

## 2. Mérés

### Áramkör építési gyakorlat II.

2018.02.06.

Összeállította: Mészáros András

Méréstechnikában napjainkban elengedhetetlen egyrészt a nagy pontosság, másrészt hogy a mérőműszer minél kisebb mértékben legyen ráhatással a vizsgálandó áramkörre, harmadrészt pedig minél kisebb villamos és nem villamos mennyiségek nagy pontosságú mérésére is egyaránt legyen lehetőség.

A mérésre kerülő precíziós egyenirányító kapcsolások:

- Precíziós félhullámú egyenirányító,
- Precíziós kétutas egyenirányító,
- Precíziós teljes hullámú egyenirányító.

Az útmutató (valamint a III. útmutató, de mindent a maga idejében) az egyenirányítókon túl kitér még olyan áramkörök vizsgálatára, melyek néhány alkatrész felhasználásával tetszőleges amplitúdójú és frekvenciájú váltakozó áramú jelek előállítására kiválóan alkalmasak, valamint szűrőkarakterisztikák frekvenciamenetének kompenzálására használatosak.

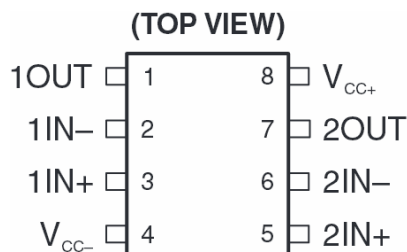
Ilyen, a mérés során megismerendő áramkörök:

- Kvadratúra oszcillátor,
- Mindentáteresztő szűrő.

#### **Alkatrész jegyzék:**

- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| ➤ LM258 1db,          | ➤ 10k ellenállás 3db,    |
| ➤ RC4558 1db,         | ➤ 20k ellenállás 2db,    |
| ➤ 1N4007 4db,         | ➤ 10k potenciométer 1db, |
| ➤ BAT54 2db,          | ➤ 15nF kondenzátor 3db,  |
| ➤ 1kΩ ellenállás 1db, | ➤ 470nF kondenzátor 2db. |

#### **2.0 mérés:**



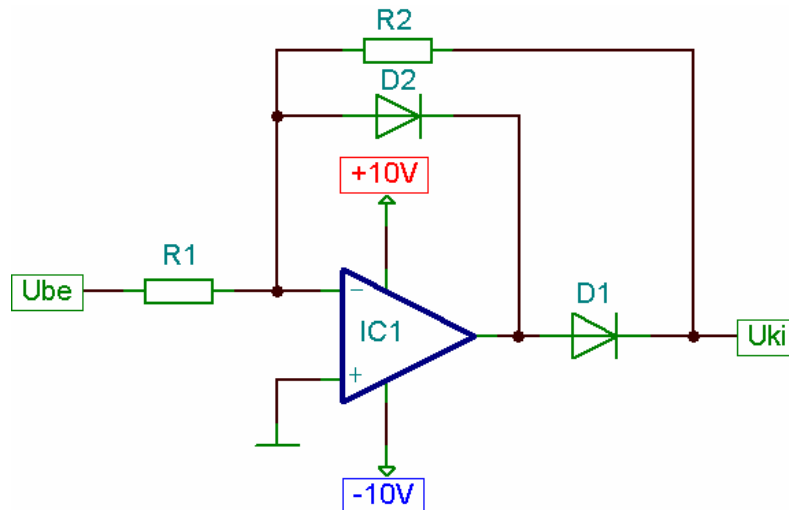
1. ábra: LM258 és RC4558 lábkiosztása

Az első mérési útmutatóban szereplő módon ismét ellenőrizzük le a méréshez rendelkezése bocsájtott műveleti erősítő működőképességét! A mérés során használt műveleti erősítő DIP8-as tokjában mindkét erősítőt hajtjuk meg nullkomparátoros üzemmódban.

**A mérőáramkörök esetleges gerjedése elkerülése végett illesszünk 470nF-os szűrőkondenzátorokat a +U<sub>I</sub>-GND és -U<sub>I</sub>-GND táppontok közé!**

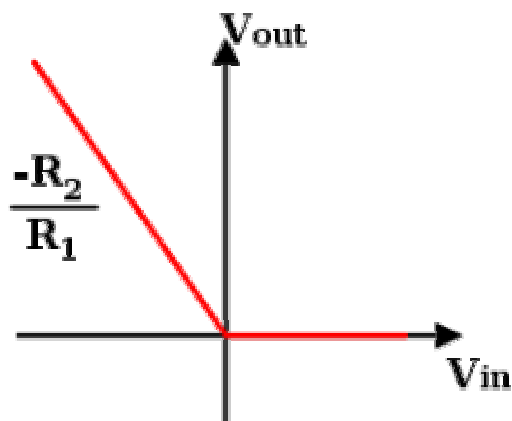
## 2.1 Félhullámú egyenirányító

A 2. ábra szerinti precíziós egyenirányító esetében, ha a bemeneti feszültség nagyobb nullánál, akkor  $D_1$  dióda zárva van és  $D_2$  vezet, ezért a kimeneti feszültség nulla lesz; mivel  $R_2$  egyik lába a virtuális földpontra csatlakozik (U.) és nem folyik rajta keresztül áram. Ha a bemenet kisebb nullánál, úgy  $D_1$  dióda nyit és  $D_2$  zár és a kimeneti feszültség látszólagos értéke a bemeneti feszültséggel, illetve annak  $-R_2/R_1$  -szeresével fog változni. Ez a képlet azonban csak akkor alkalmazható, ha  $R_2$  ellenállás értéke mellett  $D_1$  dinamikus ellenállása elhanyagolhatóan kicsi. A műveleti erősítő bemeneti- és a kimeneti feszültség viszonyait a 3. ábra szemlélteti.



2. ábra: Precíziós félhullámú egyenirányító

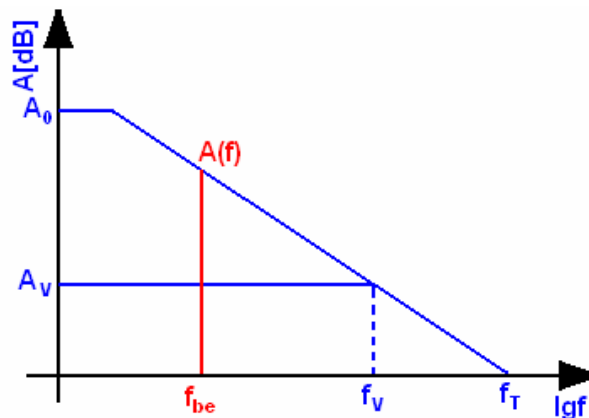
Az áramkör nagy előnye az egyszerű egydiódás precíziós félhullámú egyenirányítóval szemben, hogy az opamp kimenete egyik félperiódusban sem szaturál – hála a  $D_2$  dióda általi visszacsatolásnak-, így nagyobb frekvenciájú jelek is mérhetővé válnak.



3. ábra: Félhullámú egyenirányító transzfer karakterisztikája

A precíziós egyenirányító tehát nagyon kicsi amplitúdójú jelek egyenirányítására alkalmas. Ennek oka, hogy a diódák a negatív visszacsatoló hurokban helyezkednek el, melynek következtében a látszólagos nyitófeszültségük körülbelül a műveleti erősítő nyílthurkú erősítésére csökken (ami sokezeretől milliós nagyságrendig is terjedhet).

Azonban emlékezni kell arra, hogy a műveleti erősítő nyílthurkú erősítése frekvenciafüggő, melyből az is következik, hogy a dióda látszólagos nyitófeszültsége is függeni fog a frekvenciától. Közvetlenül a műveleti erősítő szemszögéből nézve a dióda nyitófeszültsége  $U_{nyitó}/A(f)$  értékűre csökken, ahol  $A(f)$  az adott bemeneti frekvenciához tartozó nyílthurkú erősítés (4. ábra).



4. ábra: A precíziós egyenirányító frekvenciafüggése

A teljes kapcsolásban természetesen szerepel még, az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállások által beállított erősítés érték is, amely szintén hatással van a dióda látszólagos nyitófeszültségére. A hatás az ellenállások osztásarányával történő kiegészítést jelenti az előbbi formulának, tehát:

$$U'_{nyitó} = \frac{U_{nyitó}}{A(f)} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Ugyanakkor számításba kell venni az egyenirányító frekvenciafüggését is, mely problémakör két részből tevődik össze:

1. Alacsony frekvenciákon a kimeneti jelalak a vártak („ideálisnak”) megfelel, azonban a frekvencia növelésével a nullátmenetek mentén (különösen a lefutó élek esetén) torzulás, túlfutás jelensége fog feltűnni, egyre növekvő mértékben. Ennek oka az áramkörben szereplő diódák véges kapcsolási sebessége, ami normál szilíciumdiódák esetében eléggé alacsony (ms nagyságrend). Ezen problémát a gyakorlatban nagy kapcsolási sebességű (ns) Schottky-diódák, vagy SiC (szilícium-karbid) diódák beiktatásával lehet kiküszöbölni; ezek azonban jellemzően sokkal drágábbak is.

2. Gyorsabb kapcsolási sebességű diódák alkalmazásával tehát lehetőség nyílik megemlíteni a működési frekvenciatartományt. A frekvencia további növekedése azonban egy, a korábbihoz képest eltérő torzulást fog eredményezni a kimeneti jelben; a szinuszfélhullámok fel- és lefutó élei 0V közelében kerekedni, lankásodni kezdenek. Ezen jelenség magyarázatához tudni kell, hogy a szinuszjel a nullátmeneteinél a legmeredekebb, ami a függvény deriválásával igazolható:

$$U(t) = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$\frac{d(U(t))}{dt} = A\omega \cdot \cos(\omega t)$$

Ha  $t=0$  (nullátmenet), akkor megkapjuk, hogy a függvény a legmeredekebb pontjainál  $A\omega$  [V/ $\mu$ s] meredekségű, mivel ilyenkor  $\cos(\omega t)=1$ . A műveleti erősítők maximális felfutási meredekségét (**SR – Slew Rate**) a kimenetükön definiálják (katalógus adat); ez egyúttal azt is jelenti, hogy nem a vizsgálni kívánt jel maximális meredekségét kell az előbbi összefüggéssel meghatározni. Ezáltal a műveleti erősítő SR-je oly módon számít, hogy a bemeneti jel maximális felfutási meredeksége még tovább szorzódik az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállások által beállított erősítéssel, és az így kapott jel jelentik meg a kimeneten. Amennyiben ilyen torzítási jelenség lépne fel, úgy nagyobb SR-ű műveleti erősítőt kell alkalmazni.

#### **Méréshez szükséges adatok:**

IC: LM258 ( $U_i = \pm 10V$ ), vagy

IC: RC4558 (6. mérési pontban)

$D_1$  és  $D_2$  1N4007 normál Si diódák, vagy

BAT54 Schottky-k (5. és 6. mérési pontban)

$R_1 = 1k\Omega$

$R_2 = 10k\Omega$

\* A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

\* Természetesen csak azon jelalakok kerüljenek rögzítésre, melyek hullámformájában számottevő eltérés van a többihez képest (nincs szükség hasonló, avagy egyforma időfüggvények tucatjaira).

\* Az RC4558 SR-je  $1,1V/\mu s$ , szemben az LM258  $0,3V/\mu s$ -jával.

#### **Mérési feladatok:**

1. Mérjük meg a rendelkezésre álló diódák nyitófeszültségét Hameg multiméter dióдавizsgáló funkciójával!

2. Vizsgáljuk meg a kapcsolás kimeneti jelalakját több frekvencia (50Hz, 100Hz, 500Hz, 1kHz, 10kHz, 20kHz és 50kHz mindenképp) és amplitúdó mellett. Rögzítsük a be- és kimeneti jelalakokat fázishelyesen (természetesen csak ott, ahol van számottevő eltérés a hullámformákban)! Ábrázoljuk a diódák látszólagos nyitófeszültségét a frekvencia függvényében!

3. Mérjük meg  $U_{bemin}$  értékét (ha lehet)!

4. Mérjük meg az erősítést, igazoljuk számítással (nem-invertáló kapcsolás), majd rajzoljuk fel a kapcsolás transzfer ( $U_{be}-U_{ki}$ ) karakterisztikáját!

5. Vegyük fel a kapcsolás transzfer karakterisztikát XY módban is (alacsony működési frekvencián)!

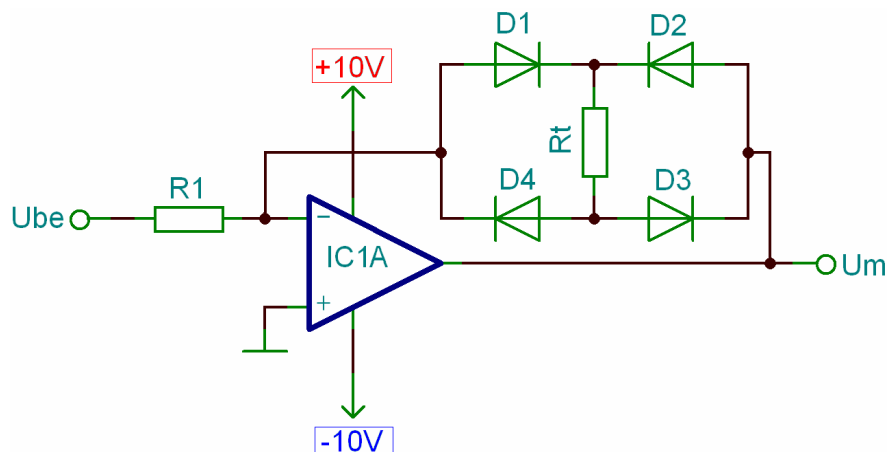
6. Cseréljük ki  $D_1$  és  $D_2$  diódákat Schottky-diódákra, majd ismételjük meg a 2. pontot!

7. Cseréljük ki az IC-t RC4558 típusúra, majd ismételjük meg az 2. pontot!

## 2.2 Szimmetrikus kimenetű kétutas precíziós egyenirányító

Váltakozó áramú jelek mérésekor túlnyomórészt kétutas egyenirányításra van szükség. Manapság az egyenirányítást követően valamilyen feldolgozó áramkörre (például A/D konverterre) kerül az egyenirányított jel, akár közvetlenül, akár szűrőfokozatokon keresztül. Ilyen alkalmazás során az egyenirányító kimenetének aszimmetrikusnak kell lennie, vagyis a kimeneti csatlakozások egyikének földpotenciálra kell, hogy legyen; erre lesz példa a 2.3 mérési pont.

Egyszerűbb, vagy inkább speciálisabb esetekben azonban elegendő lehet olyan egyenirányító is, melynek a terhelése (kimenete) lebeg. Erre példa lehet egy kézi radioaktív sugázmérő, melynek kijelzését egy analóg deprez-műszer végzi, melynek nem működési feltétele az aszimmetrikus meghajtás. Ilyen, lebegő kimenetű precíziós egyenirányítóra példa a 5. ábra. Az egyenirányító kimenete  $R_t$  terhelő ellenállás két végpontja között értendő.



5. ábra: Lebegő kimenetű precíziós kétutas egyenirányító

Mivel az  $U_{be}$  pontra kapcsolt váltakozófeszültség pozitív és negatív előjelű egyaránt lehet, ezért kettős táplálás szükséges. A műveleti erősítő invertáló és nem-invertáló bemenete között csak akkor lesz nulla a feszültségkülönbség, ha a bemeneti feszültség előjelváltozásai ellenére mindkét félperiódusban vagy  $D_1$  és  $D_3$ , vagy pedig  $D_2$  és  $D_4$  diódák nyitva vannak. Abból adódóan, hogy két diódának mindig nyitva kell lennie, a műveleti erősítő kimenetén ( $U_m$ ) mindig  $\pm 2U_{nyitó}$  feszültségnek kell lennie ( $U_{be}$  előjelétől függően).

Az erősítés a (nem-invertáló) alapkapsolás révén  $R_t$  és  $R_1$  arányával számítható, amennyiben  $R_t$  értéke jóval nagyobb, mint a vele sorba kapcsolt két dióda dinamikus ellenállása.

### Méréshez szükséges adatok:

IC: RC4558 ( $U_t = \pm 10V$ )

$D_1$ -  $D_4$  1N4007 normál Si diódák

$R_1 = 1k\Omega$

$R_t = 10k\Omega$

\*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

### Mérési feladatok:

1. Vizsgáljuk meg a kapcsolás kimeneti jelalakjait több (pl.: 50Hz, 1kHz, 10kHz) és amplitúdó mellett. Rögzítsük a be- és kimeneti ( $U_{be}$ ,  $U_m$ ,  $U_{ki}$ ) jelalakokat fázishelyesen!  $U_{ki}$  kimeneti jelet az oszcilloszkóp különbségképző funkciójával lehet megjeleníteni (analógnál ADD és CH2 INV, digitálisan MATH menü).

2. A jelszintekből igazoljuk a számítható értékeket!

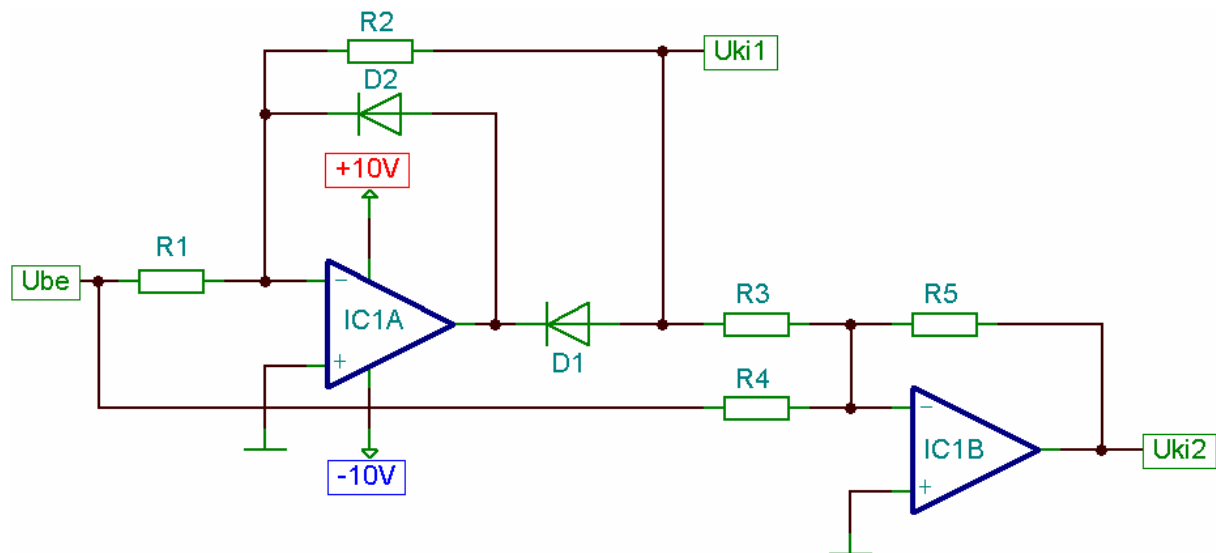
### 2.3 Aszimmetrikus kimenetű teljes hullámú precíziós egyenirányító

Teljes hullámú egyenirányításra szolgál a **6. ábrán** bemutatásra kerülő kapcsolás, ahol egy egyutas egyenirányító kimenetére egy súlyozott összegzőt kötünk, ezáltal a kimeneti feszültség lüktető egyenfeszültség lesz.

Fontos, hogy a súlyozott összegző  $R_3$  ellenállása pontosan a fele legyen  $R_4$ -nek, vagyis  $U_{ki1}$  feszültség kétszeresen legyen erősítve az összegző által, szemben  $U_{be}$ -vel, különben a kimeneti lüktető egyenfeszültség félhullámai kioltásra kerülnének.

Az ellenállások értékéből kifolyólag itt is adott a lehetőség a bementi feszültség erősítésére; a mérési elrendezés értékeit követve azonban  $U_{ki2p}=U_{bep}$  kell, hogy legyen, ami egyúttal azt is jelenti, hogy amennyiben a kimeneti lüktető egyenfeszültséget DC voltmérőre vezetjük, úgy  $U_{ki2DC}=U_{be-eff}$ .

Amennyiben a kapcsolás kimenetére integráló tagot (pl. RC) teszünk, úgy az aluláteresztő szűrő utáni kimeneti, immáron lüktetésmentes egyenfeszültség értéke  $U_{ki}=U_{bep}$  lesz (megfelelő integrálási idő megválasztása mellett).



6. ábra: Teljes hullámú precíziós egyenirányító

#### **Méréshez szükséges adatok:**

IC: RC4558 ( $U_i = \pm 10V$ )

$D_1$  és  $D_2$  1N4007 normál Si diódák

$R_1=R_2=R_3=10k\Omega$

$R_4=R_5=20k\Omega$

\*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

#### **Mérési feladatok:**

1. Vizsgáljuk meg a kapcsolás kimeneti jelalakjait több (pl.: 50Hz, 1kHz, 10kHz) és amplitúdó mellett. Rögzítsük a be- és kimeneti ( $U_{be}$ ,  $U_{ki1}$ ,  $U_{ki2}$ ) jelalakokat fázis-helyesen!

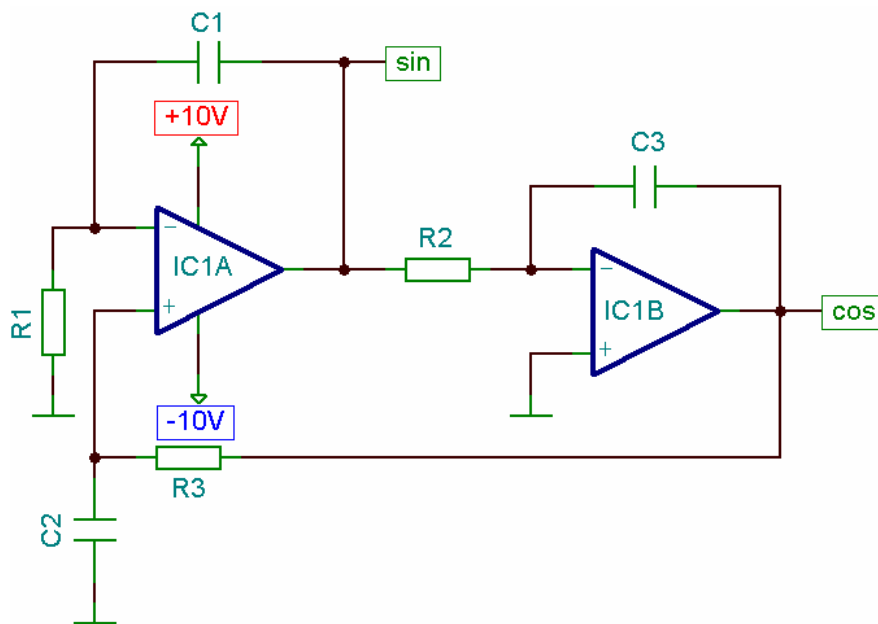
2. Méréssel igazoljuk, hogy  $U_{ki2DC}=U_{be-eff}$ !

3. Vegyük fel a kapcsolás transzfer karakterisztikát XY módban is (alacsony működési frekvencián)!

## 2.4 mérés: Kvadrátúra-oszcillátor

A kvadrátúra oszcillátor rádióátvitelben használt áramkör (QAM), melynek segítségével azonos frekvenciatartományban egyszerűen két hullám közvetíthető.

Mindkét kimenet szinuszos jelalakot szolgáltat, de a kettő között  $90^\circ$ -os fázistolás lép fel, tehát az egyik jel szinusz, míg a másik koszinusz. Az alapáramkör esetében nem triviális az erősítés szabályozás. Túl nagy erősítés esetén a kimeneti jelalakok torzulnak, ilyenkor a koszos kimenetre zener-diódákat illesztnek, így módon a visszacsatolt jel amplitúdója is lecsökken; túl kicsi hurokerősítés esetén pedig nem indul be a rezgés, ilyenkor  $R_1$  értékét kell megfelelően csökkenteni.



7. ábra: Kvadrátúra-oszcillátor műveleti erősítővel

A mérés során a kimeneti jelalak könnyedén lehet torz vagy instabil, igazán tiszta szinuszos kimeneti jel eléréséhez aktív amplitúdó szabályozó egységre lenne szükség; ennek ellenére a fázisviszonyok így is igazolhatók.

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$R = R_2 = R_3$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3$$

### Méréshez szükséges adatok:

IC: RC4558 ( $U_i = \pm 10V$ )

$R_1 = 10k\Omega$  potenciométer

$R_2 = R_3 = 10k\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 15nF$

\*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

### Mérési feladatok:

1. A megépítést követően a potenciométerrel állítsunk be minél alakhűbb szinuszjelet!

2. Mérjük meg az oszcillátor rezgési frekvenciáját, majd számítással igazoljuk annak helyességét!

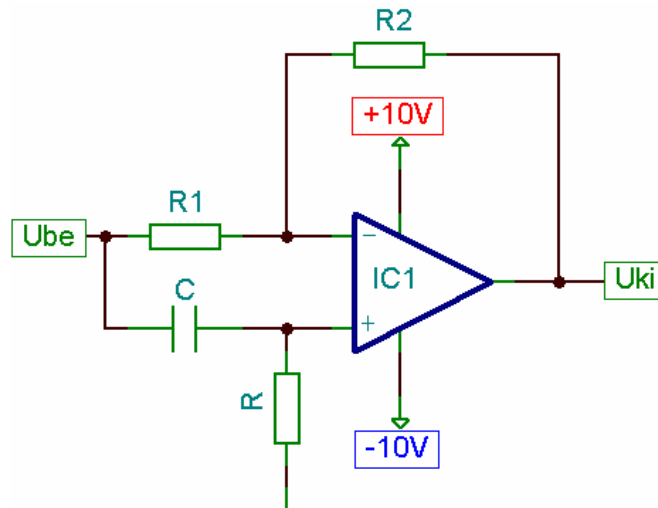
3. Ábrázoljuk a kimeneti jelalakokat fázishelyesen!

## 2.5 Mindent-áteresztő szűrő

Az angol szakirodalmak főleg *all-pass filter* néven hivatkoznak rá. A **8. ábrán** látható elrendezésben az áramkör  $f_0$  frekvencián  $90^\circ$ -os fázistolású, ettől kisebb frekvenciákon a fázistolás növekszik, egészen DC-ig, ahol  $\varphi=180^\circ$ , nagyobb frekvenciákon pedig csökken a fázistolás egészen  $0^\circ$ -ig. Az R és C tagok felcserélése esetén az előbb ismertetett jelenség is a fordítottja lesz. Az átviteli függvény abszolút értéke minden frekvencián egységnyi, innen az elnevezés.

A kapcsolás az egyes frekvenciákat különböző mértékben késlelteti. Így alkalmazható pl. más szűrők fáziskarakterisztikájának javítására, speciális audio effektusok elérésére, tranziensek csökkentésére (a hirtelen felfutó tranziens a frekvenciatartományban szélessávú jelnek felel meg, ezeket a frekvenciákat különbözően késleltetve az eredeti tranziens a kimeneten laposabb és szélesebb lesz, csökkentve a jel dinamikatartományát).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$



8. ábra: Mindent-áteresztő szűrő

A működés az alábbi:

A **8. ábra** szerinti elrendezés alapján DC bemeneti jel esetén a C kondenzátor szakadás, tehát a nem invertáló bemenet R ellenálláson keresztül földpotenciálra kerül (nulla bemeneti áramot feltételezve a műveleti erősítő bemenetein). Ebben az esetben a kapcsolás egy közönséges invertáló erősítővé módosul, tehát a fázistolás  $180^\circ$ . Növekvő frekvencia hatására a fázistolás csökkenni kezd,  $f_0$  frekvencián  $90^\circ$ -ra, afelett pedig  $0^\circ$  felé csökken tovább (ahogy C kondenzátor átmegy rövidzárba), vagyis egységnyi erősítésű követőként viselkedik. A fázistolás ebben az esetben az alábbi képlet szerint alakul:

$$\varphi_{(\omega)} = 180^\circ - 2\arctg(\omega RC)$$

*A mindent-áteresztő szűrő frekvenciafüggése  
felüláteresztő szűrő (differenciátor) alkalmazásával*



Amennyiben R és C tagokat felcseréljük, vagyis a műveleti erősítő nem invertáló bemenetére ezúttal aluláteresztő szűrőt teszünk, úgy a fázistolás frekvenciafüggése is ellentettjére változik amellet, hogy  $f_0$ , azaz a  $90^\circ$  fázistoláshoz tartozó frekvencia változatlan marad. Ilyenkor a fázistolás az alábbi képlet szerint alakul:

$$\varphi_{(\omega)} = -2 \arctg(\omega RC)$$

*A mindent-áteresztő szűrő frekvenciafüggése  
aluláteresztő szűrő (integrátor) alkalmazásával*

Megjegyzés: néhány irodalomban a fentebbi képleteket az alábbi különbséggel írják fel:

$$\omega RC = \frac{f}{f_0}$$

**Méréshez szükséges adatok:**

IC: RC4558 ( $U_t = \pm 10V$ )

$R_1 = R_2 = R = 10k\Omega$

$C = 15nF$

**Mérési feladatok:**

1. Képlet alapján határozzuk meg a várható  $f_0$  frekvenciát, majd méréssel igazoljuk!

2. Vegyük fel a szűrő  $f_{be} - \varphi_{ki}$  karakterisztikáját 0-20kHz-ig minél több lépésben (Bode-diagram fázismenete); A lépésközt úgy állapítsuk meg, hogy minél több információt szolgáltatson a fázistolás jelenségéről!  $U_{be}$  értéke legyen 1-2Vpp nagyságrendű.

3. Mérjük meg az erősítő kimeneti feszültségértékeit 0-20kHz-es tartományban (Bode-diagram amplitúdómenete)!

4. Cseréljük fel R és C tagokat, majd ismételjük meg a 2. mérési pontot!

5. Mindkét esetben egyikét pontban számításal is igazoljuk a fázistolást!

### **Ellenőrző kérdések:**

1. Ismertesse a precíziós egyenirányítók általános rendeltetését, felhasználási területüket, működésük alapelvét!
2. Rajzoljon fel egy precíziós félhullámú egyenirányítót!
3. Mitől és hogyan függ a diódák nyitófeszültsége prec. egyenirányítóknál?
4. Mik okozzák a precíziós egyenirányítók frekvenciafüggését?
5. Hogyan lehet növelni a precíziós egyenirányítók működési frekvenciáját?
6. Rajzolja fel a precíziós félhullámú egyenirányító transzfer karakterisztikáját! Adja meg az erősítés képletét! Milyen feltétel mellett igaz ezen képlet?
7. Ismertesse a kétutas precíziós egyenirányító működését (kapcsolási rajzzal)!
8. Ismertesse a teljes hullámú precíziós egyenirányító működését (kapcsolási rajzzal)!
9. Rajzolja le a kvadratúra oszcillátor alapkötését (+rezonanciaképlet)!
10. Rajzolja fel a kvadratúra oszcillátor kimeneteinek időfüggvényeit!
11. Rajzolja fel a mindent-áteresztő szűrő kötését, adja meg a két esetre vonatkoztatott fázistolási formulákat!
12. Ismertesse a mindent-áteresztő szűrő működését (egyik eset elegendő)!