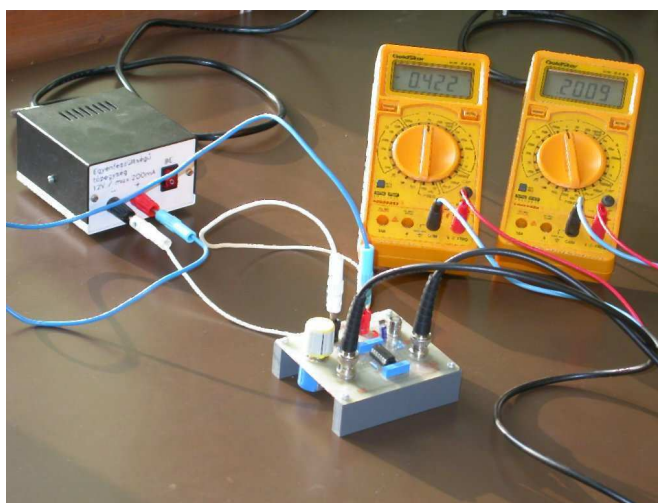


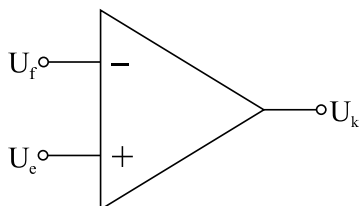
## 13. fejezet

# A műveleti erősítők



Logaritmusos erősítő tanulmányozása

A műveleti erősítő olyan elektronikus áramkör, amely a két bemenete közötti potenciálkülönbséget igen nagy mértékben fölerősíti. A műveleti erősítő az analóg elektronika legfontosabb, univerzális alap-eleme, amely szinte minden elektronikai feladat – összeadás, integrálás, differenciálás, szűrés, oszcillátor, áramgenerátor – megvalósításában fontos szerepet játszik.



13.1. ábra. A műveleti erősítő rajzjele

A műveleti erősítő rajzjele a 13.1. ábrán látható. A „+”-szal jelölt bemenet neve *egyenes* (más néven *neminvertáló*) *bemenet*, míg a „-” jelzésű bemenetet *fordító* (más néven *invertáló*) *bemenetnek* nevezzük.

A műveleti erősítők tranzisztorokból, diódákból, ellenállásokból és kondenzátorokból épülnek föl, azonban fölépítésüket a velük dolgozó tervezőnek általában nem szükséges ismernie. A műveleti erősítős

kapcsolások tervezése gyakorlatilag az alábbi alapszabályokból megérthető:

1. Az ideális műveleti erősítő  $U_{ki}$  kimeneti feszültsége a következő képlettel adható meg:

$$U_{ki} = A_u \cdot (U_e - U_f), \quad (13.1)$$

ahol  $U_e$  az egyenes,  $U_f$  a fordító bemeneten mérhető feszültség,  $A_u$  pedig az erősítő úgynevezett *nyílthurkú erősítését* jelöli. Ideális műveleti erősítőre a nyílthurkú erősítés értéke végtelen, ám a valóságos műveleti erősítőknél is igen nagy érték ( $10^4$ – $10^6$ ).

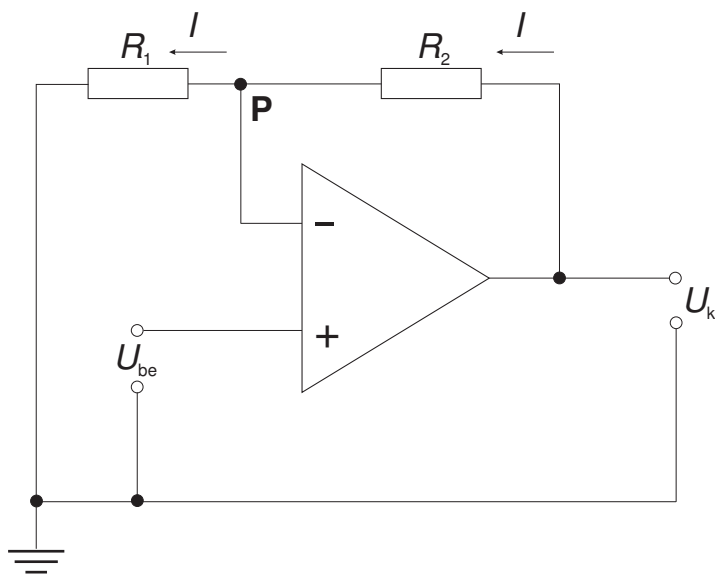
2. Az ideális műveleti erősítő bemenetein nem folyik áram. A valóságos műveleti erősítőknél a bemeneten folyó áramok értéke tipikusan nA nagyságrendű, a kis bemenő áramú erősítők esetében néhány pA.

### 13.1. A visszacsatolás

A *visszacsatolás* általános esetben az, amikor egy a szabályozó egység kimenő jelével arányos jelet visszavezetünk a szabályozó egység bemenetére. Ha a rendszer olyan, hogy a kimeneti jel növekedése tovább növeli a kimeneti jelet, akkor *pozitív*, ha pedig olyan, hogy a kimeneti jel növekedése csökkenti a kimenő jelet, akkor *negatív visszacsatolásról* beszélünk. A pozitív visszacsatolás öngerjesztő folyamatokat indukál, míg a negatív visszacsatolás rendszerek stabilizálására használatos.

A műveleti erősítő esetében visszacsatolás akkor valósul meg, amikor az erősítő kimenetét közvetlenül vagy valamilyen áramköri elemen keresztül visszakötjük valamelyik bemenetre. Ha ez a bemenet az egyenes bemenet, akkor a visszacsatolás pozitív, ha pedig a fordító, a visszacsatolás negatív. Ezt a (13.1) egyenletről könnyen láthatjuk, ha az egyenes, illetve a fordító bemenet feszültségének a helyére egy a kimenő feszültséggel arányos mennyiséget helyettesítünk.

### 13.2. Az egyenes erősítő



13.2. ábra. Az egyenes erősítő

A 13.2. ábrán látható kapcsolást *egyenes* vagy más néven *lineáris neminvertáló erősítőnek* nevezzük. A működése a bevezetőben ismertetett szabályokból könnyen megérthető: mivel az ideális műveleti erősítő bemenő áramai nullák, azaz a **P** jelzésű csomópontnál nem folyik el áram a fordító bemenet irányába, az  $R_1$  és  $R_2$  ellenálláson ugyanaz az  $I$  áram folyik. Az  $R_1$  és  $R_2$  ellenállásokból alkotott lánc egyik kivezetése földpotenciálón, azaz 0V-on van, a másik kivezetés pedig a kimenetre van kötve, így az áramot a következőképpen számolhatjuk:

$$I = \frac{U_{ki}}{R_1 + R_2}. \quad (13.2)$$

Ennek fölhasználásával a fordító bemenet feszültsége:

$$U_f = I \cdot R_1 = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (13.3)$$

Mivel ennél a kapcsolásnál az egyenes bemenet feszültségét tekintjük bemenő feszültségnek ( $U_{be} = U_e$ ), a (13.1) egyenlet az előző eredményeket behelyettesítve a következő alakot ölti:

$$U_{ki} = A_u \cdot \left( U_{be} - U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (13.4)$$

Ezt átrendezve:

$$U_{be} = U_{ki} \cdot \left( \frac{1}{A_u} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \quad (13.5)$$

Az egyenes erősítő visszacsatolt erősítését a következőképp definiáljuk:  $A := U_{ki}/U_{be}$ .  $U_{be}$  fenti kifejezését behelyettesítve a következőt kapjuk:

$$A = \left( \frac{1}{A_u} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^{-1}. \quad (13.6)$$

Ha tekintetbe vesszük, hogy az ideális műveleti erősítő nyílthurkú erősítése végtelen,  $1/A_u \approx 0$  adódik. Ezt kihasználva az egyenes erősítő visszacsatolt erősítése:

$$A = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^{-1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \quad (13.7)$$

Vegyük észre, hogy az erősítést kizárólag a visszacsatoló ellenállások határozzák meg.

### 13.3. A logaritmikus erősítő

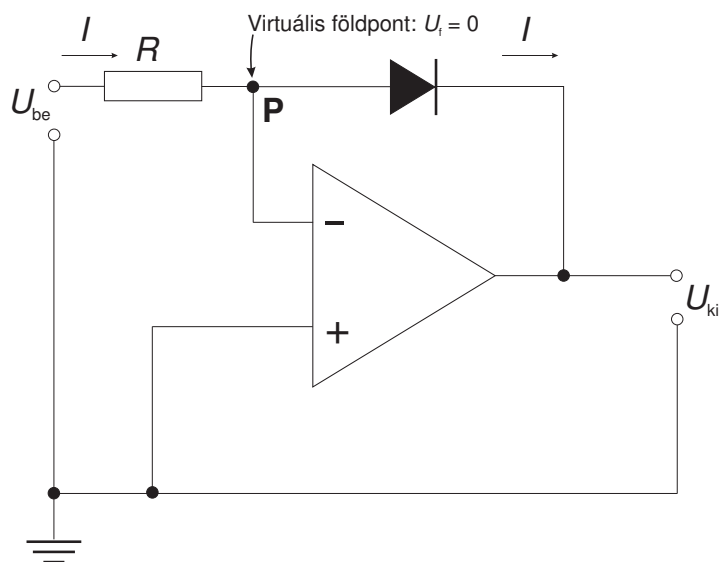
A 13.3. ábrán az úgynevezett *logaritmikus erősítő* rajza látható. Ahhoz, hogy a logaritmikus erősítő működését megérthessük, először be kell látnunk, hogy olyan kapcsolások esetén, ahol az egyenes bemenet feszültsége 0, és negatív visszacsatolást valósítunk meg, a fordító bemenet feszültsége is 0. A (13.1) egyenletet átrendezve, és tekintetbe véve, hogy az ideális műveleti erősítő nyílthurkú erősítése végtelen, a következőt kapjuk:

$$U_e - U_f = \frac{U_{ki}}{A_u} \approx 0, \quad (13.8)$$

azaz negatív visszacsatolásnál a két bemenet feszültsége közti különbség eltűnik, a fordító bemenet az egyenes bemenetre kötött feszültséget követi. Ha az egyenes bemenetet a földre kötjük, a (13.8) egyenlet szerint a fordító bemenet feszültsége is 0 lesz. Ezt úgy szokás megfogalmazni, hogy ilyenkor a fordító bemenet *virtuális földpont*.

Mivel a műveleti erősítő bemenő árama igen kicsiny, ezért a **P** jelzésű csomópontnál nem folyik el áram a fordító bemenet irányába, azaz az  $R$  ellenálláson és a diódán ugyanaz az  $I$  áram halad keresztül. Ismeretes, hogy egy diódán átfolyó  $I$  áram és a diódán eső  $U$  feszültség között a következő összefüggés áll fenn:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \quad (13.9)$$



13.3. ábra. A logaritmikusan erősítő

ahol  $I_0$  és  $U_T$  állandók. Szobahőmérsékleten  $U_T$  értéke kb. 26 mV, ami a legtöbb esetben jóval kisebb  $U$  értékénél, így az exponenciális kifejezés értéke nagy lesz, ami mellett az 1 elhanyagolható:

$$I \approx I_0 e^{\frac{U}{U_T}}. \quad (13.10)$$

Ebből a diódán eső feszültséget kifejezve:

$$U \approx U_T \ln \left( \frac{I}{I_0} \right). \quad (13.11)$$

Ha tekintetbe vesszük, hogy a fordító bemenet virtuális földpont:

$$I = \frac{U_{be}}{R}, \quad (13.12)$$

másrészt

$$U_{ki} = -U, \quad (13.13)$$

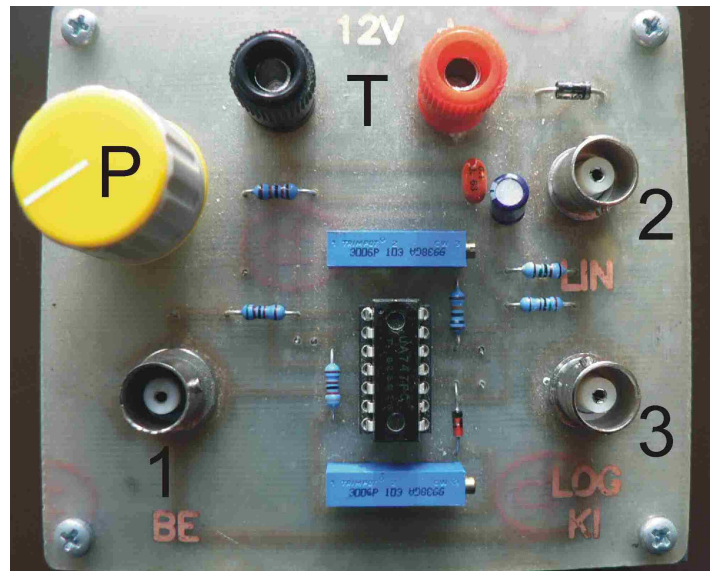
ahol  $U$  a diódán eső feszültséget jelöli. Ezt behelyettesítve a (13.11) egyenletbe, a következőt kapjuk:

$$U_{ki} = -U_T \ln \left( \frac{U_{be}}{I_0 R} \right), \quad (13.14)$$

ha  $U_{be} > 0$ . Ez azt jelenti, hogy a kimenő feszültség a bemeneti feszültség logaritmusával lesz arányos.

## 13.4. Feladatok

A gyakorlaton az egyenes erősítő és a logaritmikusan erősítő ugyanazon a panelen található (lásd 13.4. ábra). A két műveleti erősítő ugyanazt a tápfeszültséget használja (ezt az ábrán **T**-vel jelölt hüvelykére kell kötni, polaritáshelyesen) és ugyanazt a bemenő feszültségjelet erősíti. Ez a jel az ábrán **P**-vel jelölt potenciométerrel 0-tól kb. 200 mV-ig változtatható. A bemenő jel értékét egy digitális voltmérővel mérjük az **1** jelzésű csatlakozón. Ugyancsak digitális voltmérővel mérjük az erősítők kimeneti feszültségét: a **2** jelzésű csatlakozón az egyenes erősítőét, a **3** jelzésű csatlakozón a logaritmikusan erősítőét.



13.4. ábra. A műveleti erősítőket tartalmazó panel

1. Mérje meg az egyenes erősítő kimenő feszültségét a bemenő feszültség függvényében! A bemenő feszültséget 0-tól 200 mV-ig 10 mV-onként növelje! Ábrázolja az  $U_{ki}(U_{be})$  függvényt, és a kapott egyenes meredekségéből határozza meg az  $A$  visszacsatolt erősítést!
2. A logaritmikus erősítő vizsgálatához készítsen logaritmikus feszültségbeosztást, azaz számítsa ki azon feszültségértékeket, amelyek logaritmikus skálán egyenletesen helyezkednek el a megadott tartományon. Ez azt jelenti, hogy az egymást követő  $U_i$  feszültségekre

$$\ln(U_{i+1}) - \ln(U_i) = \text{állandó.}$$

A feszültségértékeket 3 mV és 160 mV között, 12 pontban számolja ki!

3. Mérje meg a logaritmikus erősítő kimeneti feszültségét a bemeneti feszültség előző feladatban kiszámolt értékeinél! Ne törekedjen mindenáron arra, hogy *pontosan ezeket* az értékeket állítsa be a potenciométerrel – hiszen ez majdhogynem lehetetlen feladat –, de a táblázatában ne az előre kiszámolt értékeket rögzítse, hanem azokat, amelyeket ténylegesen sikerült beállítani! Alkalmasan választott linearizálási eljárással ellenőrizze, hogy valóban logaritmikus-e az erősítő! Határozza meg  $U_T$  értékét!