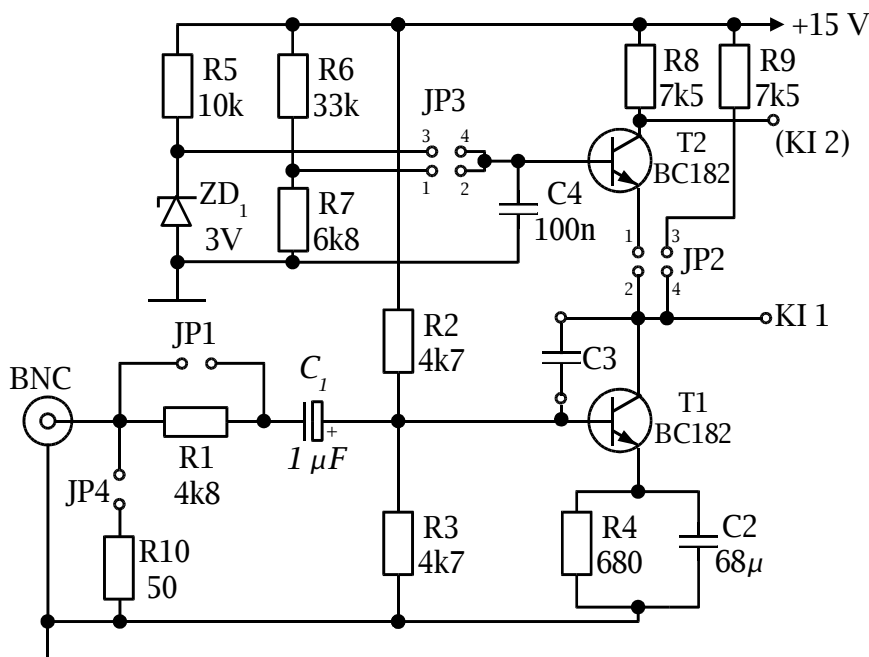
5.1 Mérések műveleti erősítőkkel

- M1: Készítsen invertáló kapcsolást (4. ábra) $\mu\text{A}741$ -es műveleti erősítővel! $R_v=470 \text{ k}\Omega$
 $R_s=100 \text{ k}\Omega$. Számolja ki a kapcsolás erősítését, majd mérje is meg! Változtassa a tápfeszültséget, és mérje a kimeneti feszültséget! Mit tapasztal?
- M2: Vizsgálja meg az összeadó áramkör működését (7. ábra)! $I_C=\mu\text{A}741$ $R_x=R_s=1 \text{ k}\Omega$.
Az összegezendő feszültséget feszültségosztóval állítsa elő, vagy végezzen súlyozott összeadást ugyanazzal a feszültséggel (pl. egyik tápfeszültség).
- M3: Vizsgálja meg a differenciáló áramkör működését 1 kHz-es szinusz, négyszögjel és háromszögjel segítségével (9. ábra)! Legyen $C=10 \text{ nF}$, $I_C=\mu\text{A}741$, $R_v=100 \text{ k}\Omega$, $C_p=100 \text{ pF}$ (nagyon kis érték)! C_p nincs az ideális erősítő kapcsolásában, vajon mire való? Gondoljon például a négyszögjel deriváltjára. A nagy feszültségamplitúdók okozhatnak kárt az IC ben, vagy vihetnek be zajt az áramkörbe? Próbálja ki az áramkört C_p nélkül is, és írja le a tapasztalatait!

- M4: Vizsgálja meg az integráló áramkör működését 1 kHz-es szinusz, négyszögjel és háromszögjel segítségével (10. ábra)! Legyen $C=10\text{ nF}$, $I_C=\mu\text{A741}$, $R_s=100\text{ k}\Omega$, $R_p=10\text{ M}\Omega$ (nagyon nagy érték). R_p nincs az ideális erősítő kapcsolásában, vajon mire való? Gondoljon arra mi történhet ha a bemeneti jel kis amplitúdójú egyenfeszültséget tartalmaz, és azt is integráljuk! Próbálja ki az áramkört R_p nélkül is, és írja le a tapasztalatait!
- M5: Mérje meg, hogy a neminvertáló követő erősítő erősítése mekkora! Jelgenerátorral mérje meg, hogy szinuszjellel vizsgálva mekkora a követő erősítő felső törésponti frekvenciája.

5.2 Miller-effektus mérése

A 14. ábrán látható az V. mérőpanel 3. áramkörének sémája, amelyen tanulmányozni fogják a Miller effektust.



14. ábra A mérőpanel sémája

- M6: Jumperek segítségével kösse a bemeneti (T_1) tranzisztor kollektorába az R_9 -es $7,5\text{ k}\Omega$ -os ellenállást az előre elkészített panelen. A következő jumper beállítások mellett kezdjük el a mérést: JP1: zárva; JP2: 3-4 zárva; JP3: 1-2 zárva JP4: nyitva. C_3 : nincs bekötve
- M7: Mérje meg a fokozat feszültségerősítését 1 kHz-es szinuszos bemeneti jellel. Ügyeljen arra, hogy az erősítő ne torzítsa!
- M8: Keresse meg a kapcsolás -3 dB -es felső törésponti frekvenciáját.
- M9: Kapcsoljon egy 22 pF -os kondenzátort (C_3) T_1 kollektora és bázisa közé. Hogyan módosítja C_3 a kapcsolás felső határfrekvenciáját?
- M10: Módosítsa a kapcsolást T_2 bekapcsolásával a kisimpedanciás bázisosztót használva. Ez a kapcsolás egy kaszkád kapcsolás. Most is mérje ki a felső határfrekvenciát!
Mit tapasztal? Mi a határfrekvencia ilyen mértékű megváltozásának a magyarázata?
Megjegyzés: „ KI_2 ” nincs kivezetve a mérőpanelen. Keresse meg ezt a pontot a panelen, és használja az oszcilloszkóp csipeszes mérőfejét a mérőcsúcs fix rögzítéséhez a mérés alatt!