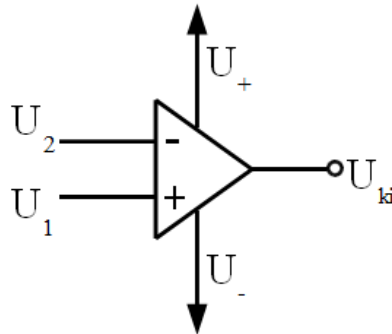


Műveleti erősítők alapkapcsolásai

1. Bevezetés

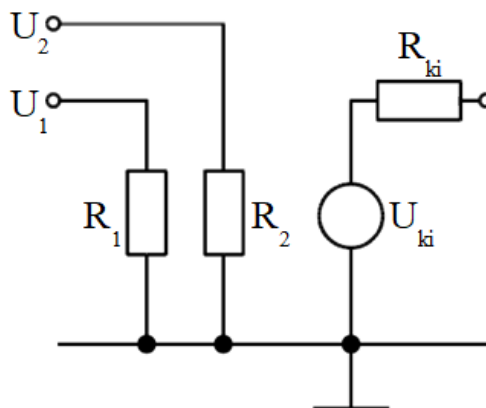
A műveleti erősítő (1. ábra) olyan áramkör, amelynek a kimeneti feszültsége a következőképpen függ a bemenetére kapcsolt két feszültségértéktől: $U_{ki} = A_u \cdot (U_1 - U_2)$ (1)



1. ábra - Műveleti erősítő jelölése

Az erősítőnél A_u a feszültségerősítés, U_1 az erősítő nem-invertáló (+) bemenetére adott feszültség, U_2 pedig az erősítő invertáló (-) bemenetére adott feszültség.

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 feszültsége U_{ki} . Az (1) összefüggésből látható, hogy a kimeneti és bemeneti oldal között a feszültségerősítés teremt kapcsolatot.



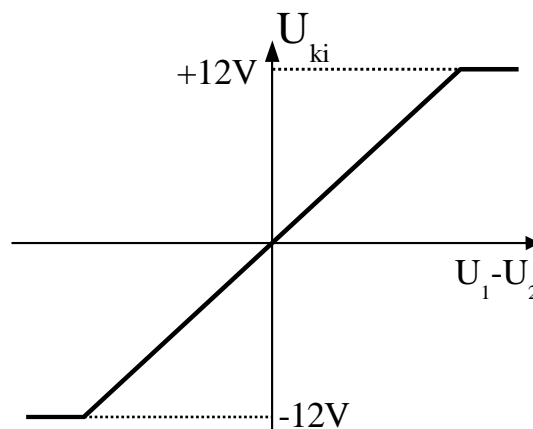
2. Lineáris üzemmód és telítés

A műveleti erősítőre tápfeszültséget kell kapcsolni ahhoz, hogy megfelelően működjön. Többnyire 0V-hoz képest szimmetrikus tápfeszültséget szokás alkalmazni ($\pm 12V$, $\pm 9V$, vagy $\pm 5V$), de sok esetben egyszerűbb és olcsóbb aszimmetrikus táplálást használni (pl. $+5V$ és $0V$).

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 mode).

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

A tápfeszültséget a kapcsolási rajzokon nem mindig szokták feltüntetni! 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. Ha a feszültségerősítés (A_u) nagy érték, akkor a lineáris tartomány nagyon kicsi. Például a 3. ábrán látható karakterisztika esetén, ha $A_u=10^6$, akkor $|(U_1 - U_2)| < 12\mu V$, azaz csak $12\mu V$ -nál kisebb bemeneti feszültségkülönbség ad a kimeneten a tápfeszültségnél kisebb jelet. Az átviteli függvény tehát nagyon meredek.

3. Ideális műveleti erősítő

Ma már nagyon jó minőségű műveleti erősítőket lehet kapni. Paramétereik megközelítik az ideális értékeket, ezért áramkörünk számításánál nem követünk el nagy hibát, ha azokkal számolunk.



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

$$A_u = \infty$$

$$R_{be} = R_1 = R_2 = \infty \Omega$$

$$R_{ki} = 0 \Omega$$

$$U_{be} = 0V \text{ esetén } U_{ki} = 0V$$

$B = \infty$ Hz (az erősítő sávszélessége)

$CMRR = \infty$ ($CMRR = \text{közös jel elnyomási tényező}$. Jelentése: $U_{ki} = 0V$ akkor is, ha $U_{be1} = U_{be2} = \infty V$)

Feszültség-ugrási sebesség (slew rate), a kimeneti feszültség megváltozási sebessége, a valóságban általában $5-10V/\mu s$ nagyságrendű)

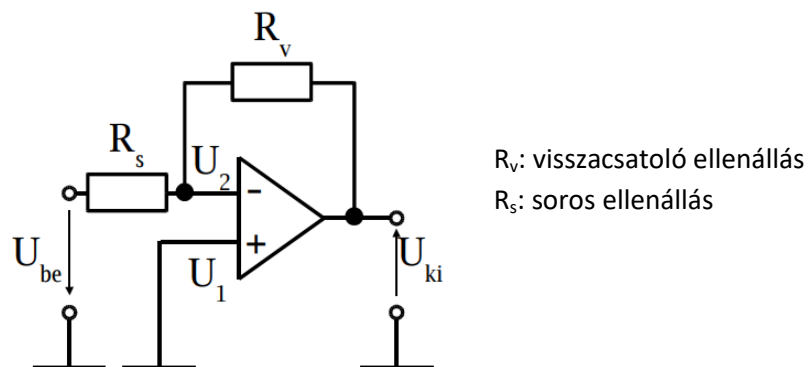
Az erősítő lineáris tartománya nagyon szűk. Ez nem azt jelenti, hogy ezek az erősítők nem működhetnek lineáris üzemmódban, hanem azt, hogy ha az erősítő lineáris üzemmódban működik, akkor $|U_1 - U_2|$ elhanyagolhatóan kicsi marad. Tehát lineáris üzemmódban $U_1 = U_2$ -nek vehető. Ez nagyon megkönnyíti az ilyen áramkörök számítását.

Az erősítő bemenő ellenállása végtelen nagy, azaz bemenő árama nulla. Az erősítő kimeneti ellenállása nulla, a kimeneti feszültség megegyezik az U_{ki} feszültséggel. 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 $M\Omega$), a kimenő ellenállásuk pedig nagyon kicsi (néhány Ω).

4. 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. Erősítőkben visszacsatolás a negatív bemenetre történik!

4.1. Invertáló kapcsolás



4. ábra - Invertáló műveleti erősítő

A kapcsolat neve is mutatja, hogy a bemenetre adott pozitív feszültség a kimeneten negatív feszültséget eredményez.



Mivel $U_1 - U_2 \approx 0$, U_2 virtuális földpontnak 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 és 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.

Például:

$R_v = 22 \text{ k}\Omega$ $R_s = 2,2 \text{ k}\Omega$ $U_{be} = 1 \text{ V}$.

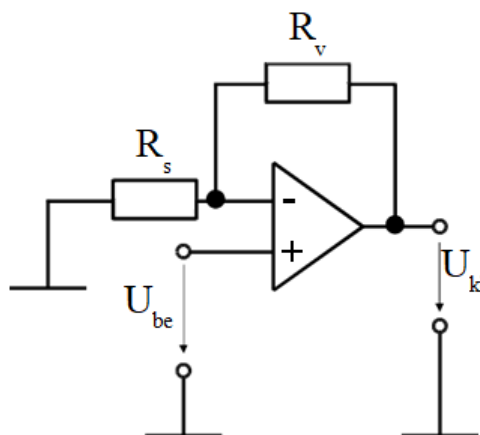
Ekkor az R_v -n és R_s -en folyó áram: $I = 454 \mu\text{A}$. $U_{R_v} = I \cdot R_v = 454 \mu\text{A} \cdot 22 \text{ k}\Omega = 10 \text{ V}$

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

A 4. ábrán látható kapcsolás paraméterei (A_{uv} a visszacsatolt feszültségerősítés):

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

4.2. Nem invertáló kapcsolás



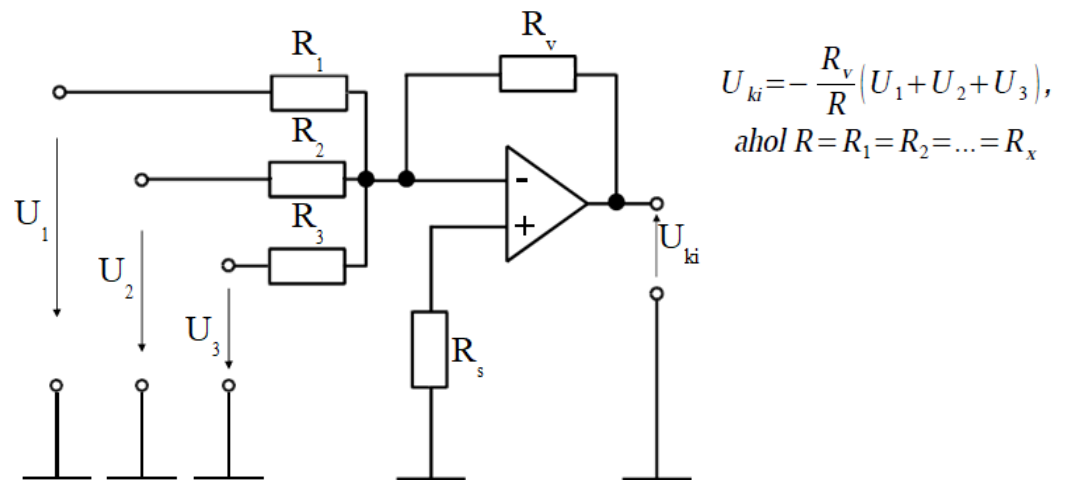
5. ábra - Nem invertáló műveleti erősítő

Az 5. ábrán látható kapcsolás paraméterei:

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

Az invertáló kapcsoláshoz képest ennek az erősítőnek nagy bemeneti ellenállása van!

4.3. Összeadó áramkör



6. ábra - Összeadó áramkör

A 6. 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:

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \frac{U_{ki}}{R_v} = 0 \quad (4)$$

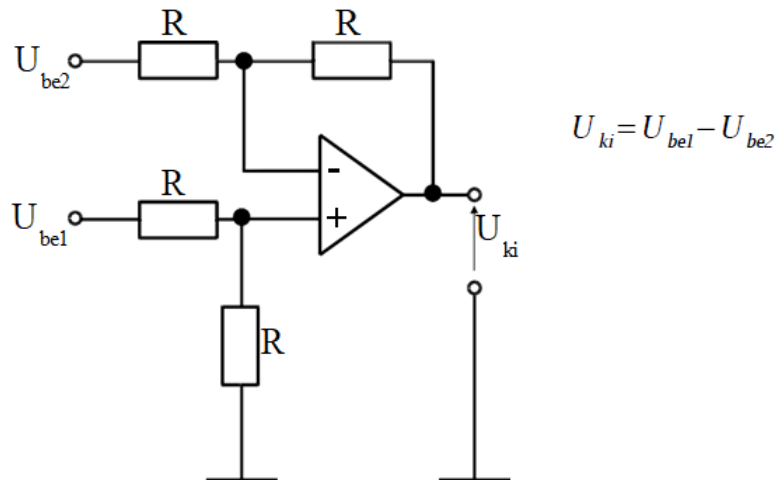
(az erősítőbe befolyó áramot elhanyagoltuk, mert ideális erősítő esetén $R_{be} = \infty$)

Az egyenletből (4) 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 „analog számológépet” hozhatunk létre, amely három feszültség lineáris kombinációját (súlyozott összegét) számítja ki.

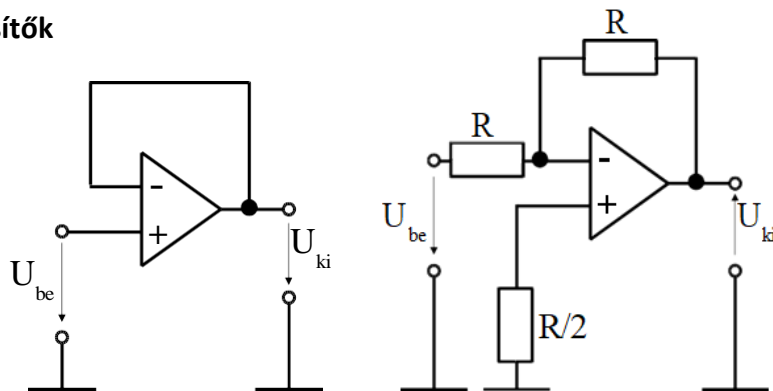
4.4. Kivonó áramkör



7. ábra - Kivonó áramkör

Kivonó áramkör például a műveleti erősítő két bemenetét felhasználva építhető fel. Ilyen kapcsolást mutat a 7. ábra.

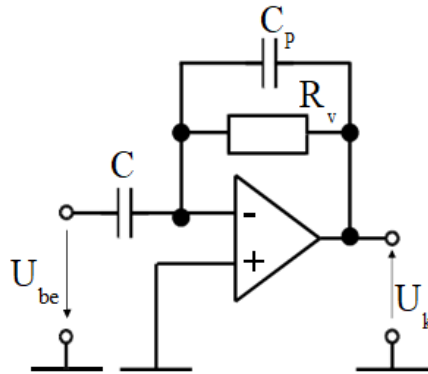
4.5. Követő erősítők



8. ábra - Nem invertáló és invertáló követő erősítő

A 8. ábrán a nem invertáló és az invertáló, egységnyi ($A=1$) erősítésű - követő - erősítők kapcsolásai láthatók. Nagy bemeneti ellenállása miatt nem terheli a meghajtó fokozatot, ugyanakkor feszültséggenerátoros meghajtást biztosít a terhelés számára.

4.6. Differenciáló áramkör



9. ábra - Differenciáló áramkör

Differenciáló áramkörrel (9. ábra) a bemeneti feszültség változásának sebességével arányos feszültséget tudunk előállítani a kimeneten. A bemeneti feszültséggel egy kondenzátort töltünk, illetve sűrűnk ki és az azon átfolyó áramot alakítjuk át feszültséggé. Az invertáló bemenet 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 lesz a kimeneti feszültség, ami arányos U_{be} 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.

A kondenzátoron folyó áram:

$$I = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dCU_c(t)}{dt} = C \frac{dU_c(t)}{dt}$$

ahol $U_c(t)$ a kondenzátoron mérhető feszültség, és $U_c(t) = U_{be}(t)$.

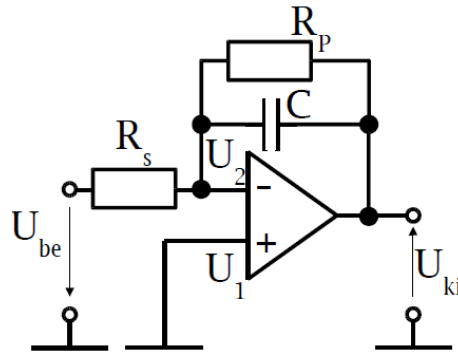
Az invertáló bemenetre felírt csomóponti törvény alapján:

$$I + \frac{U_{ki}}{R_v} = 0 \rightarrow U_{ki}(t) = -CR_v \frac{dU_{be}(t)}{dt}$$

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 kötik, ami a beállított maximális szint elérésekor vészjelet aktivál, vagy beavatkozást indít el.

Az áramkör 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!

4.7. Integráló áramkör



10. ábra - Integráló áramkör

Előfordul, hogy az előbbieken bemutatott áramköri funkciónak pontosan az ellentétére 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 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” és 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.

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

$$\frac{U_{be}}{R_s} + i = 0$$

Az ideális erősítőnél $R_{be} = \infty$, ezért abba áram nem folyik be. Ha az ideális erősítő lineáris üzemmódban működik, akkor $U_2 - U_1 = 0V$, és ezért ebben a kapcsolásban $U_2 = 0V$.

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_c}{dt} \rightarrow C \frac{dU_c}{dt} = - \frac{U_{be}}{R_s}$$

A kondenzátor feszültsége:

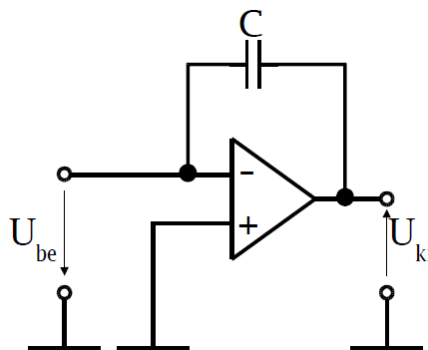
$$U_c(t) = U_{ki}(t) = - \frac{1}{R_s C} \int_0^t U_{be} dt$$

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 beütésekből 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.

Az áramkörünk akkor fog pontosan integrálni, ha a $\tau=R_vC$ 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!

4.8. Miller effektus



11. ábra - Miller kapacitás szemléltetése

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 nézzük a 11. ábrát, de most ne vegyük végtelennek az erősítést (hiszen éppen azt akarjuk meghatározni, hogy az erősítés hogyan befolyásolja a kondenzátor látszólagos értékét)!

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

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.

5. Mérési feladatok

M1: Készítsen invertáló kapcsolást (4. ábra) μ A741-es műveleti erősítővel!

$R_v=470\text{ k}\Omega$, $R_s=100\text{ k}\Omega$. A tápfeszültség legyen szimmetrikus $\pm 5\text{V}$. A bemenő jel DC 100mV , melyet növeljen 100mV -os lépésekben amíg az erősítő kimenete telítésbe nem megy. Határozza meg az erősítést a mért adatok alapján és ezt igazolja számítással is!

M2: Vizsgálja meg az összeadó áramkör működését! (7. ábra)

$R_1=R_2=R_s=R_v=1\text{ k}\Omega$. Elegendő két feszültséget összegeznie ($U_{be1} = U_{be2}$). Azaz a két bement összeköthető! A mérést végezze el 100mV , 500mV és 1V -os bementi feszültségek esetén.

M3: Méréssel bizonyítsa, hogy a nem invertáló követő erősítő (6. ábra) erősítése $A_u=1$! Függvénygenerátorral adjon 1 kHz -es szinuszos jelet az áramkör bementére, melynek csúcstól-csúsig vett értéke (V_{pp}) 100mV . Vizsgálja meg mekkora a követő erősítő felső törésponti frekvenciája. A mérés akkor jó, ha a jelalak nem torzul, csak az amplitúdója csökken a maximális érték $\sqrt{2}$ -ed részére!

M4: Vizsgálja meg a differenciálós áramkör működését 1 kHz -es 100mV -os szinuszos-, négy- és háromszögjel segítségével (9. ábra)! Legyen $C=10\text{ nF}$, $R_v=100\text{ k}\Omega$, $C_p=100\text{ pF}$!

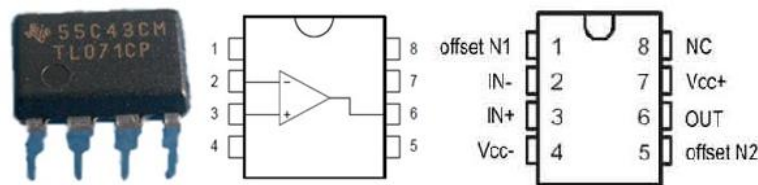
Mi C_p szerepe? Próbálja ki az áramkört C_p -vel és anélkül is, és írja le a tapasztalatait!

Az oszcilloszkópon jelenítse meg a bemenő jelet is és ennek függvényében vizsgálja a kimeneti jelet. A jegyzőkönyvbe tegyen képet a látott jelalakokról.

M5: Vizsgálja meg az integrálós áramkör működését 1 kHz -es 100mV -os szinuszos-, négy- és háromszögjel segítségével (10. ábra)! Legyen $C=10\text{ nF}$, $R_s=100\text{ k}\Omega$, $R_p=10\text{ M}\Omega$.

Mi R_p szerepe? Próbálja ki az áramkört R_p -vel és anélkül is, és írja le a tapasztalatait!

Az oszcilloszkópon jelenítse meg a bemenő jelet is és ennek függvényében vizsgálja a kimeneti jelet. A jegyzőkönyvbe tegyen képet a látott jelalakokról.



12. ábra – TL071 és μ A741 lábkiosztása

A jegyzőkönyvbe kerüljenek be tételesen felsorolva a felhasznált mérőeszközök, generátorok, vezetékek és alkatrészek típusal-típuszámmal, darabszámmal és értékkel, ha ezek megtalálhatók az eszközökön! A fotók mérete olyan legyen, hogy a jegyzőkönyv ne haladja meg a 10 Mbyte -ot.

A jegyzőkönyv az alábbi formátumú legyen: M2_vezetéknev1_vezetéknev2.pdf