

**BUDAPESTI MŰSZAKI FŐISKOLA
KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI FŐISKOLAI KAR
AUTOMATIKA INTÉZET**

Dr. Iváncsyné Csepesz Erzsébet

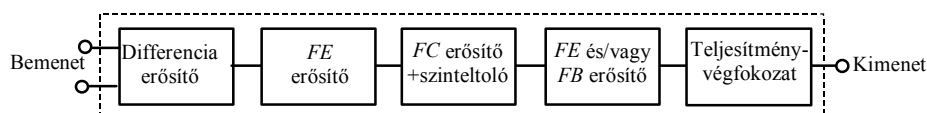
ELEKTRONIKA

Műveleti erősítők

BUDAPEST, 2002.

6. MŰVELETI ERŐSÍTŐK

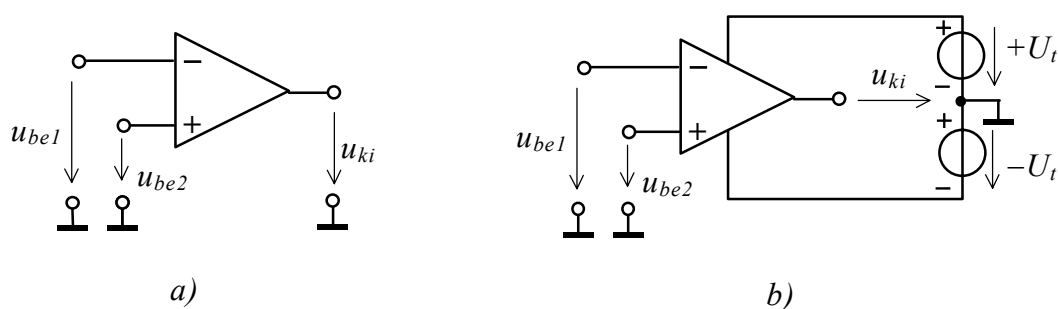
A műveleti erősítők integrált áramköri technikával készült szimmetrikus bemenetű és aszimmetrikus kimenetű egyenfeszültség-erősítők. A közel ideális paraméterek biztosítása érdekében a műveleti erősítő több áramköri egységből áll. A 6.1. ábrán a műveleti erősítő tömbvázlata látható.



6.1. ábra. Az általános felépítésű műveleti erősítő tömbvázlata.

Az integrált műveleti erősítő két földfüggetlen bemenettel és a földhöz képest egy kimenettel rendelkezik (6.2. ábra). A $(-)$ jelű az invertáló, a $(+)$ jelű a neminvertáló bemenete a műveleti erősítőnek. Az integrált műveleti erősítő általában két tápforrással működtethető.

A műveleti erősítő jelképi jelölése és a tápfeszültség kialakítása látható a 6.2. ábrán. A jelképi jelölésen gyakran nincsenek feltüntetve a tápforrások kivevései, amelyek természetesen minden esetben szükségesek.



6.2. ábra. A műveleti erősítő a) jelképi jelölése és b) tápfeszültség kialakítása.

A műveleti erősítő vezérelhető

- szimmetrikus bemeneti jellel,
- közös bemeneti jellel,
- aszimmetrikus vezérlőjellel.

A műveleti erősítő legfontosabb áramköri jellemzőit a gyártó cégek katalógusokban ismertetik.

A legfontosabb paraméterek:

A_{u0} :	nyílthurkú feszültségerősítés (Open loop voltage gain): szimmetrikus bemeneti jellel, üresjárásban, visszacsatolás nélkül, kisfrekvencián mért érték.
E_k :	közösjel-elnyomási tényező (Common mode rejection ratio, <i>CMRR</i>).
R_{bes} :	bemeneti szimmetrikus ellenállás (Input impedance).
R_{ki} :	kimeneti ellenállás.
f_0 :	az a frekvencia érték, ahol a feszültségerősítés a kisfrekvencián mért értékhez képest 3 dB-lel csökken.
f_I :	az egységnyi erősítéshez tartozó frekvencia.
I_b :	nyugalmi bemeneti áram (Input bias current): az integrált műveleti erősítő bemeneti differenciálerősítőjének munkaponti bázisárama.
I_{b0} :	bemeneti ofszet áram (Input offset current): az a bemeneti szimmetrikus áram, amely az $U_{ki} = 0$ nyugalmi kimeneti feszültség beállításához szükséges.
U_{b0} :	bemeneti ofszet feszültség (Input offset voltage): az a bemeneti szimmetrikus feszültség, amely az $U_{ki} = 0$ nyugalmi kimeneti feszültség beállításához szükséges.
$i_{d0} \left[\frac{nA}{C^\circ} \right]$:	bemeneti hőmérsékleti áram-drift (Input offset current drift): a bemeneti ofszet áram hőmérsékleti tényezője.
$u_{d0} \left[\frac{\mu V}{C^\circ} \right]$:	bemeneti hőmérsékleti feszültség-drift (Input offset voltage drift): a bemeneti ofszet feszültség hőmérsékleti tényezője.
$\pm U_t$:	tápfeszültség tartomány.
U_{bemax} :	a megengedhető maximális bemeneti feszültség, általában a tápfeszültség értékével megegyezik.
U_{kimax} :	a maximális kimeneti feszültség, általában 1-2 V-tal kisebb, mint a tápfeszültségek.
I_{kimax} :	maximális kimeneti áram. A korszerű típusok rövidzárvédelemmel vannak ellátva.
P_0 :	nyugalmi teljesítményfelvétel.
P_{dmax} :	maximális disszipált teljesítmény.
S :	a kimeneti feszültség maximális változási sebessége (Slew rate), definíciója:

$$S = \left. \frac{du_{ki}}{dt} \right|_{\max}.$$

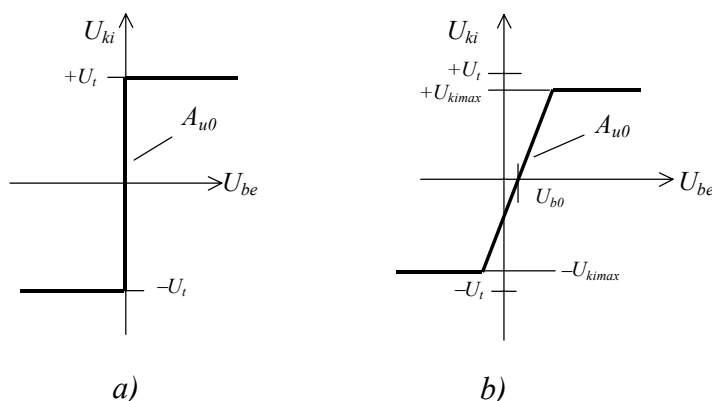
Az ideális műveleti erősítő

- végtelen nagy bemeneti ellenállással,
- végtelen nagy nyílthurkú erősítéssel,
- végtelen nagy közös feszültségelnyomási tényezővel,
- nulla kimeneti ellenállással,
- nulla ofszet értékekkel,
- nulla drift értékekkel,
- tápfeszültséggel megegyező maximális kimeneti feszültséggel,
- frekvenciafüggetlen átvitellel közelíthető.

A valóságos műveleti erősítő

- nagy nyílthurkú erősítéssel ($A_{u0} = 10^3 \dots 10^7$),
- nagy bemeneti ellenállással ($R_{bes} = 10 \text{ k}\Omega \dots 5 \text{ M}\Omega$, $R_{bek} > 100R_{bes}$),
- közel nulla kimeneti ellenállással ($R_{ki} = 10 \text{ }\Omega \dots 200 \text{ }\Omega$),
- nagy közös feszültségelnyomási tényezővel ($E_{ku} > 10^3$),
- ofszet értékekkel ($I_{b0} = 1 \text{ nA} \dots 1 \text{ }\mu\text{A}$, $U_{b0} = 1 \dots 5 \text{ mV}$),
- drift értékekkel ($i_{d0} = (0,1 \dots 10) \frac{\text{nA}}{\text{C}^\circ}$, $u_{d0} = (0,5 \dots 5) \frac{\mu\text{V}}{\text{C}^\circ}$),
- a tápfeszültségnél 1-2 V-tal kisebb maximális kimeneti feszültséggel,
- frekvenciafüggő átvitellel ($f_0 = 1 \text{ Hz} \dots 100 \text{ MHz}$) rendelkezik.

A 6.3 a) ábrán az ideális, a 6.3 b) ábrán a nemideális műveleti erősítő transzfer karakterisztikája látható.

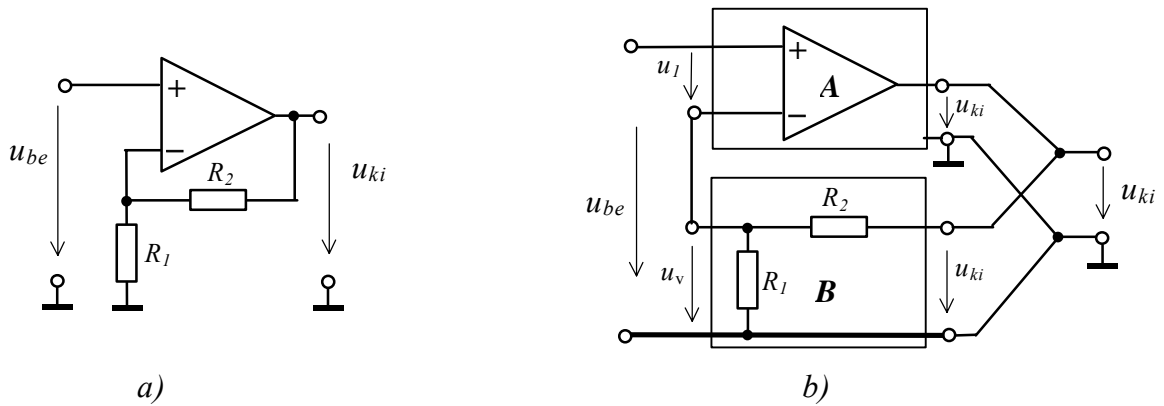


6.3. ábra. Az a) ideális és b) valóságos műveleti erősítő transzfer karakterisztikája.

6.1. MŰVELETI ERŐSÍTŐK ALKALMAZÁSAI

6.1.1. Neminvertáló erősítő kapcsolás

A műveleti erősítő neminvertáló bemenetét aszimmetrikus jel vezérli, az invertáló bemenetre a kimeneti feszültséggel arányos visszacsatolt feszültség kapcsolódik.



6.4. ábra. Neminvertáló műveleti erősítő.

A szemléltetés érdekében az erősítő kapcsolási rajza átalakítható a 6.4.b ábra szerint, amelyen könnyen felismerhető a 2. fejezetben ismertetett soros feszültség visszacsatolás. Az A erősítőnek a műveleti erősítő, a B visszacsatoló tagnak az R_1 és az R_2 ellenállásokból kialakított feszültségosztó hálózat feleltethető meg.

Az A erősítő feszültségerősítése megegyezik a műveleti erősítő A_{u0} nyílthurkú feszültségerősítésével.

A B visszacsatoló tag feszültségerősítése:

$$B_u = \frac{u_v}{u_{ki}}. \quad (6.1)$$

Az u_v visszacsatolt feszültség:

$$u_v = u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.2)$$

A 6.2 összefüggést a 6.1 egyenletbe visszahelyettesítve a B_u erősítés

$$B_u = \frac{u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{u_{ki}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.3)$$

összefüggéssel adható meg.

A visszacsatolt rendszer A'_u eredő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{A_u}{1 + A_u B_u} = \frac{A_{u0}}{1 + A_{u0} B_u}, \quad (6.4)$$

amely átalakítható az

$$A'_u = \frac{A_{u0}}{1 + A_{u0} B_u} = \frac{\frac{A_{u0}}{\frac{1}{A_{u0}} + B_u}}{\frac{1}{A_{u0}} + B_u} = \frac{1}{\frac{1}{A_{u0}} + B_u} \quad (6.5)$$

alakra. Ideális műveleti erősítőt feltételezve, a feszültségerősítése végtelen nagyra tekinthető: $A_{u0} \rightarrow \infty$, ezért a visszacsatolt rendszer eredő erősítése az

$$A'_u = \frac{1}{\frac{1}{\infty} + B_u} \approx \frac{1}{B_u} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.6)$$

összefüggéssel adható meg. Megállapítható, hogy a visszacsatolt rendszer eredő erősítését a visszacsatoló hálózat áramköri paraméterei határozzák meg, és független a műveleti erősítő paramétereitől.

A visszacsatolt rendszer eredő bemeneti ellenállása:

$$R'_{bes} = R_{bes} (1 + A_{u0} B_u) = R_{bes} (1 + H). \quad (6.7)$$

A visszacsatolt rendszer eredő kimeneti ellenállása:

$$R'_{ki} = \frac{R_{ki}}{1 + H_{\bar{u}}}, \quad H_{\bar{u}} \cong H. \quad (6.8)$$

Az erősítő kapcsolás feszültségerősítését a visszacsatolásokra vonatkozó összefüggéseken kívül ún. „műveleti erősítő” szemlélettel is meg lehet határozni.

A műveleti erősítő erősítése:

$$A_{u0} = \frac{u_{ki}}{u_{bes}}. \quad (6.9)$$

Mivel az ideális erősítő erősítése végtelen nagyra feltételezhető, ebből adódik, hogy a szimmetrikus bemeneti feszültség $u_{bes} = 0$.

Ha $u_{bes} = 0$, akkor a két bemenet földhöz képesti feszültsége megegyezik: $u_p = u_n$.

A pozitív bemenet feszültsége: $u_p = u_{be}$, a negatív bemenet feszültsége: $u_n = u_v$, tehát $u_{be} = u_v$.

Az u_v visszacsatolt feszültség:

$$u_v = u_{be} = u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.10)$$

A visszacsatolt rendszer eredő feszültségerősítése az

$$\mathbf{A}'_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.11)$$

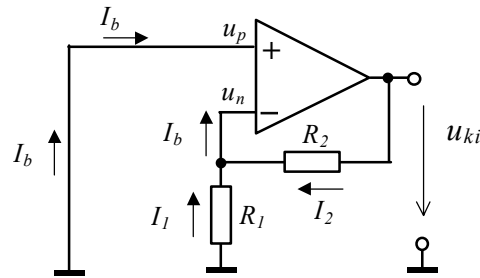
összefüggéssel határozható meg.

6.1.2. Műveleti erősítők munkapont beállítása

A műveleti erősítők munkapont beállításának feladata

- a nyugalmi bemeneti áram biztosítása,
- a bemeneti offset kiegyenlítése,
- a drift minimalizálása,
- a közös feszültség beállítása.

A műveleti erősítővel megvalósított kapcsolásokban minden esetben biztosítani kell a nyugalmi áram kialakulását. A munkaponti viszonyok vizsgálata a 6.5. ábra alapján elvégezhető.



6.5. ábra. A műveleti erősítő munkaponti viszonyainak vizsgálata.

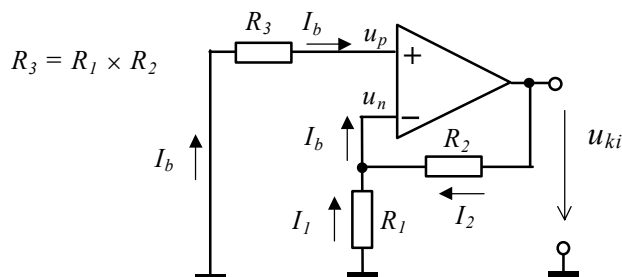
A neminvertáló erősítő kapcsolás invertáló és neminvertáló bemenetén $u_{be} = 0$ bemeneti feszültség esetén egyaránt I_b egyenáram folyik. A műveleti erősítő minden egyéb szempontból ideálisnak tekinthető, ezért az erősítő végtelen nagy feszültségerősítése miatt az u_{ki} kimeneti feszültség bármely értékéhez $u_{bes} = 0$ érték tartozik, tehát $u_n = u_p = 0$. Emiatt az R_1 ellenálláson folyó I_1 áram nulla, tehát az invertáló bemenet I_b nyugalmi egyenárama szükségszerűen megegyezik az R_2 ellenálláson folyó I_2 árammal, amely a kimeneten

$$u_{ki} = I_b R_2 \quad (6.12)$$

feszültséget hoz létre. Ez a hibafeszültség megszüntethető a neminvertáló bemenetre kapcsolt

$$R_3 = R_1 \times R_2 \quad (6.13)$$

értékű ellenállás alkalmazásával (6.6. ábra).



6.6. ábra. A műveleti erősítő munkapont beállítása.

Ebben az esetben a neminvertáló bemenet u_p feszültsége:

$$u_p = -I_b R_3. \quad (6.14)$$

Mivel $u_p = u_n$, így az R_1 ellenálláson folyó áram

$$I_1 = -\frac{u_n}{R_1} = \frac{I_b R_3}{R_1} = I_b \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.15)$$

A visszacsatoló ellenálláson folyó áram a csomóponti törvény alapján:

$$I_2 = I_b - I_1. \quad (6.16)$$

A kimeneti feszültség:

$$u_{ki} = u_n + I_2 R_2 = -I_b \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \left(I_b - I_b \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) R_2. \quad (6.17)$$

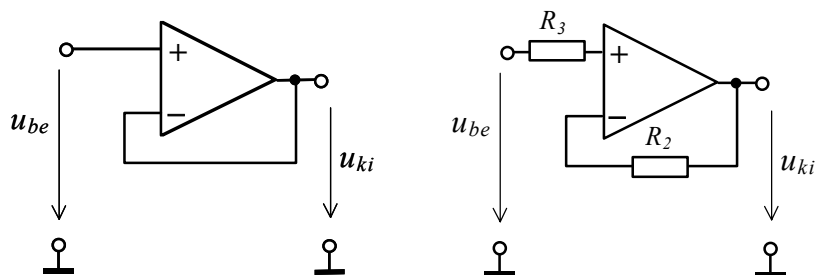
A matematikai átalakítások elvégzése után látható, hogy a kimeneti feszültség értéke

$$u_{ki} = 0, \quad (6.18)$$

tehát az R_3 ellenállás alkalmazásával a hibafeszültség megszüntethető.

6.1.3. Feszültségkövető erősítő

A feszültségkövető erősítő a neminvertáló erősítóből származtatható $R_1 = \infty$ helyettesítéssel.



6.7. ábra. Feszültségkövető erősítő.

Mivel az u_v visszacsatolt feszültség megegyezik az u_{ki} kimeneti feszültséggel, ezért a visszacsatoló tag feszültségerősítése $B_u = 1$.

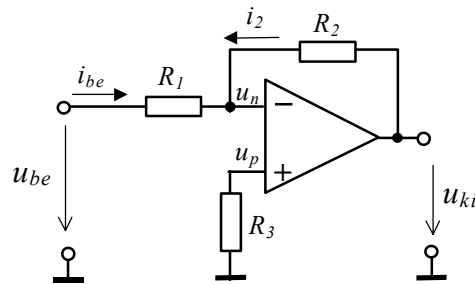
A feszültségkövető erősítő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{1}{B_u} = 1, \quad (6.19)$$

a kimeneti feszültség megegyezik a bemeneti feszültséggel. A feszültségkövető erősítő feladata az impedancia illesztés.

6.1.4. Invertáló erősítő kapcsolás

A műveleti erősítő invertáló bemenetét az u_{be} aszimmetrikus bemeneti feszültség vezérli, az erősítő kapcsolás paramétereit a negatív visszacsatolás határozza meg. Az invertáló erősítő kapcsolási rajza a 6.6. ábrán látható.



6.8. ábra. Invertáló erősítő kapcsolás műveleti erősítővel.

Mivel az ideális erősítő erősítése végtelen nagynak feltételezhető, ebből adódik, hogy a szimmetrikus bemeneti feszültség $u_{bes} = 0$, a két bemenet földhöz képesti feszültsége megegyezik: $u_p = u_n$. Mivel $u_p = 0$, ezért $u_n = 0$, az R_3 ellenálláson nem folyik áram, a kapcsolásnak ez a pontja *virtuális földponton* van.

Az ideális erősítő bemeneti ellenállása végtelen nagy, így a műveleti erősítőbe nem folyik be áram: $i_p = i_n = 0$, ezért az i_{be} bemeneti áram a visszacsatoló ellenállás áramával megegyezik: $i_{be} = -i_2$.

A bemeneti áram:

$$i_{be} = \frac{u_{be}}{R_1}. \quad (6.20)$$

A visszacsatoló ellenálláson folyó áram:

$$i_2 = \frac{u_{ki}}{R_2}. \quad (6.21)$$

Mivel $i_{be} = -i_2$, ezért

$$\frac{u_{be}}{R_1} = -\frac{u_{ki}}{R_2}. \quad (6.22)$$

Ebből az összefüggésből a kapcsolás eredő feszültségerősítése:

$$A'_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (6.23)$$

A negatív előjel utal arra, hogy a kimeneti feszültség ellentétes előjelű a bemeneti feszültséghez képest.

Az invertáló erősítő bemeneti ellenállása:

$$R_{be} = \frac{u_{be}}{i_{be}} = R_1, \quad (6.24)$$

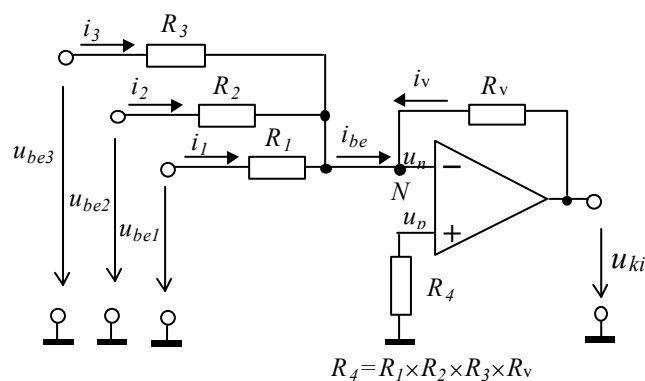
a kimeneti ellenállása pedig

$$R_{ki} = 0 \quad (6.25)$$

értékű.

6.1.5. Összegző erősítő

Az összegző erősítő kapcsolási rajza látható a 6.9. ábrán. A kapcsolás az u_{be1} , u_{be2} , u_{be3} bemeneti feszültségekre vonatkozóan invertáló erősítő alapkapsolásként viselkedik. A kimeneti feszültséget a szuperpozíció elve alapján lehet meghatározni.



6.9. ábra. Összegző erősítő kapcsolás.

A műveleti erősítő i_{be} bemeneti árama a részáramok összege:

$$i_{be} = i_1 + i_2 + i_3. \quad (6.26)$$

A műveleti erősítő invertáló bemenete virtuális földponton van, ezért a bemeneti áramok az

$$i_1 = \frac{u_{be1}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_{be2}}{R_2}, \quad i_3 = \frac{u_{be3}}{R_3} \quad (6.27)$$

összefüggések szerint határozhatók meg.

A visszacsatoló ellenálláson folyó áram:

$$i_v = \frac{u_{ki}}{R_v}. \quad (6.28)$$

Mivel $i_{be} = -i_v$, ezért

$$\frac{u_{be1}}{R_1} + \frac{u_{be2}}{R_2} + \frac{u_{be3}}{R_3} = -\frac{u_{ki}}{R_v}. \quad (6.29)$$

Ha az ellenállások értéke megegyezik:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_v = R, \quad (6.30)$$

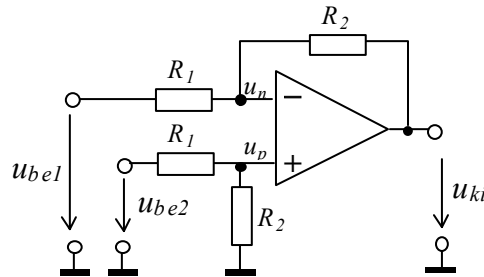
akkor a kimeneti feszültség

$$u_{ki} = -(u_{be1} + u_{be2} + u_{be3}) \quad (6.31)$$

a bemeneti feszültségek invertált összege.

6.1.6. Különbségképző erősítő

A különbségképző erősítő (differenciaerősítő) erősítését nagystabilitású passzív elemek határozzák meg. A különbségképzés hibájának csökkentése érdekében a bemenetekre csatlakozó azonos jelű ellenállásoknak azonos értékűnek kell lennie.



6.10. ábra. Különbségképző kapcsolás.

A kimeneti feszültség a szuperpozíció elve alapján meghatározható.

a) Legyen $u_{be2} = 0$. Ekkor a kapcsolás egy invertáló erősítő kapcsolás, amelynek a feszültségerősítése:

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (6.32)$$

A kimeneti feszültség ebben az esetben:

$$u_{ki1} = -\frac{R_2}{R_1} u_{be1}. \quad (6.33)$$

b) Legyen $u_{be1} = 0$. Ebben az esetben a kapcsolás egy neminvertáló erősítő kapcsolás, amelynek a feszültségerősítése:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.34)$$

Az u_{ki2} kimeneti feszültség az u_p feszültséggel arányos:

$$u_{ki2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_p. \quad (6.35)$$

A műveleti erősítő u_p feszültsége az u_{be2} bemeneti feszültségnek az R_2 ellenálláson leosztott része:

$$u_p = u_{be2} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (6.36)$$

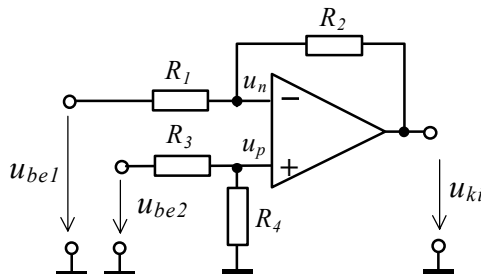
így az u_{ki2} kimeneti feszültség:

$$u_{ki2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{be2} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = u_{be2} \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.37)$$

Ha az u_{be1} és az u_{be2} bemeneti feszültség egyidejűleg vezérli az erősítőt, akkor az u_{ki} kimeneti feszültség a két kimeneti rész-feszültség összege, szuperpozíciója:

$$u_{ki} = u_{ki1} + u_{ki2} = -u_{be1} \frac{R_2}{R_1} + u_{be2} \frac{R_2}{R_1} = (u_{be2} - u_{be1}) \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.38)$$

A kimeneti feszültség csak a bemeneti feszültségek különbségével, a szimmetrikus bemeneti feszültséggel arányos, a közös jel nem hoz létre kimeneti jelet. Ha a bemenetre csatlakozó két R_1 illetve R_2 jelű ellenállás nem pontosan egyenlő, akkor a kimeneten megjelenik a közös jel erősítése is.



6.11. ábra. Különbözőképző kapcsolás különböző értékű ellenállások esetén.

A kimeneti feszültség különböző értékű ellenállások esetén (6.11. ábra) a lineáris szuperpozíció alapján, ideális műveleti erősítőt feltételezve az

$$u_{ki} = u_{ki1} + u_{ki2} = -u_{be1} \frac{R_2}{R_1} + u_{be2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6.39)$$

összefüggéssel határozható meg.

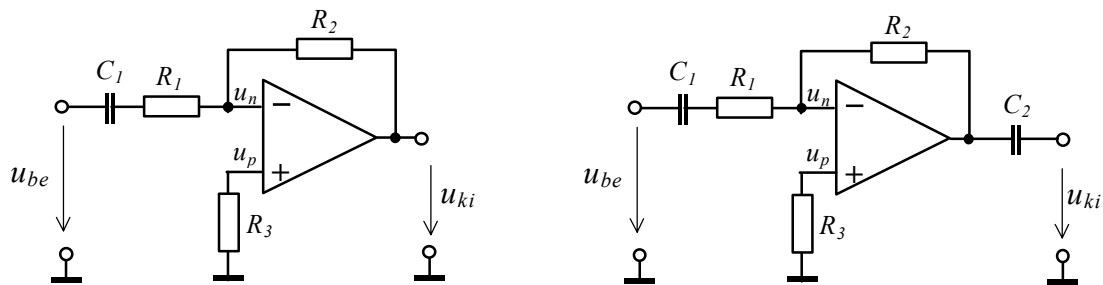
6.2. MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL MEGVALÓSÍTOTT VÁLTAKOZÓFESZÜLTÉG ERŐSÍTŐK

A műveleti erősítők alapvetően egyenfeszültség erősítők, de az egyenfeszültségű összetevő leválasztásával alkalmassá tehetők csak váltakozófeszültség erősítésére is, a típustól függő korlátozott frekvenciatartományban. A jelforrás és az erősítő bemenete, illetve az erősítő kimenete és a terhelés közé iktatott csatoló kondenzátorok kapacitását úgy kell megválasztani, hogy a működési frekvenciatartományban impedanciájuk közel nulla legyen.

Váltakozófeszültség erősítésekor az ofszet és a drift hatásának csökkentésére a visszacsatoló hálózatot úgy kell kialakítani, hogy az egyenfeszültségre vonatkozó erősítése kicsi legyen. A megfelelő működéshez a műveleti erősítő bemenetei számára a munkaponti egyenáramot mindig biztosítani kell.

6.2.1. Invertáló AC erősítő

Invertáló váltakozófeszültségű erősítő kapcsolás két kialakítása látható a 6.12. ábrán. A bemeneten a C_1 csatoló kondenzátor az egyenfeszültséget leválasztja, így itt nem folyhat egyenáram. Az erősítő invertáló bemenete a munkaponti áramot az R_2 ellenálláson keresztül, a neminvertáló bemenete pedig a tápforrásból kapja.



6.12. ábra. Invertáló AC erősítő kapcsolások.

Mivel a C_1 kapacitás egyenáramú szempontból szakadás, ezért a kimeneti egyenfeszültség leosztás nélkül csatolódik vissza, tehát az egyenfeszültségre (DC) vonatkozó erősítés egységnyi. A kimeneten a bemeneti ofszet feszültséggel egyező

egyenfeszültség jelenik meg. A hibafeszültség csökkentésére a neminvertáló bemenetre $R_3 = R_2$ értékű ellenállást kell kapcsolni.

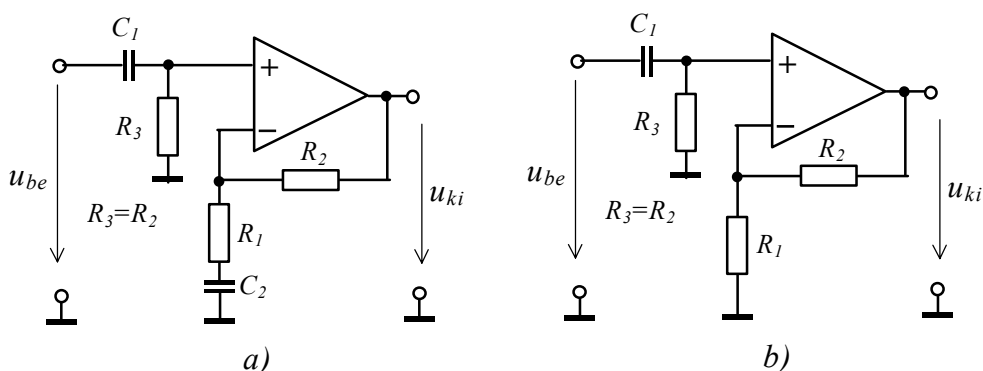
A kapcsolás váltakozófeszültségű erősítése az

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6.40)$$

összefüggéssel határozható meg.

6.2.2. Neminvertáló AC erősítő

A neminvertáló váltakozófeszültség erősítő kapcsolás látható a 6.13 a) ábrán.



6.13. ábra. Neminvertáló AC kapcsolások.

Az R_3 ellenállás biztosítja a neminvertáló bemenet munkaponti nyugalmi bemeneti áramát, de csökkenti a bemeneti impedanciát. Az invertáló bemenet nyugalmi áramát az R_2 ellenálláson keresztül kapja. A C_2 kapacitás egyenfeszültség szempontból szakadás, ezért a kimeneti egyenfeszültség leosztás nélkül csatolódik vissza, így a kapcsolás egyenfeszültség erősítése $A_{uDC} = 1$. Kis erősítés esetén a C_2 kondenzátor elhagyható (6.13 b) ábra), mert az egyenáramú negatív visszacsatolás így is megfelelő értékű lehet.

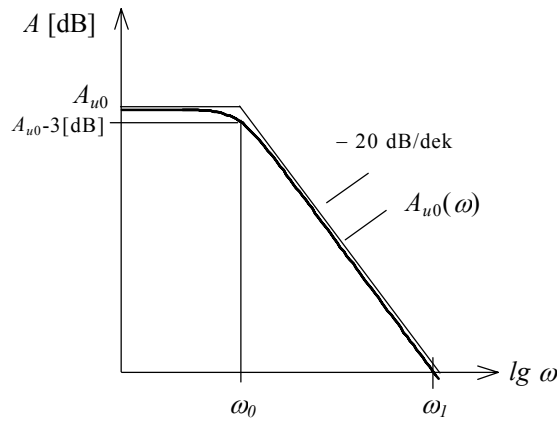
A kapcsolás váltakozófeszültségű erősítése az

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6.41)$$

összefüggés szerint határozható meg.

6.3. MŰVELETI ERŐSÍTŐK FREKVENCIAFÜGGÉSE

A valóságos műveleti erősítő jellemzői, köztük a feszültségerősítés a működési frekvencia változásával nem állandó. A feszültségerősítés a frekvenciától függő, valós változójú komplex függvény, amely például Bode-diagrammal ábrázolható. A katalógusok megadják a visszacsatolatlan műveleti erősítő Bode-diagramját, amely gyakran a 6.14. ábrán látható egyidőállandós függvény, amelynek jellegzetes pontjai az $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ törésponti frekvencia, az egységnyi erősítéshez tartozó $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$ frekvencia, valamint a műveleti erősítő A_{u0} erősítése.



6.14. ábra. A műveleti erősítő Bode-diagramja.

Az egyenfeszültség (DC) erősítő kapcsolások feszültségerősítését a visszacsatoló elemek határozzák meg, amelyek általában frekvenciafüggetlen alkatrészek, ezért a visszacsatolt erősítő erősítése

$$A'_u(\omega) = \frac{A_{u0}(\omega)}{1 + A_{u0}(\omega)B} \approx \frac{1}{B}, \quad \text{ha } A_{u0}(\omega)B > 1, \quad (6.42)$$

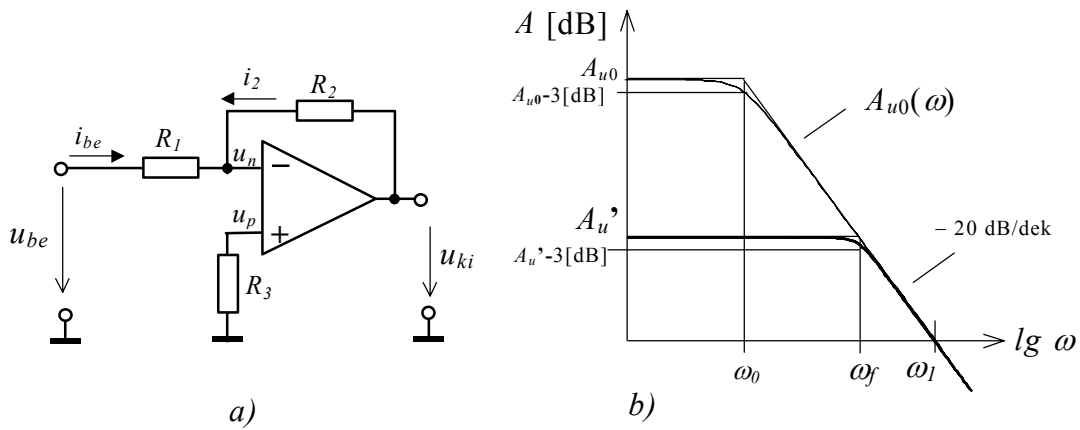
ahol a visszacsatoló hálózat erősítése

$$B = \frac{R_1}{R_2}, \quad (6.43)$$

amely nem függ a frekvenciától, ezért az eredő erősítés is frekvenciafüggetlen. Nagy frekvencián azonban $A_{u0}(\omega)$ csökken, ekkor az eredő erősítés az

$$A'_u(\omega) = \frac{A_{u0}(\omega)}{1 + A_{u0}(\omega)B} \approx A_{u0}(\omega), \quad \text{mert } A_{u0}(\omega)B < 1, \quad (6.44)$$

tehát a műveleti erősítő frekvenciamenete érvényesül, az $f_f = \frac{\omega_f}{2\pi}$ felső törésponti frekvenciánál nagyobb frekvenciatartományban az erősítés csökken. (6.15 b) ábra).



6.15. ábra. Az invertáló DC erősítő a) kapcsolása és b) Bode-diagramja.

A felső törésponti frekvencia a műveleti erősítő A_{u0} erősítése, f_0 törésponti frekvenciája, valamint a visszacsatoló hálózat adatainak ismeretében a Bode-diagram alapján meghatározható:

$$\frac{(A_{u0} - A_u') [dB]}{(f_f - f_0) [dek]} = \frac{20 [dB]}{1 [dek]}. \quad (6.45)$$

A Bode-diagram logaritmikus léptékeit figyelembevéve a 6.45 összefüggés átalakítható a

$$\frac{(20 \lg A_{u0} - 20 \lg A_u')}{20} = \frac{(\lg f_f - \lg f_0)}{1} \quad (6.46)$$

alakra. Az egyenlet rendezése után:

$$\frac{A_{u0}}{A_u'} = \frac{f_f}{f_0}. \quad (6.47)$$

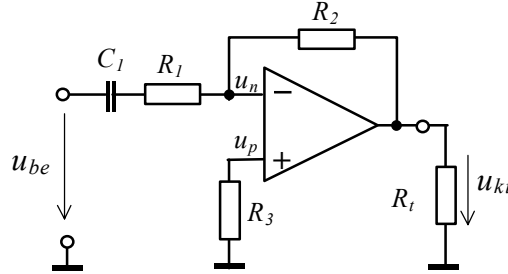
Ebből az összefüggésből meghatározható a felső törésponti frekvencia:

$$f_f = f_0 \frac{A_{u0}}{A_u'} = f_0 (1 + A_{u0} B) = f_0 (1 + H), \quad (6.48)$$

amely a műveleti erősítő törésponti frekvenciájának a hurokerősítés mértékű változása.

6.3.1. Invertáló AC erősítő alapkapsolás frekvenciafüggése

Ideális, frekvenciafüggetlen műveleti erősítőt feltételezve az AC erősítő kapsolás frekvenciafüggését a csatolókonduktátorok okozzák.



6.16. ábra. A bemeneten csatolt invertáló AC erősítő kapsolás.

A 6.16. ábrán látható kapsolás feszültségerősítése az

$$A'_u(\omega) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{j\omega R_2 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = -\frac{j\omega T_2}{1 + j\omega T_a} \quad (6.49)$$

összefüggéssel adható meg, ahol a törésponti körfrekvenciák:

$$\omega_a = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{T_a}, \quad \text{és} \quad \omega_2 = \frac{1}{R_2 C_1} = \frac{1}{T_2}. \quad (6.50)$$

A feszültségerősítés az $\omega > \omega_a$ tartományban

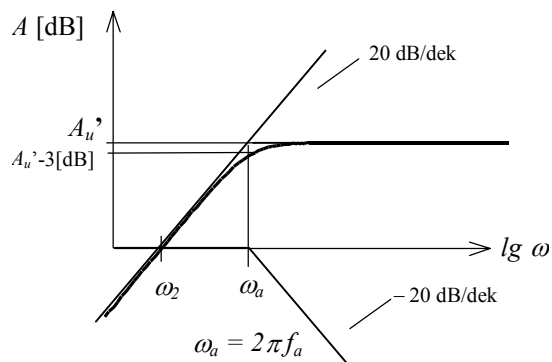
$$A'_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6.51)$$

összefüggéssel határozható meg.

A feszültségerősítés Bode-diagramja a 6.17. ábrán látható. Megállapítható, hogy kapsolás f_a alsó törésponti frekvenciáját a bemeneti C_1 csatolókonduktátor és az R_1 ellenállás értéke befolyásolja, és az

$$f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (6.52)$$

összefüggéssel adható meg.

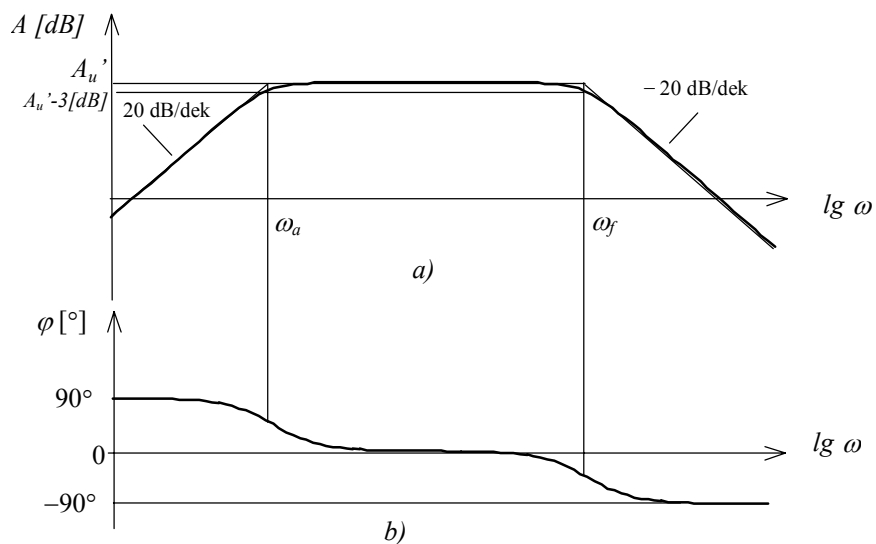


6.17. ábra. Ideális műveleti erősítővel megvalósított, a bemeneten csatolt invertáló AC erősítő Bode-diagramja

A valóságos műveleti erősítő frekvenciamenete ebben az esetben is érvényesül, az $f_f = \frac{\omega_f}{2\pi}$ felső törésponti frekvenciánál nagyobb frekvencián az erősítés csökken. A felső törésponti frekvencia az

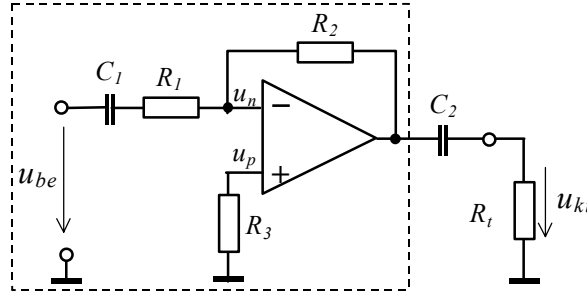
$$f_f = f_0 \frac{A_{u0}}{A_u'} = f_0 (1 + A_{u0}B) = f_0 (1 + H). \quad (6.53)$$

összefüggéssel határozható meg. A kapcsolás Bode-diagramja 6.18 a) ábrán, a fázismenete 6.18 b) ábrán látható.



6.18. ábra. Valóságos műveleti erősítővel megvalósított, a bemeneten csatolt invertáló AC erősítő Bode-diagramja

A 6.16. ábrán látható kapcsolás frekvenciamenetét a terhelő ellenállás nem befolyásolja, a 6.19. ábrán a kimeneti C_2 csatolókapacitátor miatt azonban megváltozik a kapcsolás frekvenciamenete.



6.19. ábra. A bemeneten és a kimeneten is csatolt invertáló AC erősítő kapcsolás.

Ideális műveleti erősítőt feltételezve, a rajzon a szaggatott vonallal határolt rész frekvenciamenete megegyezik a 6.16. ábrán látható kapcsolásával, ennek feszültségerősítését jelölje A_{u1} :

$$A_{u1}(\omega) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{j\omega R_2 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = -\frac{j\omega T_2}{1 + j\omega T_a}. \quad (6.54)$$

A C_2 és R_t elemekből álló rész átviteli jellemzője:

$$A_{u2}(\omega) = \frac{R_t}{R_t + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{j\omega R_t C_2}{1 + j\omega R_t C_2} = \frac{j\omega T_3}{1 + j\omega T_3}, \quad \text{ahol } |A_{u2}| \leq 1, \quad (6.55)$$

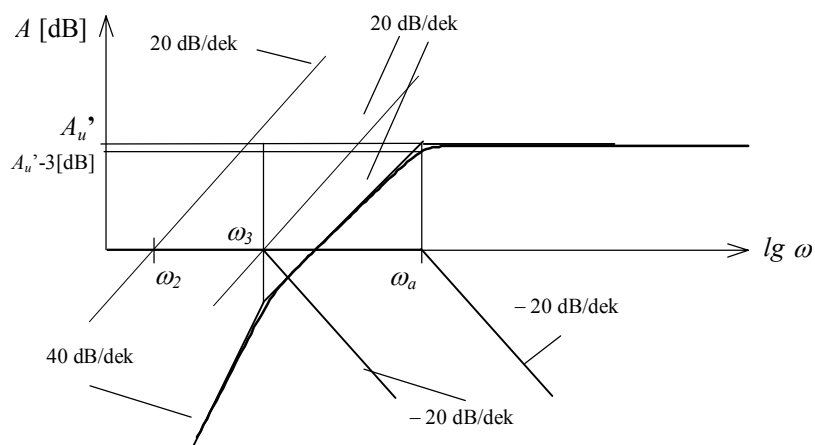
ennek törésponti körfrekvenciája:

$$\omega_3 = \frac{1}{R_t C_2} = \frac{1}{T_3}. \quad (6.56)$$

A kapcsolás eredő feszültségerősítése:

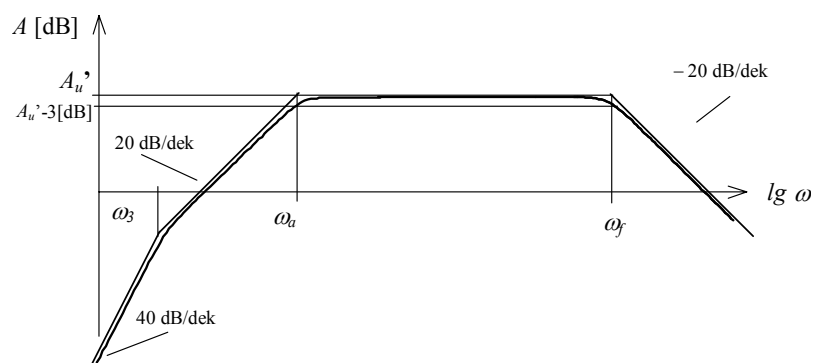
$$A'_u(\omega) = A_{u1}(\omega) \cdot A_{u2}(\omega) = -\frac{j\omega T_2}{(1 + j\omega T_a)} \cdot \frac{j\omega T_3}{(1 + j\omega T_3)}. \quad (6.57)$$

A 6.20. ábrán az eredő feszültségerősítés Bode-diagramja látható $\omega_2 < \omega_3 < \omega_a$ esetre, ideális műveleti erősítőt feltételezve.



6.20. ábra. Ideális műveleti erősítővel megvalósított, a bemeneten és a kimeneten is csatolt invertáló AC erősítő kapcsolás Bode-diagramja.

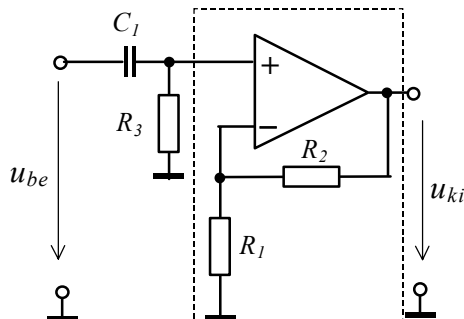
A valóságos műveleti erősítő nagy frekvenciákon ebben az esetben is megváltoztatja a kapcsolás frekvenciamenetét, a felső határfrekvenciánál nagyobb frekvenciákon az erősítés csökken. A Bode-diagram a 6.21 ábrán látható.



6.21. ábra. Valóságos műveleti erősítővel megvalósított, a bemeneten és a kimeneten is csatolt invertáló AC erősítő kapcsolás Bode-diagramja.

6.3.2. Neminvertáló AC erősítő alapkapsolás frekvenciafüggése

A neminvertáló AC erősítő kapcsolás frekvenciamenete hasonló az invertáló kapcsolás frekvenciamenetéhez.



6.22. ábra. A bemeneten csatolt neminvertáló AC erősítő alapkapsolás.

A 6.22. ábrán szaggatott vonallal határolt rész erősítése:

$$A_{u2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (6.58)$$

ideális műveleti erősítőt feltételezve frekvenciafüggetlen. A bemeneten a C_1 kondenzátor és R_3 ellenállásból álló hálózat átviteli jellemzője:

$$A_{u1} = \frac{j\omega R_3 C_1}{1 + j\omega R_3 C_1}, \text{ ahol } |A_{u1}| \leq 1. \quad (6.59)$$

A kapcsolás eredő erősítése:

$$A'_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = \frac{j\omega R_3 C_1}{(1 + j\omega R_3 C_1)} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (6.60)$$

Az alsó törésponti frekvencia az

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} \quad (6.61)$$

összefüggéssel határozható meg, az $\omega > 2\pi f_a$ körfrekvencián a kapcsolás erősítése

$$A'_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.62)$$

A valóságos műveleti erősítő frekvenciamenete ebben az esetben is korlátozza a működési frekvenciát, a felső határfrekvencia itt is az

$$f_f = f_0 \frac{A_{u0}}{A'_u} = f_0 (1 + A_{u0} B) = f_0 (1 + H). \quad (6.63)$$

alapján lehet meg határozni, de ebben a kapcsolásban a visszacsatoló tag erősítése a

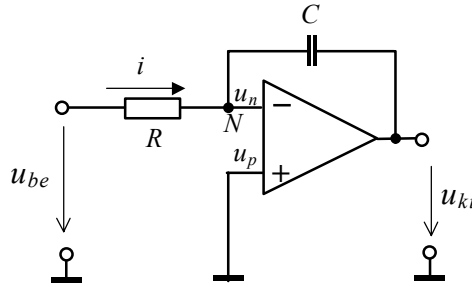
$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.64)$$

összefüggés szerint adható meg.

6.4. INTEGRÁLÓ ÉS DIFFERENCIÁLÓ KAPCSOLÁSOK

6.4.1. Integráló kapcsolás

Az invertáló műveleti erősítő visszacsatoló ellenállását kondenzátorral helyettesítve invertáló integráló kapcsolás alakítható ki. A kondenzátor negatív visszacsatolást létesít minden jelváltozásra, a visszacsatoló hurok úgy állítja be a kimeneti feszültséget, hogy (amíg lehetséges) az N ponton a virtuális nulla fennmaradjon.



6.23. ábra. Integráló kapcsolás.

A műveleti erősítő végtelen nagy erősítése miatt a bemeneti szimmetrikus feszültség nulla, ezért az N pont virtuális nulla pont. A bemeneten

$$i = \frac{u_{be}}{R_1} \quad (6.65)$$

áram folyik. A kondenzátor feszültsége a kimeneti feszültséggel egyezik meg:

$$u_{ki} = -u_C = -\frac{1}{C} \int_0^t i dt + U_{C0}, \quad (6.66)$$

ahol U_{C0} a kondenzátor kezdeti feszültsége. A 6.65 egyenletet behelyettesítve

$$u_{ki} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{be} dt + U_{C0}, \quad (6.67)$$

a kimeneti feszültség a bemeneti feszültség integráljával arányos.

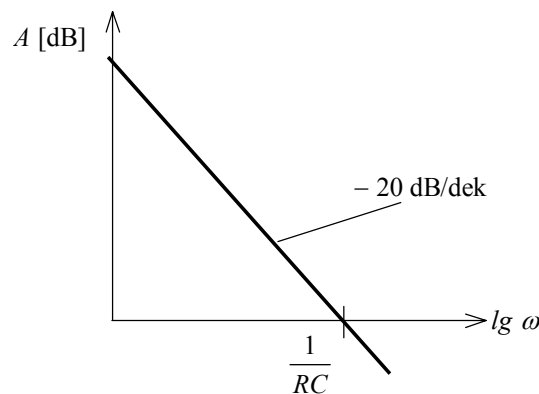
Ideális elemeket feltételezve (ideális, végtelen nagy erősítésű, ofszet nélküli műveleti erősítő, veszteségmentes kondenzátor), szinuszos bemeneti jel esetén a kimeneti feszültség meghatározható az invertáló műveleti erősítő átviteli jellemzője alapján is:

$$A_u = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{u_{ki}}{u_{be}}. \quad (6.68)$$

A kimeneti feszültség:

$$u_{ki} = -u_{be} \frac{Z_2}{Z_1} = -u_{be} \frac{1}{j\omega C R} = -u_{be} \frac{1}{j\omega RC} = -u_{be} \frac{1}{j\omega T_i}. \quad (6.69)$$

A $T_i = RC$ szorzat az integrálási időállandó. A kapcsolás Bode-diagramja a 6.24. ábrán látható.

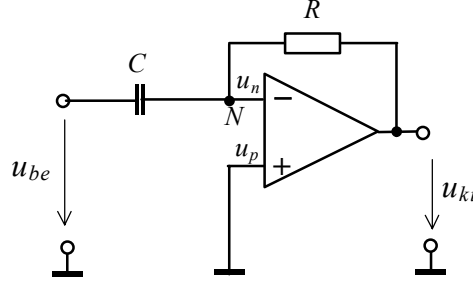


6.24. ábra. Az integráló kapcsolás Bode-diagramja.

Az integráló kapcsolás visszacsatolásában a kondenzátor egyenáram szempontjából szakadás, ezért a műveleti erősítő egyenfeszültségre nincs visszacsatolva, nyitott hurokkal működik. Ha a bemeneti feszültség $u_{be} = 0$, a valóságos műveleti erősítő bemeneti offset feszültsége miatt a kimeneti feszültség addig növekszik, míg a kivezérelhetőség határát (gyakorlatilag a pozitív, vagy a negatív tápfeszültséget) el nem éri. A hibát okozó hatás csökkentése miatt a kapcsolás módosított változatait használják a gyakorlatban.

6.4.3. Differenciáló kapcsolás

Az invertáló erősítő alapkapsolás R_I ellenállásának kondenzátorral való helyettesítésével alakítható ki a differenciáló kapcsolás (6.25. ábra).



6.25. ábra. Differenciáló kapcsolás.

A kapcsolás N virtuális nulla pontját figyelembevéve, a kondenzátor feszültsége a bemeneti feszültséggel egyezik meg: $u_C = u_{be}$, az árama pedig az

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_{be}}{dt}. \quad (6.70)$$

összefüggéssel határozható meg. Az R ellenállás feszültsége az u_{ki} kimeneti feszültséggel egyezik meg, az árama pedig a kondenzátor áramával, mert ez az áram az ideális műveleti erősítő végtelen nagy bemeneti ellenállása miatt csak a visszacsatoláson folyhat:

$$u_{ki} = -u_R = -i_C R. \quad (6.71)$$

A 6.70 egyenletet behelyettesítve, a kimeneti feszültség

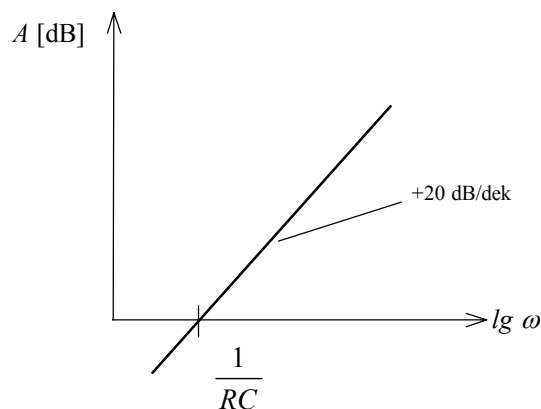
$$u_{ki} = -RC \frac{du_{be}}{dt}, \quad (6.72)$$

a bemeneti feszültség deriváltjával arányos.

Ideális műveleti erősítő feltételezésével a kapcsolás átviteli függvénye:

$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC = -j\omega T_d, \quad (6.73)$$

ahol $T_d = RC$ a differenciálási időállandó. A kapcsolás Bode-diagramja a 6.26 ábrán látható.

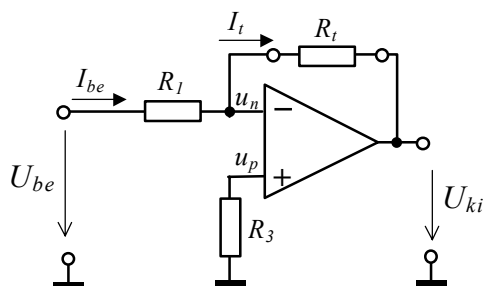


6.26. ábra. A differenciáló kapcsolás Bode-diagramja.

Ez a frekvenciakarakterisztika valóságos műveleti erősítővel nem valósítható meg, az erősítés nem növekedhet minden határon túl, a műveleti erősítő frekvenciamenete mindenképpen korlátoz. Ennek következtében a visszacsatolt rendszer a stabilitás határára kerül, gerjedékeny. A kapcsolás hátránya az is, hogy a bemeneti impedancia a frekvencia növekedésével csökken. E hátrányok miatt az ideális differenciáló kapcsolást a gyakorlatban nem használják, helyette e hátrányokat csökkentő módosított kapcsolásokat alkalmaznak.

6.5. Áramgenerátorok

A legegyszerűbb áramgenerátor invertáló erősítő kapcsolásból valósítható meg. Az invertáló bemeneten egy ismert, pontos R_I ellenálláson adott U_{be} referenciafeszültséget beállítva, az így kialakuló állandó $I_{be} = I_t$ áram folyik át a terhelésen.



6.27. ábra. Egyszerű áramgenerátor.

A bemeneti áram:

$$I_{be} = \frac{U_{be}}{R_1} = I_t. \quad (6.74)$$

A kapcsolás csak olyan esetekben alkalmazható, amikor a terhelés földfüggetlen. A bemeneti feszültséggel beállított, az R_l ellenállástól függő áram a terhelésen folyik keresztül, függetlenül annak értékétől. Ennek megfelelően a terhelőellenállás minimális értéke

$$R_{l\min} = 0, \quad (6.75)$$

rövidrezárható. A terhelés feszültsége:

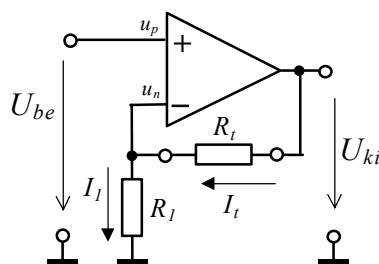
$$U_t = I_t R_t, \quad (6.76)$$

összefüggéssel határozható meg, de nem lehet nagyobb, mint a kapcsolás maximális kimeneti feszültsége.

A terhelés maximális értékét a műveleti erősítő $I_{k\max}$ maximálisan megengedett kimeneti árama és a kimeneti feszültség határozza meg:

$$R_{l\max} = \frac{U_{ki}}{I_{ki\max}}. \quad (6.77)$$

Áramgenerátor neminvertáló erősítő kapcsolással is megvalósítható. A terhelőellenállás ebben az esetben is a visszacsatoló ellenállás, és csak földfüggetlen lehet.



6.28. ábra. Neminvertáló erősítő kapcsolásból kialakított áramgenerátor.

Ideális műveleti erősítőt feltételezve a két bemenet között nincs feszültség, tehát

$$u_n = u_p.$$

Mivel a neminvertáló bemenetre az U_{be} bemeneti feszültség kerül, ezért

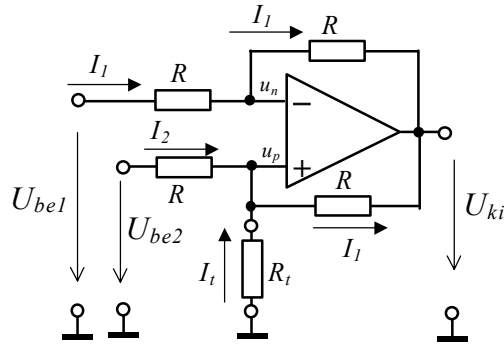
$$u_p = U_{be}, \quad \text{és} \quad u_n = U_{be}.$$

Az R_l ellenálláson folyó áramot az u_n feszültség és az R_l ellenállás határozza meg:

$$I_l = \frac{U_{be}}{R_l}. \quad (6.78)$$

Az ideális műveleti erősítő végtelen nagy bemeneti ellenállása miatt ez az áram a visszacsatoláson, tehát a terhelő ellenálláson folyik: $I_l = I_t$.

Földelt terhelés esetén alkalmazható a 6.29. ábrán látható áramgenerátor kapcsolás.



6.29. ábra. Földelt terhelés esetén alkalmazható áramgenerátor.

A négy pontosan egyforma értékű ellenállással, negatív és pozitív visszacsatolással kialakított áramgenerátor terhelő áramát a bemeneti feszültségek különbsége és az R ellenállás értéke határozza meg.

Az invertáló bemenet feszültsége:

$$u_n = U_{be1} - I_1 R. \quad (6.79)$$

A neminvertáló bemenet feszültsége:

$$u_p = U_{be2} - I_2 R. \quad (6.80)$$

Ideális műveleti erősítőt feltételezve: $u_n = u_p$. Behelyettesítve a 6.79 és 6.80 egyenleteket:

$$U_{be1} - I_1 R = U_{be2} - I_2 R, \quad (6.81)$$

$$U_{be1} - U_{be2} = (I_1 - I_2) R. \quad (6.82)$$

A neminvertáló bemeneten a műveleti erősítőbe nem folyhat be áram a végtelen nagy bemeneti ellenállás miatt, így a terhelő áram:

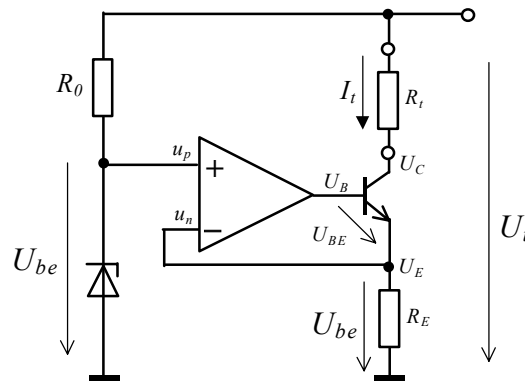
$$I_t = I_1 - I_2. \quad (6.83)$$

Ezt az összefüggést a 6.80 egyenletbe behelyettesítve, a terhelő áram az

$$I_t = \frac{U_{be1} - U_{be2}}{R} \quad (6.84)$$

összefüggéssel adható meg.

A bipoláris tranzisztoros áramgenerátor árama pontosítható műveleti erősítő alkalmazásával (6.30. ábra).



6.30. ábra. Tranzisztoros áramgenerátor követő erősítővel.

A követő erősítő U_{be} bemeneti feszültsége megegyezik az R_E emitterellenállás U_E feszültségével. A tranzisztor emitterárama

$$I_E = \frac{U_{be}}{R_E} \quad (6.85)$$

összefüggéssel adható meg, ez az áram folyik a terhelő ellenálláson is, függetlenül annak értékétől: $I_E \cong I_t$. Ennek megfelelően a terhelőellenállás minimális értéke:

$$R_{t\min} = 0. \quad (6.86)$$

A kapcsolás addig képes áramgenerátorként működni, míg a tranzisztor a normál aktív tartományban üzemel, tehát amíg a tranzisztor kollektor feszültsége nem csökken a bázisfeszültség értéke alá: $U_B = U_C$. Ebből a feltételből meghatározható a terhelőellenállás maximális értéke,

$$R_{t\max} = \frac{U_t - U_B}{I_t}, \quad (6.87)$$

amelynél a kapcsolás még áramgenerátorként működik.

6.6. KOMPARÁTOROK

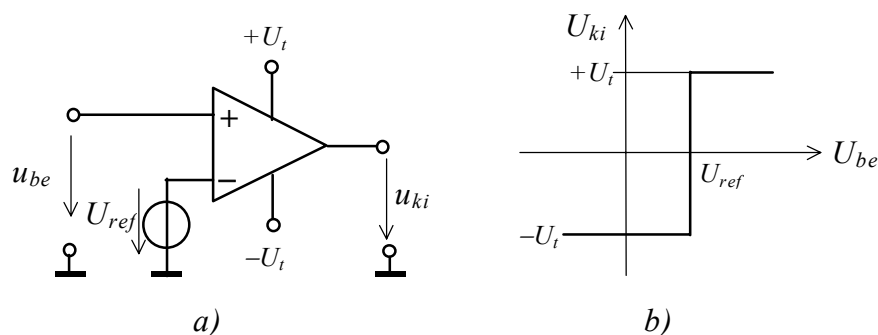
A műveleti erősítővel megvalósított komparátor áramkör a bemeneteire adott két analóg jel értékét hasonlítja össze és kétféle kimeneti jelet szolgáltat attól függően, hogy melyik bemeneti jel nagyobb. A két bemeneti jel közül az egyik rendszerint állandó értékű, ez az U_{ref} referencia feszültség, a másik bemenetre kapcsolódik a változó u_{be} bemeneti feszültség. A komparátor akkor változtatja meg a kimenetét, amikor a bemeneti feszültség értéke megegyezik a referenciafeszültséggel. Mivel a

bemeneti jel analóg, a kimeneti jel pedig digitális, ezért a komparátor analóg-digitális átalakítónak is tekinthető.

Komparátornak alkalmazható a normál műveleti erősítő, vagy a komparátor típusú erősítő, amelyre a gyorsabb működés és a logikai szintű kimenet a jellemző. A komparátorok működése a műveleti erősítő túlvezérlésén, tehát a nemlineáris működésén alapszik. Megfelelően kis értékű bemeneti jel esetén a komparátor egyszerű erősítőként működik.

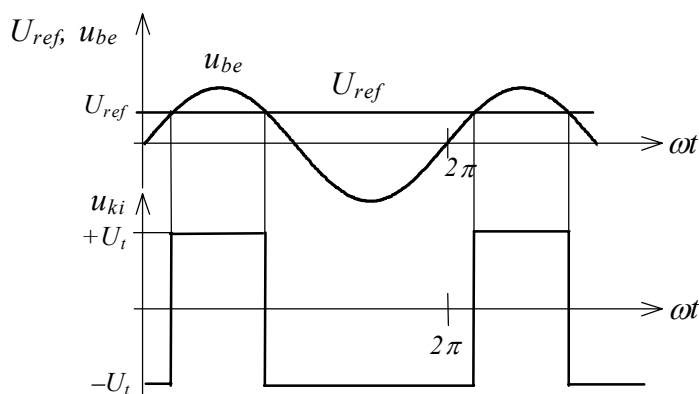
6.6.1. Neminvertáló komparátor

Az ideális műveleti erősítővel megvalósított neminvertáló komparátor kapcsolása és transzfer karakterisztikája látható a 6.31. ábrán.



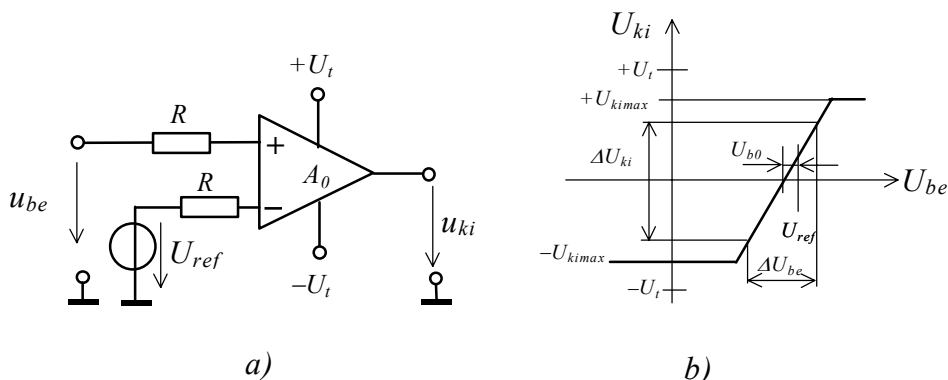
6.31. ábra. Neminvertáló komparátor a) kapcsolási rajza, b) transzfer karakterisztikája.

Ha a komparátor neminvertáló bemenetének u_{be} feszültsége nagyobb, mint az U_{ref} referenciafeszültség, akkor az u_{ki} kimeneti feszültség a pozitív tápfeszültséggel, ha kisebb, akkor a kimenet a negatív tápfeszültség értékével egyezik meg. A 6.32. ábrán a neminvertáló komparátor bemeneti és kimeneti feszültség-időfüggvénye látható szinuszos bemeneti jel és pozitív értékű referenciafeszültség esetén.



6.32. ábra. A neminvertáló komparátor bemeneti és kimeneti feszültség-időfüggvénye.

A valóságos műveleti erősítő véges erősítéssel, nullától eltérő értékű ofszet feszültséggel rendelkezik, és túlvezérlés esetén a $\pm U_t$ tápfeszültség értéknél mindig kisebb a kimeneti feszültség minimális és maximális értéke. A 6.33 a) ábrán a valóságos műveleti erősítővel megvalósított neminvertáló komparátor kapcsolása, a 6.33 b) ábrán a transzfer karakterisztikája látható.



6.33. ábra. Valóságos műveleti erősítővel kialakított neminvertáló komparátor a) kapcsolása és b) transzfer karakterisztikája.

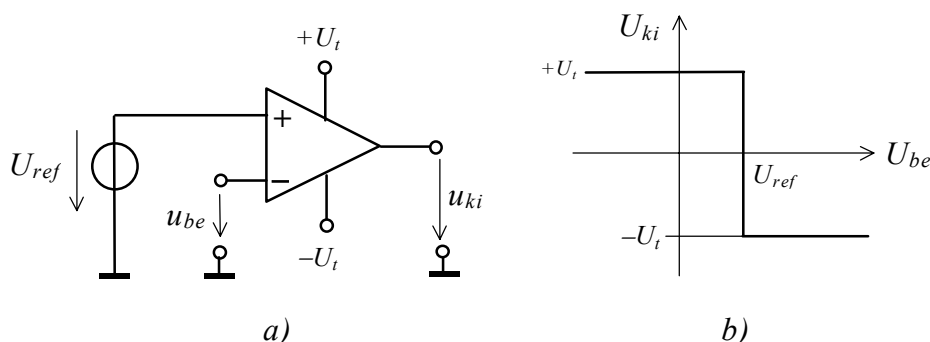
A valóságos műveleti erősítővel megvalósított komparátor transzfer karakterisztikája véges meredekségű, az erősítő A_{u0} erősítésének megfelelően:

$$A_{u0} = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta U_{be}}, \quad (6.88)$$

a billenési szint értékét pedig a műveleti erősítő ofszet feszültsége módosítja.

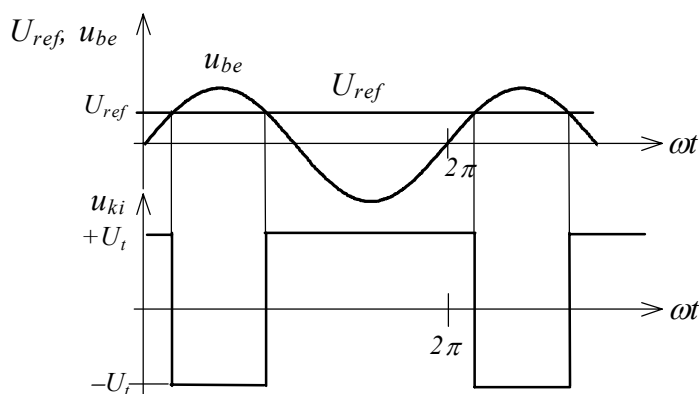
6.6.2. Invertáló komparátor

Az ideális műveleti erősítővel megvalósított invertáló komparátor kapcsolása és transzfer karakterisztikája látható a 6.34. ábrán.



6.34. ábra. Invertáló komparátor a) kapcsolása és b) transzfer karakterisztikája.

Az invertáló komparátor (–) invertáló bemenetére kell kapcsolni az u_{be} bemeneti feszültséget, a (+) neminvertáló bemenetére pedig az U_{ref} referenciafeszültséget. Ha a bemeneti feszültség nagyobb, mint a referenciafeszültség, akkor az u_{ki} kimeneti feszültség a negatív tápfeszültséggel, ha kisebb, akkor a kimenet a pozitív tápfeszültség értékével egyezik meg.

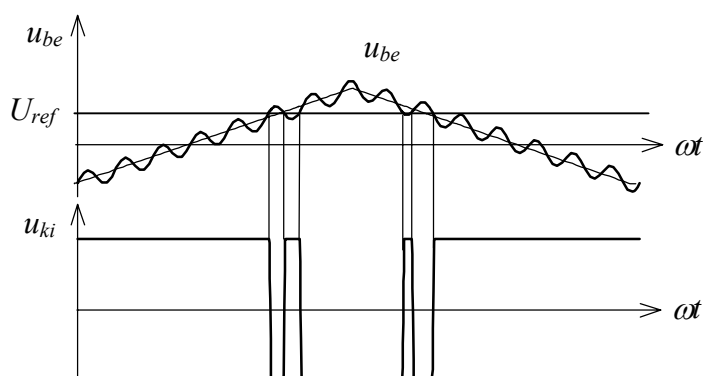


6.35. ábra. Az invertáló komparátor bemeneti és kimeneti feszültség-időfüggvénye.

A 6.35. ábrán az invertáló komparátor bemeneti és kimeneti feszültség-időfüggvénye látható szinuszos bemeneti jel és pozitív értékű referenciafeszültség esetén.

6.6.3. Histerézises komparátor

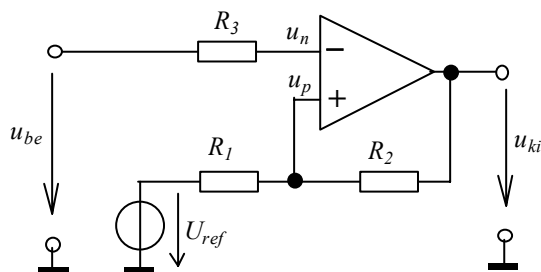
Ha a bemeneti jelre zavarjel szuperponálódik, akkor a komparálási szintet a bemeneti jel mindkét irányban többször átlépi, ezért a komparátor kimeneti jele bizonytalanúvá válik (6.36. ábra). A bemeneti zavarjel hatása csökkenthető, ha a komparátor oda- és visszabillenési szintje különböző értékű, amely a komparátor kis mértékű pozitív visszacsatolásával valósítható meg.



6.36. ábra. A komparátor bemeneti és kimeneti feszültség-időfüggvénye zajos bemeneti feszültség esetén.

6.6.3.1. Invertáló hiszterézises komparátor

Az invertáló hiszterézises komparátor kapcsolása látható a 6.37. ábrán. A komparátor kimenete akkor billen át, amikor az invertáló bemenetre kapcsolt bemeneti feszültség pillanatértéke megegyezik a neminvertáló bemenet feszültségével. A neminvertáló bemenet feszültségét két tényező befolyásolja: egyrészt az U_{ref} referenciafeszültség, másrészt az u_{ki} kimeneti feszültség visszacsatolt értéke. Mivel a kimenet két értéket vehet fel, így a visszacsatolás miatt két (alsó és felső) komparálási szint jön létre. A komparátor akkor billen át, amikor a bemeneti feszültség először meghaladja a felső komparálási szintet, és csak akkor billen vissza, ha a bemeneti jel az alsó billenési szint értéke alá csökken. Ha a zajfeszültség csúcstól-csúcsig mért értéke kisebb, mint a felső és az alsó billenési szint különbsége, akkor elkerülhető a komparátor hibás működése.



6.37. ábra. Invertáló hiszterézises komparátor.

A felső billenési szint meghatározása

Ha a bemeneti feszültség u_{be} negatív irányból pozitív irányba változik, a kimeneti feszültség

$$U_H (= +U_{kimax})$$

értékű. A komparátor kimenete akkor változik meg, ha az *invertáló* és a *neminvertáló* bemenetek feszültsége megegyezik:

$$u_n = u_p.$$

Az *invertáló* bemenet feszültsége: $u_n = u_{be}$.

A bemeneti feszültség értéke, amikor a komparátor átbillen:

$$u_{be} = U_f,$$

a felső billenési szint.

A *neminvertáló* bemenet u_p feszültségét két feszültség befolyásolja: egyrészt az u_{ki} kimeneti feszültség, másrészt az U_{ref} referenciafeszültség.

A *neminvertáló* bemenet u_p feszültsége a szuperpozíció alkalmazásával:

$$u_p = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.89)$$

Behelyettesítések után ($u_p = U_f$, és $u_{ki} = U_H$) a felső billenési szint az:

$$U_f = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_H \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.90)$$

összefüggés szerint határozható meg.

Az U_a alsó billenési szint meghatározása

Ha a bemeneti feszültség u_{be} pozitív irányból negatív irányba változik, a kimeneti feszültség

$$U_L (= -U_{kimax})$$

értékű. A komparátor kimenete akkor változik meg, ha az *invertáló* és a *nem-invertáló* bemenetek feszültsége megegyezik:

$$u_n = u_p.$$

Az *invertáló* bemenet feszültsége: $u_n = u_{be}$.

A bemeneti feszültség értéke, amikor a komparátor átbillen:

$$u_{be} = U_a,$$

az alsó billenési szint.

A *neminvertáló* bemenet u_p feszültsége a szuperpozíció alkalmazásával:

$$u_p = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.91)$$

Behelyettesítések után ($u_p = U_a$, és $u_{ki} = U_L$) az alsó billenési szint az

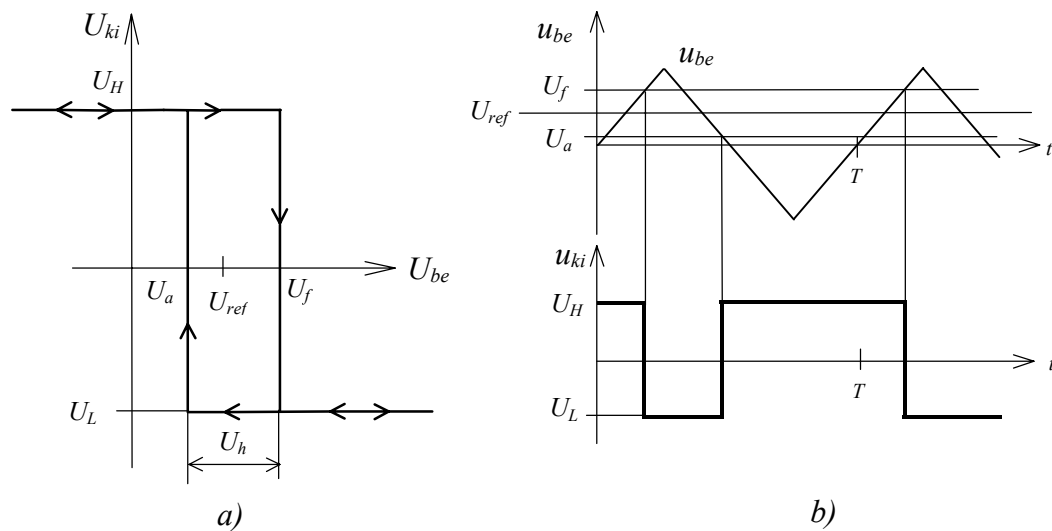
$$U_a = U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_L \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.92)$$

összefüggéssel határozható meg.

A két billenési szint különbsége a hiszterézistávolság:

$$U_h = U_f - U_a = (U_H - U_L) \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.93)$$

Az invertáló hiszterézises komparátor transzfer karakterisztikája és időfüggvényei a 6.38. ábrán láthatók.

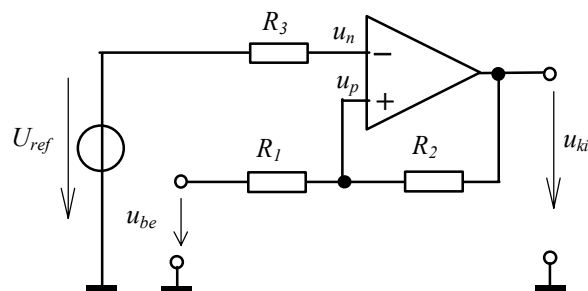


6.38. ábra. Az invertáló hiszterézises komparátor a) transzfer karakterisztikája és b) időfüggvényei.

A komparátor kimenete akkor alacsony szintű, ha a bemeneti feszültség pillanatértéke értéke nagyobb a felső billenési szint értékénél, és akkor billen át a magas szintre, ha a bemeneti feszültség az alsó billenési szint értéke alá csökken.

6.6.3.2. Neminvertáló hiszterézises komparátor

Az invertáló hiszterézises komparátor bemenetén a bemeneti és a referenciafeszültséget megcserélve neminvertáló hiszterézises komparátor alakítható ki. A neminvertáló hiszterézises komparátor kapcsolása a 6.39. ábrán látható.



6.39. ábra. Neminvertáló hiszterézises komparátor.

A felső billenési szint meghatározása

Ha a bemeneti feszültség u_{be} negatív irányból pozitív irányba változik, a kimeneti feszültség

$$U_L (= -U_{kimax}).$$

A komparátor kimenete akkor változik meg, ha az *invertáló* és a *neminvertáló* bemenetek feszültsége megegyezik:

$$u_n = u_p.$$

Az *invertáló* bemenet feszültsége: $u_n = U_{ref} (= u_p)$.

A bemeneti feszültség értéke, amikor a komparátor átbillen:

$$u_{be} = U_f,$$

a felső billenési szint.

A *neminvertáló* bemenet feszültségét a bemeneti feszültség és a kimeneti feszültség együttesen határozza meg.

A *neminvertáló* bemenet u_p feszültsége a szuperpozíció alkalmazásával:

$$u_p = u_{be} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.94)$$

Behelyettesítések után ($u_p = U_{ref}$, $u_{be} = U_f$ és $u_{ki} = U_L$):

$$U_{ref} = U_f \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_L \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.95)$$

Ebből az egyenletből meghatározható a felső billenési szint értéke:

$$U_f = \frac{U_{ref} - U_L \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - U_L \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.96)$$

Az U_a alsó billenési szint meghatározása

Ha a bemeneti feszültség u_{be} pozitív irányból negatív irányba változik, a kimeneti feszültség

$$U_H (= +U_{kimax})$$

értékű. A bemeneti feszültség értéke, amikor a komparátor átbillen:

$$u_{be} = U_a,$$

az alsó billenési szint.

A *neminvertáló* bemenet u_p feszültsége a szuperpozíció alkalmazásával:

$$u_p = u_{be} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.97)$$

Behelyettesítések után ($u_p = U_{ref}$, $u_{be} = U_a$ és $u_{ki} = U_H$):

$$U_{ref} = U_a \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_H \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.98)$$

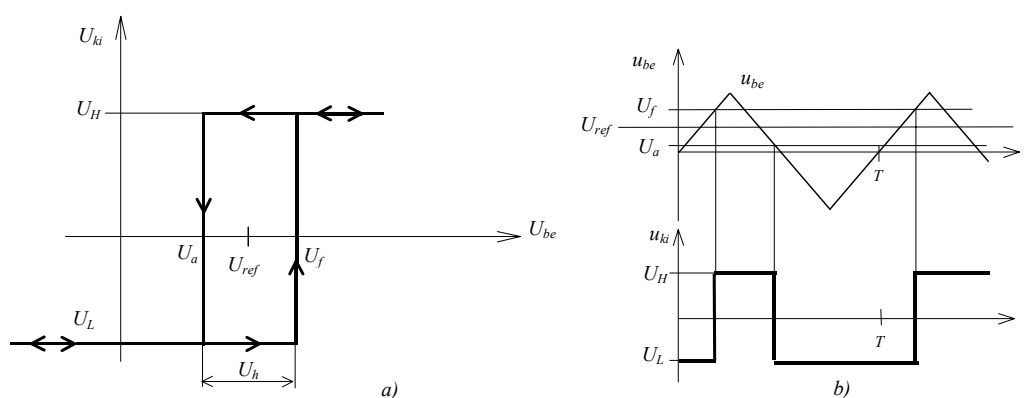
Ebből az egyenletből meghatározható az alsó billenési szint értéke:

$$U_a = \frac{U_{ref} - U_H \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - U_H \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.99)$$

A hiszterézis távolság:

$$U_h = U_f - U_a = (U_H - U_L) \frac{R_1}{R_2}, \quad (6.100)$$

a felső és az alsó billenési szint különbsége.

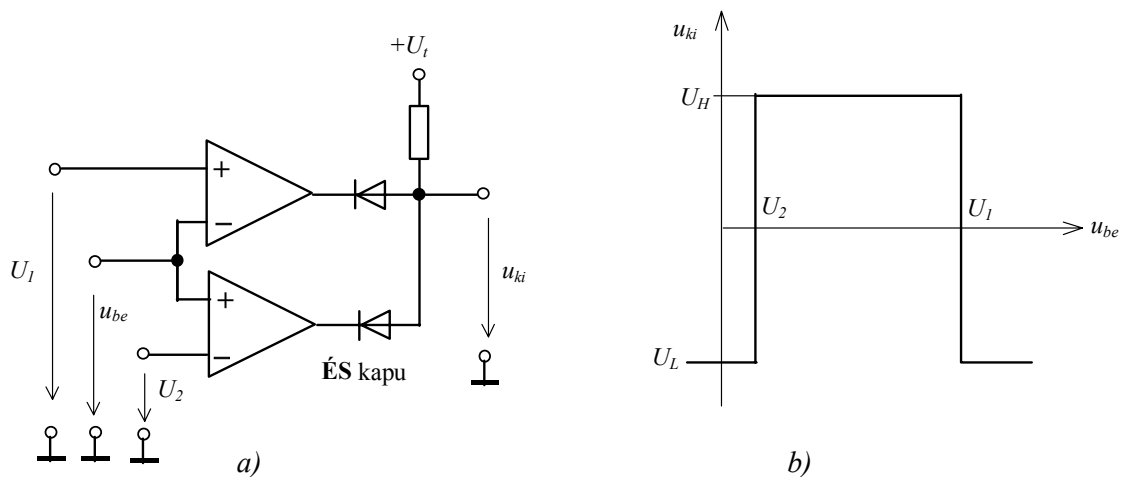


6.40. ábra. A neminvertáló hiszterézises komparátor a) transzfer karakterisztikája és b) időfüggvényei.

A kapcsolás transzfer karakterisztikája a 6.40 a) ábrán, és időfüggvényei 6.40 b) ábrán láthatók háromszög jelformájú bemeneti feszültség és pozitív referenciafeszültség esetén.

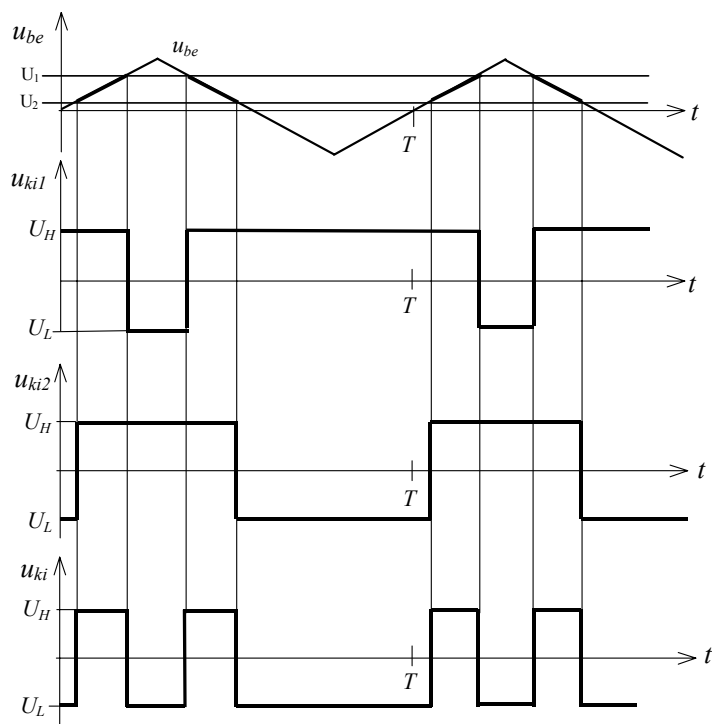
6.6.4. Ablakkomparátor

Az ablakkomparátor két komparátorból felépített kapcsolás, amellyel eldönthető, hogy a bemenetére kapcsolt u_{be} feszültség az előírt határok között van-e, vagy azon kívül. A műveleti erősítők kimenetét diódákkal, vagy logikai kapukkal kell összekapcsolni. Az ablakkomparátor kapcsolása a 6.41 a) ábrán látható, a kimeneten diódás ÉS kapuval.



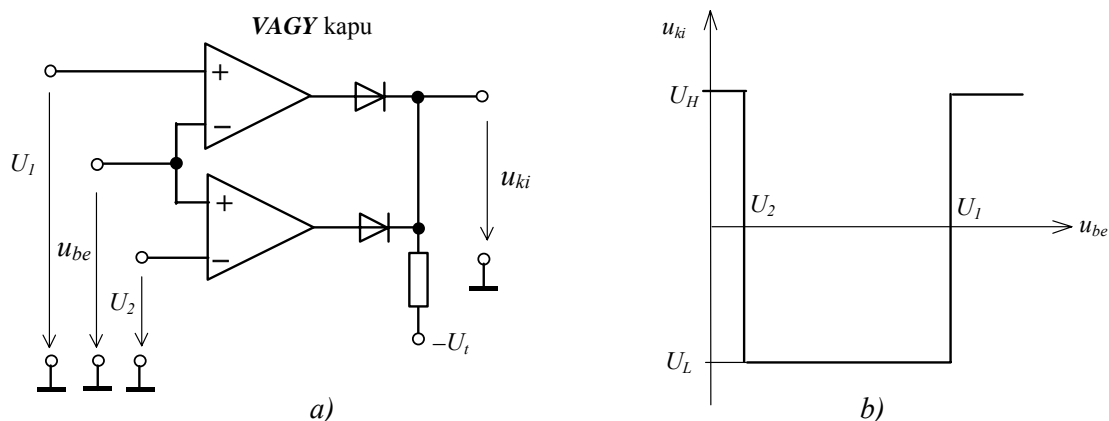
6.41. ábra. A kimenetén logikai ÉS kapuval megvalósított ablakkomparátor a) kapcsolása, b) transzfer karakterisztikája.

Az ablakkomparátor kimenete akkor U_H (magas) szintű, ha mindkét műveleti erősítő kimenete U_H értékű, tehát az u_{be} bemeneti feszültség az U_1 és U_2 feszültségértékek között van, minden más esetben U_L (alacsony) értékű. A kapcsolat jellemző idő függvényei láthatók a 6.42. ábrán.



6.42. ábra. Az ablakkomparátor időfüggvényei.

A 6.43 a) ábrán látható ablakkomparátor kimenete logikai VAGY kapu. Ebben az esetben akármelyik műveleti erősítő kimenete U_H , (magas) szintű, akkor a közös kimenet is U_H (magas) szintű. A közös kimenet csak akkor U_L (alacsony) szintű, ha mindkét kimenet U_L (alacsony) szintű, tehát a bemeneti jel értéke U_1 és U_2 között van.

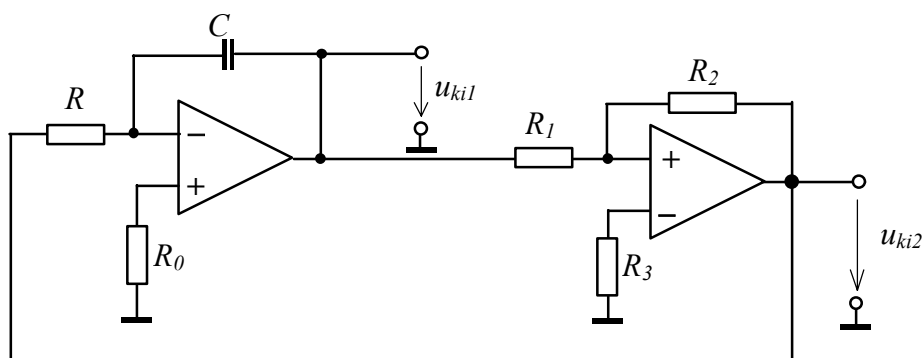


6.43. ábra. A kimenetén logikai VAGY kapuval megvalósított ablakkomparátor a) kapcsolása, és b) transzfer karakterisztikája.

A 6.43 b) ábrán a kimenetén logikai VAGY kapuval megvalósított ablakkomparátor transzfer karakterisztikája látható.

6.7. HULLÁMFORMAGENERÁTOROK

A hullámformagenerátorok különböző hullámformájú (négyszög, impulzus, fűrész, háromszög, stb.) kimeneti jelek előállítására alkalmasak. Áramkörüi kialakításuk alapja gyakran a 6.44. ábrán látható kapcsolás.



6.44. ábra. Hullámforma generátor.

Műveleti erősítővel megvalósított integrátor és hiszterézises komparátor alkalmazásával háromszög és négyszög hullámformájú jelek állíthatók elő. Az integrátor

u_{ki1} kimeneti jele vezérli a hiszterézises komparátor bemenetét, amelynek u_{ki2} kimeneti jele egyben az integráló kapcsolás bemeneti jele is.

A bekapcsolás pillanatában a komparátor u_{ki2} kimenete a két lehetséges érték (U_H , U_L) egyike, például U_H . Ezt a feszültséget az integráló kapcsolás $\tau = RC$ idő-állandóval integrálja mindaddig, amíg u_{ki1} értéke meg nem egyezik a komparátor kimenetéről visszacsatolt feszültség negatív értékével, a példa szerint:

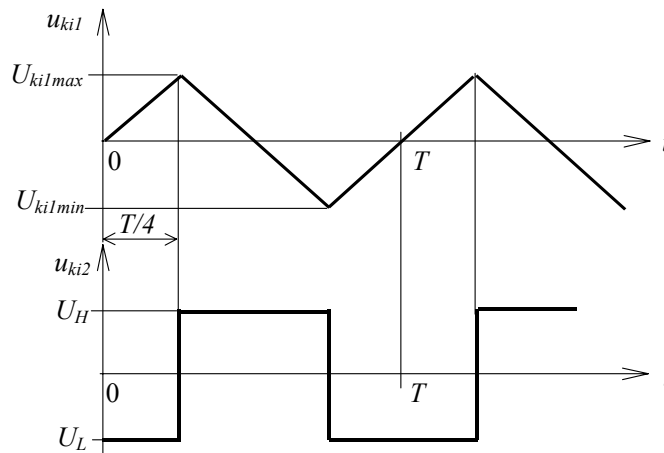
$$U_{ki1\max} = -U_H \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.101)$$

Ekkor a komparátor kimenete megváltozik, átbillen az U_L értékre. Az integráló kapcsolás bemenetére ez a megváltozott feszültség (U_L) kerül, ezt integrálja a kapcsolás mindaddig, amíg az u_{ki1} feszültség el nem éri az

$$U_{ki1\min} = -U_L \frac{R_1}{R_2} \quad (6.102)$$

értéket. Ekkor a komparátor kimenete ismét átbillen, így a folyamat periodikusan ismétlődik. A kapcsolás időfüggvényei a 6.45. ábrán láthatók.

Az u_{ki2} kimeneti feszültség amplitúdóját a műveleti erősítő maximális kimeneti feszültsége határozza meg (U_H és U_L). Az u_{ki1} háromszögjel amplitúdói ($U_{ki1\max}$ és $U_{ki1\min}$) a 6.101 és a 6.102 összefüggések alapján határozhatók meg.



6.45. ábra. Hullámforma alapgenerátor időfüggvényei.

A hullámforma generátor periódusideje az integrátor kimeneti jelének időfüggvényéből határozható meg.

Az integrátor u_{ki1} kimeneti feszültségének időfüggvénye:

$$u_{ki1}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{ki2}(t) dt. \quad (6.103)$$

Az u_{ki2} kimeneti feszültség értéke a $0 - \frac{T}{4}$ időtartományban állandó U_H értékű.

Behelyettesítve a 6.103 összefüggésbe:

$$u_{ki1}\left(\frac{T}{4}\right) = -\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{4}} U_H(t) dt. \quad (6.104)$$

Az integrálás után:

$$u_{ki1}\left(\frac{T}{4}\right) = -\frac{1}{RC} U_H \frac{T}{4}. \quad (6.105)$$

A $t = \frac{T}{4}$ időpillanatban az u_{ki1} feszültség pillanatértéke megegyezik a komparátor kimenetéről visszacsatolt feszültség negatív értékével, a 6.101 összefüggés szerint:

$$u_{ki1}\left(\frac{T}{4}\right) = -\frac{R_1}{R_2} U_H \quad (6.106)$$

Behelyettesítve a 6.105 összefüggésbe:

$$-\frac{R_1}{R_2} U_H = -\frac{1}{RC} U_H \frac{T}{4}. \quad (6.107)$$

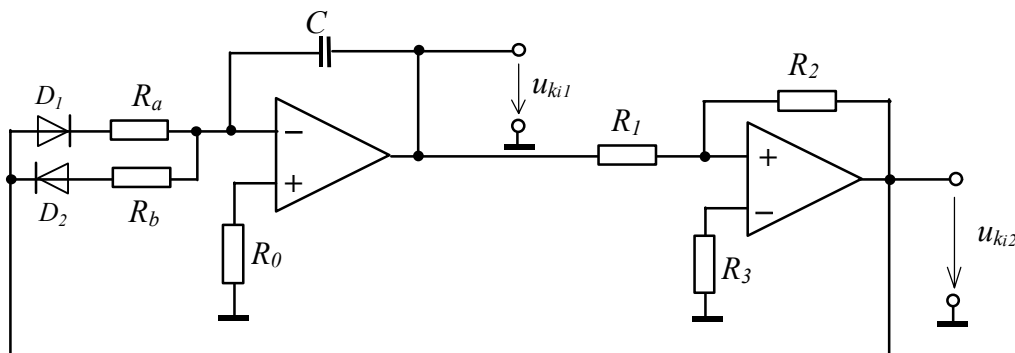
Ebből az összefüggésből a periódusidő:

$$T = 4RC \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.108)$$

A működési frekvencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4RC} \frac{R_2}{R_1}. \quad (6.109)$$

Mivel az integráló kapcsolás kondenzátorának töltő és kisütő ellenállása egyaránt az R ellenállás, ezért a periódus két egyforma félperiódusra bontható. A 6.46. ábrán látható kapcsolásban a kondenzátor töltése és kisütése különböző értékű ellenálláson keresztül történik, így a különböző integrálási időállandók miatt az u_{ki2} kimeneti feszültség kitöltése az R_a és R_b ellenállások értékének függvényében változtatható.

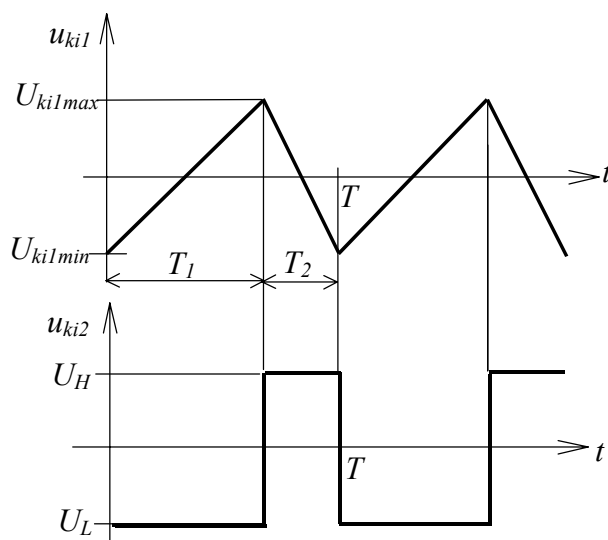


6.46. ábra. Változtatható kitöltésű hullámforma generátor.

A kapcsolás működési frekvenciája az

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{2(R_a + R_b)C} \frac{R_2}{R_1} \quad (6.110)$$

összefüggéssel határozható meg.

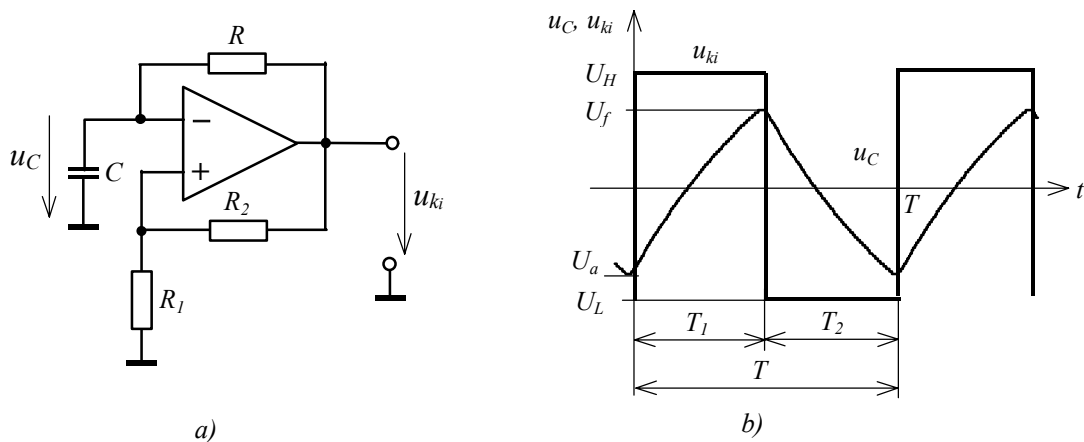


6.47. ábra. A változtatható kitöltésű hullámforma generátor időfüggvényei.

A változtatható kitöltésű hullámforma generátor időfüggvényei a 6.47. ábrán láthatók.

6.7.1. Astabil multivibrátor

Négyszög hullámformájú kimeneti feszültség állítható elő a 6.48 a) ábrán látható műveleti erősítővel megvalósított astabil multivibrátor kapcsolással.



6.48. ábra. Astabil multivibrátor a) kapcsolása és b) időfüggvényei.

A kapcsolás egy invertáló hiszterézises komparátor $U_{ref}=0$ referenciafeszültséggel. A bemeneti feszültség a kondenzátor u_c feszültsége, amely a negatív visszacsatolás miatt a kimeneti feszültség polaritásának megfelelően (U_H vagy U_L) $\tau = RC$ időállandóval exponenciális függvény szerint változik. A hiszterézises komparátor felső billenési szintje az

$$U_f = U_H \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (6.111)$$

az alsó billenési szintje pedig az

$$U_a = U_L \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6.112)$$

összefüggéssel határozható meg, ahol U_H a komparátor kimeneti feszültségének pozitív, U_L pedig a negatív maximális értéke. A komparátor akkor billen át, amikor a kondenzátor feszültsége megegyezik az alsó, vagy a felső billenési szinttel: $u_c = U_a$, vagy $u_c = U_f$.

Az astabil multivibrátor időfüggvényei a 6.48 b) ábrán láthatók.

Az astabil multivibrátor $T = T_1 + T_2$ periódusideje a kondenzátor feszültségváltozásának vizsgálatával határozható meg.

A kondenzátor feszültség-időfüggvénye:

$$u_c(t) = -(U_a + U_H)e^{-\frac{t}{\tau}} + U_H. \quad (6.113)$$

Mivel a kondenzátor töltése és kisütése azonos időállandójú ($\tau = RC$), valamint feltételezve, hogy a billenési szintek abszolút értéke megegyezik, ezért állandósult állapotban a kimeneti feszültség a $t = T_1 = \frac{T}{2}$ időpillanatban változik meg.

A feszültség időfüggvény pillanatértéke a $t = \frac{T}{2}$ időpillanatban:

$$u_c\left(\frac{T}{2}\right) = -(U_a + U_H)e^{-\frac{T}{2RC}} + U_H. \quad (6.114)$$

Állandósult állapotban a $t = \frac{T}{2}$ időpillanatban a kondenzátor feszültségének pillanatértéke az

$$u_c\left(\frac{T}{2}\right) = U_f \quad (6.115)$$

felső billenési szinttel egyezik meg, ezért a 6.114 összefüggés

$$U_f = -(U_a + U_H)e^{-\frac{T}{2RC}} + U_H. \quad (6.116)$$

alakban írható fel, majd az U_f és az U_a billenési szintekre vonatkozó 6.111 és 6.112 összefüggéseket behelyettesítve:

$$U_H \frac{R_1}{R_1 + R_2} = - \left(U_L \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_H \right) e^{-\frac{T}{2RC}} + U_H. \quad (6.117)$$

Feltételezve, hogy az alsó és a felső billenési szintben szereplő U_L és U_H értékek megegyeznek:

$$|U_H| = |U_f| = |U_{ki}|, \quad (6.118)$$

ezt a 6.117 összefüggésbe behelyettesítve

$$U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = - \left(U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{ki} \right) e^{-\frac{T}{2RC}} + U_{ki}, \quad (6.119)$$

a kapcsolás periódusideje a

$$T = 2RC \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2} \quad (6.120)$$

összefüggéssel határozható meg.

A kimeneti feszültség $a = \frac{T_1}{T}$ kitöltési tényezője változik, ha a negatív visszacsatolást alkotó ellenállás és kondenzátor $\tau = RC$ időállandója a két periódusrészben (T_1 és T_2) nem azonos, a kondenzátor töltése az R_a , míg a kisütése az R_b ellenálláson keresztül történik (6.53 a) ábra). A periódusidő két összetevője

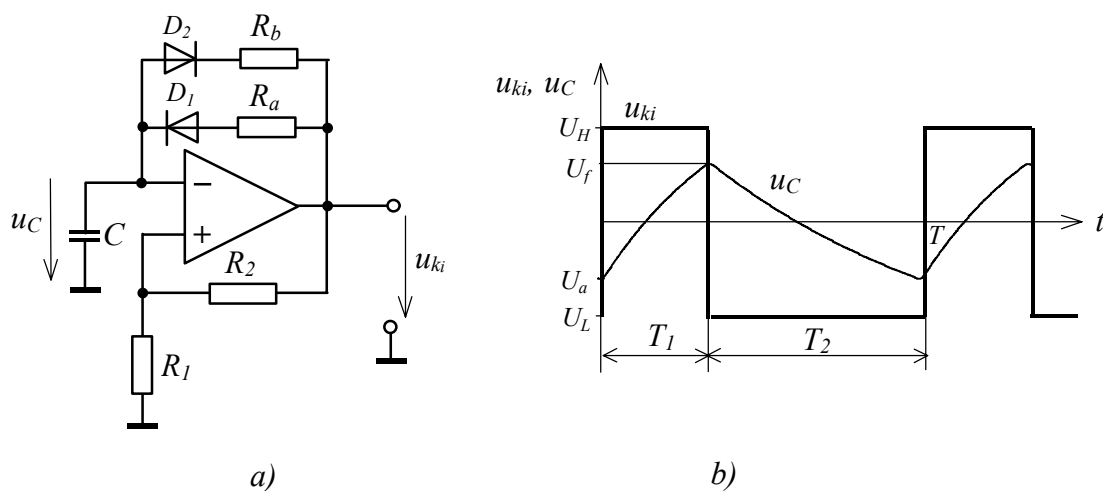
$$T_1 = R_a C \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{és} \quad T_2 = R_b C \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}, \quad (6.121)$$

itt is feltételezve, hogy az U_L és U_H értékek megegyeznek.

A kapcsolás periódusideje állandósult állapotban:

$$T = T_1 + T_2 = (R_a + R_b) C \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}. \quad (6.122)$$

A kapcsolás időfüggvényei a 6.49 b) ábrán láthatók.



6.49. ábra. Változtatható kitöltésű astabil multivibrátor a) kapcsolása és b) időfüggvényei.