

23. ISMERKEDÉS A MŰVELETI ERŐSÍTŐKKEL

Célkitűzés:

- A műveleti erősítők legfontosabb tulajdonságainak megismerése.

I. Elméleti áttekintés

A műveleti erősítők (továbbiakban: *ME*) nagy feszültségerősítésű tranzisztorokból felépülő különbségerősítők. Az *ME*-k jele az 1. ábrán látható.

Az áramkör két bemenettel rendelkezik. A + jelű bemenet neve egyenes bemenet, ennek feszültségét U_e -vel jelöljük. A - jelű bemenetet fordító bemenetnek nevezzük és a rákapcsolt feszültség jele U_f .

ME-t tartalmazó áramköröknél az összes feszültséget (U_{be} , U_{ki} stb.) egy közös („0 V”) vezetékhez viszonyítva adják meg. Ez a vezeték a potenciál viszonyításának nullpontja, melyet gyakran „föld”-nek is neveznek. Kapcsolási rajzokon a közös vezetékét mindig feltüntetik.

A szokásos alkalmazásoknál az erősítőt két tápfeszültséggel táplálják. A közös („0 V”) vezetékhez viszonyítva van egy pozitív és egy negatív tápfeszültség, melyek értéke tipikusan ± 15 V (1. a 2. ábrán). Elvi kapcsolási rajzoknál a tápfeszültségeket nem szokás feltüntetni.

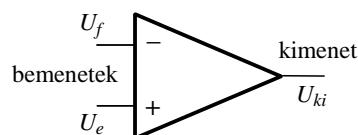
A műveleti erősítő alapegyenlete a következő:

$$U_{ki} = A_u (U_e - U_f), \quad (1)$$

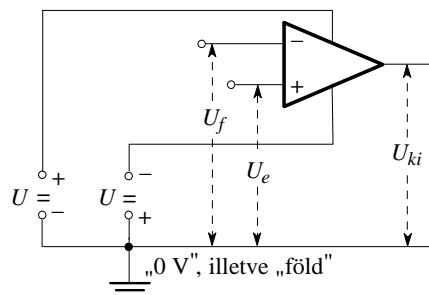
ahol A_u az erősítő nyílthurkú feszültség erősítése. Ennek értéke tipikusan 10^4 - 10^6 , az ideális *ME* nyílthurkú erősítése végtelen lenne. Majd látni fogjuk, hogy minél nagyobb A_u értéke, annál jobb erősítők készíthetők vele. A bemeneteken befolyó áram értéke ideális *ME*-nél nulla lenne, de a reális *ME*-nél is olyan kicsi, hogy a legtöbb kapcsolás vizsgálatánál elhanyagolható.

1. Alapkapcsolások

Az erősítőnek kétféle alapkapcsolása van, amit a 3.a és c ábrán mutatunk be. A 3.a ábrán látható kapcsolásnál a fordító bemenet feszültsége:



1. ábra

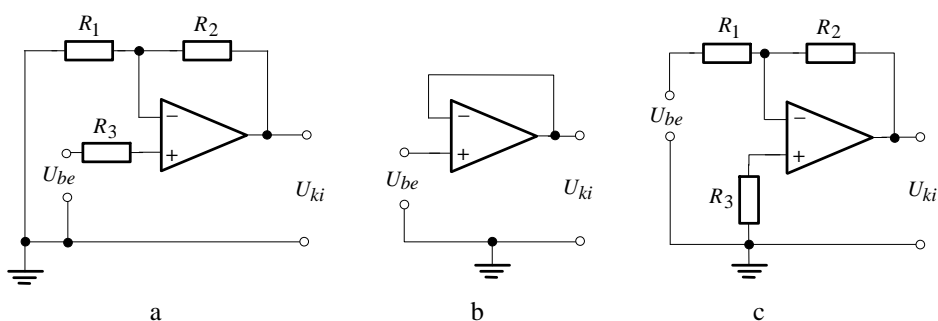


2. ábra

$$U_f = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{ki} = \beta U_{ki}, \quad (2)$$

ahol β az ún. negatív visszacsatolási együttható, amely azt fejezi ki, hogy a kimenő feszültség hányad része jut vissza a fordító bemenetre. [A (2) egyenlet felírásakor feltettük, hogy az erősítő bemenetén befolyó áram elhanyagolható.] Mivel $U_{be} = U_e$, ezért (1)-ből és (2)-ből a visszacsatolt egyenes („nem invertáló”) erősítő erősítése:

$$A_e = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_u \beta}}. \quad (3)$$



3. ábra

Látható, hogy a $A_u \beta \gg 1$ esetén a visszacsatolt erősítő erősítését gyakorlatilag az R_1 és R_2 ellenállások határozzák meg. Az $1/A_u \beta$ mennyiséget általában elhanyagoljuk, így:

$$A_e = \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \quad (4)$$

A 3.b ábrán az egyenes erősítő speciális esete látható. Ennél $U_f = U_{ki}$, ezért (1)-ből

$$U_{ki} = U_{be} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_u}} = U_{be}. \quad (5)$$

Ez az ún. követő erősítő: a kimenet feszültsége követi a bemenet feszültségét. Bebizonyítható, hogy ennek a kapcsolásnak igen nagy a bemenő ellenállása, ezért pl. feszültségmérő műszerekben jól alkalmazható.

A 3.c ábrán látható, ún. fordító („invertáló”) erősítő kapcsolásnál az előzőhöz hasonló egyszerű gondolatmenettel az

$$A_f = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_u \beta}} \quad (6)$$

összefüggést kapjuk. A fordító erősítő a bemenő jel előjelét megfordítja: pozitív bemenő feszültség hatására negatív kimenő feszültség lép fel. Gyakorlati számításokhoz elegendően pontos az

$$A_f = -\frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

összefüggés.

(Megjegyezzük: fordító és egyenes erősítőnél az R_3 ellenállást úgy célszerű megválasztani, hogy értéke megegyezzen az R_1 és R_2 párhuzamos eredőjével. Ezzel a bemenetekbe folyó kicsi áram okozta hiba még tovább csökkenthető.)

Az (1) egyenletet átrendezve

$$U_e - U_f = \frac{U_{ki}}{A_u}. \quad (8)$$

Mivel A_u igen nagy érték, ezért az egyenlet baloldalán álló feszültségek különbsége elhanyagolható az áramkörben mérhető más feszültségekhez (U_{be} , U_{ki} stb.) viszonyítva. A két bemenet feszültsége gyakorlatilag megegyezik. Fordító erősítőnél $U_e = 0$, ezért U_f igen jó közelítéssel szintén zérusnak tekinthető. Ezt úgy szokták kifejezni, hogy a fordító bemenet virtuális földpont. A bemeneteken befolyó áramok elhanyagolása és ezeknek az észrevételeknek a felhasználása a ME -ket tartalmazó áramkörök áttekintését jelentősen megkönnyíti.

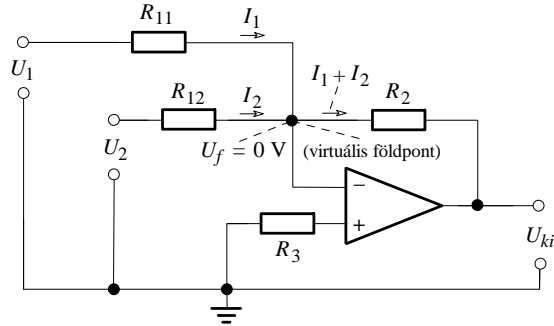
2. Alkalmazások

A műveleti erősítők számos érdekes kapcsolás megvalósítását teszik lehetővé. Példaként csak négy kapcsolást mutatunk be. A 4. ábrán egy feszültség összegző kapcsolás látható. Mivel $U_f = 0$ (virtuális földpont), ezért $I_1 = U_1/R_{11}$ és $I_2 = U_2/R_{12}$, így, ha $R_{11} = R_{12} = R_1$, akkor R_2 -n $I_1 + I_2$ áram folyik, azaz a kimenő feszültség:

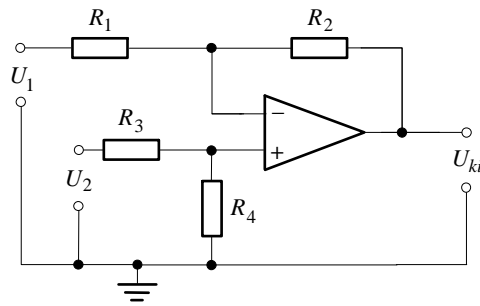
$$U_{ki} = -(I_1 + I_2)R_2 = -(U_1 + U_2) \frac{R_2}{R_1}. \quad (9)$$

Az 5. ábrán látható kapcsolásnál könnyű belátni, hogy az egyenes bemenet feszültsége az $\alpha = R_4/(R_3 + R_4)$ jelöléssel αU_2 . A fordító bemenet feszültsége ezzel gyakorlatilag megegyezik, ezért az R_1 ellenálláson átfolyó I_1 áram értéke:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_f}{R_1} = \frac{U_1 - \alpha U_2}{R_1}. \quad (10)$$



4. ábra



5. ábra

Ezzel a kimenő feszültség könnyen kiszámítható:

$$U_{ki} = U_f - I_1 R_2 = \alpha U_2 - \frac{R_2}{R_1} (U_1 - \alpha U_2) = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1, \quad (11)$$

amiből $R_1 = R_3$ és $R_2 = R_4$ esetén az

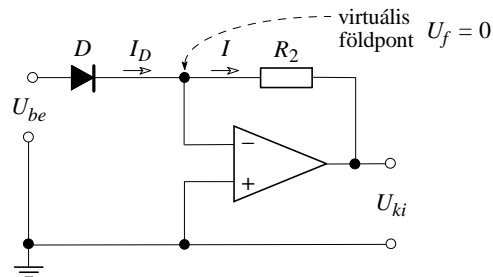
$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (12)$$

összefüggést kapjuk. Tehát ez a kapcsolás a bemenő feszültségek különbségével arányos jelet állít elő, ezért különbség képző (vagy kivonó) kapcsolásnak nevezzük.

Ismeretes, hogy egy diódán átfolyó áram és a diódán eső feszültség között

$$I_D = I_0 \left(\exp \frac{U_D}{U_T} - 1 \right) \quad (13)$$

összefüggés áll fenn, ahol I_0 a dióda telítési árama, U_T pedig kT/e . Az 6. ábrán látható kapcsolásnál $U_{be} = U_D$ és $U_{ki} = -I_D R_2$.



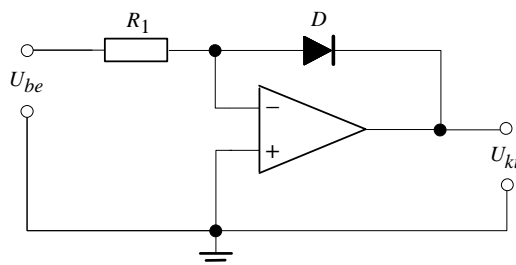
6. ábra

Ha $U_D \gg U_T$, akkor $I_D = I_0 e^{\frac{U_D}{kT}}$, így:

$$U_{ki} = -I_D R_2 = -I_0 R_2 \exp \frac{U_{be}}{U_T}, \quad (14)$$

tehát az erősítő kimenő feszültsége exponenciálisan függ a bemenő feszültségtől. A 7. ábrán látható kapcsolásnál hasonló gondolatmenet alapján:

$$U_{ki} = -U_T \ln \frac{U_{be}}{I_0 R_1} \quad (U_{be} > 0). \quad (15)$$



7. ábra

Összegzés, logaritmálás és exponenciális képzés alapján pedig tetszés szerinti hatvány, szorzat és hányados is képezhető.

3. Reális műveleti erősítők

A létező műveleti erősítők nem ideálisak. A_u nyílthurkú erősítésük véges és a hőmérséklet, továbbá a tápfeszültség függvénye. A megengedhető maximális teljesítményük 300 - 700 mW közé esik, míg a kimeneten folyó áram maximális értéke 10 - 20 mA. A bipoláris

(hagyományos) tranzistorokból felépülő *ME* bemenetén 10 - 100 nA nagyságrendű bemenő áram folyik, és az (1) egyenlet helyett az

$$U_{ki} = A_u(U_e - U_f + U_{offs}) \quad (16)$$

összefüggés írja le az erősítést. U_{offs} az ún. offset feszültség, ami a gyártási hibák következménye. Előjele példányonként változó, értéke általában nem haladja meg az 5 mV-ot. A műveleti erősítők maximális kimenő feszültsége megközelíti a tápfeszültséget, de annál általában 2 - 3 V-tal kisebb.

II. A mérés menete

A műveleti erősítő egy kapcsolótáblán található. A kapcsolások összeállítása előtt győződjön meg arról, hogy a tápegység ki van-e kapcsolva, majd a mérőtábla $+U_i$, $-U_i$ és föld jelzésű pontjait kösse össze a tápfeszültséggel. Az egyes kapcsolások összeállításához szükséges alkatrészek szabványos „banándugós” csatlakozókkal kapcsolhatók a mérőtáblához.

1. Az egyenes és a fordító erősítők $U_{ki}(U_{be})$ függvényének, az ún. transzfer (átviteli) karakterisztikának a vizsgálatánál legalább 15 ponton mérjen!
2. Az összegző erősítőnél két vagy több bemenő feszültség van. A bemeneti feszültségeket úgy válassza meg, hogy a mérési pontok a változók síkján lehetőleg egyenletesen helyezkedjenek el. Az eredmények grafikus szemléltetésénél U_{ki} -t ábrázolja $U_{be,1} + U_{be,2}$ függvényében.
3. Logaritmikus és exponenciális erősítő mérésénél a bemenő feszültség értékét úgy célszerű változtatni, hogy a kimeneti feszültség értéke közelítőleg egyenletesen változzon. Az eredményeket $U_{ki} - \ln(U_{be})$, illetve $U_{ki} - \exp(U_{be})$ diagramon érdemes szemléltetni.
4. Az offset feszültséget és a bemeneti áramokat a 8. ábrán látható kapcsolások segítségével mérje. Az 8.a ábrán szereplő kapcsolásnál a kimenő feszültség az offset feszültség miatt nem nulla, hanem éppen U_{offs} . A 8.b ábrán látható kapcsolás kimenő feszültsége $U_{offs} + I_{be,f}R_2$, míg a 8.c ábránál $U_{offs} - I_{be,e}R_3$. Ez a három adat jellemző az erősítőre. A két bemenő áram különbsége az offset áram. A (16) egyenlet segítségével könnyű belátni, hogy a 8. ábrán szereplő kapcsolásoknál

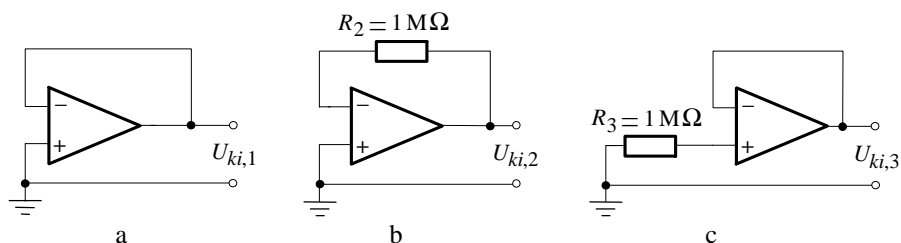
$$U_{ki,1} = U_{offs}, \quad (17)$$

és

$$I_f = \frac{U_{ki,2} - U_{offs}}{R_2}, \quad (18)$$

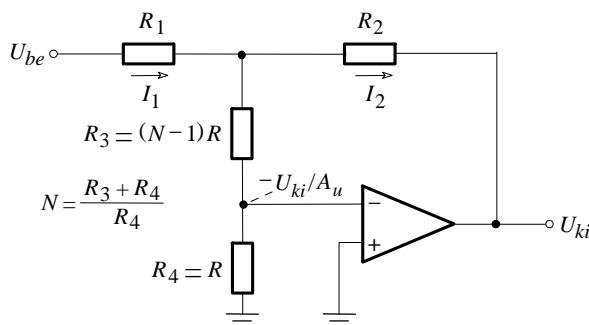
továbbá

$$I_e = \frac{U_{\text{offs}} - U_{ki,3}}{R_3} \quad (19)$$



8. ábra

5. A nyílthúrkú erősítés mérése nem egyszerű feladat az erősítés igen nagy értéke, stabilitása és az offszetfeszültség jelenléte miatt. A műveleti erősítő működését leíró (1) összefüggés [$U_{ki} = A_u(U_e - U_f)$] alapján az A_u nyílthúrkú erősítés elvileg egyszerűen mérhető lenne $U_e - U_f$ beállításával, majd U_{ki} mérésével. Mivel azonban U_{ki} nem haladhatja meg a tápfeszültség tipikusan 15 V értékét, A_u pedig 10^5 nagyságrendű, így $U_e - U_f$ lényegesen 1 mV alatt marad, és az erősítő is igen instabilan működik a visszacsatolás hiányában.



9. ábra

A nyílthúrkú erősítés méréséhez a 9. ábrán látható kapcsolást használjuk. Ezt egy egyszerű invertáló erősítő kapcsolás módosításával kaptuk oly módon, hogy a fordító bemenetre jutó feszültséget egy ellenállásosztóval nagymértékben lecsökkentettük. Mivel a műveleti erősítőt leíró összefüggés szerint az invertáló bemeneten $-U_{ki}/A_u$ feszültség jelenik meg (az egyenes bemeneten ugyanis 0 V van), így $N \cdot R \gg R_1$ és $N \cdot R \gg R_2$ esetén az R_1 és R_2 ellenállások csatlakozási pontján az $(N - 1) \cdot R$ és R ellenállásosztó jelenléte miatt $N \cdot U_{ki}/A_u$ mérhető, ami olyan hatású, mintha az A_u nyílthúrkú erősítést N -ed részére csökkentettük volna egy normál erősítőkapcsolásnál. U_{be} és U_{ki} összefüggésének kiszámolása után adódik, hogy a nyílthúrkú erősítés az alábbi képlettel adható meg:

$$A_u = \frac{N(R_1 + R_2)}{R_2 \left(\frac{U_{be}}{U_{ki}} \right) - R_1}. \quad (20)$$

Időben állandó, DC jelekkel mindenképpen nehéz az A_u nyílthúrkú erősítés mérése az offszetfeszültség és az offszetáram jelenléte miatt, mivel az ezek által okozott hiba sajnos N -szerezésre növekszik a fenti kapcsolásnál. Ezeknek a paramétereknek a hatása csökkenthető, ha a méréshez AC jeleket használunk, vagy a mérést több bemenő egyenfeszültség mellett végezzük el. AC jelek esetén a (20) összefüggésben U_{ki} és U_{be} helyére a periodikus jelek amplitúdóit helyettesítjük be, míg a másik esetben az erősítést az $U_{ki}(U_{be})$ karakterisztikából határozhatjuk meg úgy, hogy a görbe meredekségének értékét írjuk U_{ki}/U_{be} helyére a (20) összefüggésben.

Feladatok:

1. Készítsen

- 11-szeres erősítésű erősítőt (l. 3.a ábra), legyen $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, R_2 értékét számítsa ki;
- 5,6-szoros erősítésű (fordító) erősítőt (l. 3.b ábra), legyen $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, R_2 értékét határozza meg!

Legalább 15 mérési pont felhasználásával ábrázolja az $U_{ki}(U_{be})$ függvényt! U_{be} értéke legyen a $-2 \text{ V} < U_{be} < +2 \text{ V}$ tartományban. Határozza meg azt a tartományt, amelyben a kapcsolás erősítőként használható. Ebben a tartományban határozza meg az erősítést!

- Készítsen 1-szeres erősítésű összegző (l. 4. ábra), illetve (-1)-szeres erősítésű differenciál erősítőt (l. 5. ábra) és mérje meg az $U_{ki}(U_{be,1}, U_{be,2})$ függvényt! Legyen $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, a többi ellenállás értékét számítsa ki! Mindkét esetben legalább 25 mérést végezzen! U_{ki} értékét $U_{be,1} + U_{be,2}$, illetve $U_{be,1} - U_{be,2}$ függvényében ábrázolja!
- Készítsen exponenciális és logaritmikus erősítőt (l. 6., illetve 7. ábra), és vegye fel a karakterisztikáját! Ábrázolja a mért értékeket és a linearizált karakterisztikákat is!
- Határozza meg az erősítőt jellemző bemenőáramokat és az offset feszültséget.
- Állítsa össze a ME erősítésének méréséhez szükséges kapcsolást, és határozza meg az erősítő nyílthúrkú erősítését! Legalább $10U_{be}$ értéknél végezzen mérést!

Kérdések:

- Mi határozza meg a ME-vel felépített áramkörök pontosságát?
- Mikor igaz és miért az, hogy a ME két bemenete között a feszültségkülönbség elhanyagolhatóan kicsi?

3. Mit nevezünk „virtuális föld”-nek?
4. Hogyan lehetne szorzó kapcsolást csinálni *ME*-vel?
5. Lehet-e osztó kapcsolást csinálni *ME*-vel?

Ajánlott irodalom:

1. Török M.: Elektronika, JATEPress, Szeged, 2000.
2. Herpy M.: Analóg integrált áramkörök, Műszaki Kiadó, Budapest, 1973.