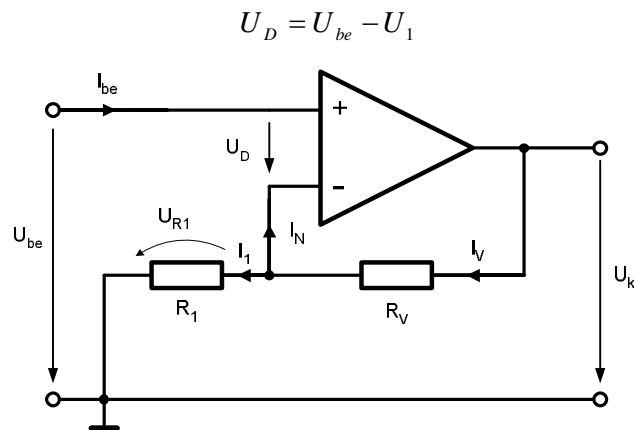


3. Alapkapcsolások műveleti erősítőkkel

Röviden tekintsük át az integrált műveleti erősítőkkel kivitelezett alapkapcsolásokat. Az áttekinthetőség érdekében a kapcsolások paramétereinek leírását tartalmazó összefüggések levezetése általában ideális műveleti erősítők alkalmazását feltételezi. Hasonló okokból a tápfeszültségek csatlakozó pontjai, valamint a kompenzáló illetve offsetkiegyenlítő áramkörök csatlakozási pontjai sem szerepelnek az ábrákon. Legyen a gyakorlati felhasználó feladata, hogy a segédáramkörök jellegét és az elemek értékét az áramköri sajátosságoknak megfelelően meghatározza.

3.1 Nem invertáló erősítő alapkapcsolás

A nem invertáló erősítő alapkapcsolása a 3.1. ábrán látható. A bemeneti jel (U_{be}) ebben az esetben a nem invertáló bemenetre van kapcsolva és fázisfordítás nélkül felerősítve jelentkezik a kimeneten. Megfigyelhető, hogy a műveleti erősítő negatív visszacsatolással van ellátva, amelyet az R_1 , R_2 ellenállásokból álló osztó alkot. A műveleti erősítő bemenetén fellépő U_D differenciális feszültség:



3.1 ábra Nem invertáló erősítő

Ha A_{u0} a műveleti erősítő visszacsatolt és nyílthurkú erősítése,

$$A_{u0} = \frac{U_{ki}}{U_D}$$

a kapcsolás feszültségerősítése pedig a visszacsatolt erősítést képviseli:

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}}$$

Kirchhoff törvényeinek felhasználásával kapjuk a következő összefüggéseket:

$$U_{ki} = A_{u0} \cdot U_D = A_{u0} \cdot (U_{be} - U_1) = \left(U_{be} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{ki} \right)$$

A visszacsatolt erősítés, ha az invertáló bemeneten folyó áram nulla ($I_N = 0$):

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \left(1 + \frac{R_v}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{u0}} \cdot \left(1 + \frac{R_v}{R_1} \right)}$$

Felhasználva az összefüggésben az $A_{uv} \rightarrow \infty$ feltételt, a visszacsatolt feszültségerősítésre a következő egyszerű összefüggést kapjuk:

$$A_{uv} = 1 + \frac{R_v}{R_1}$$

Az erősítés pozitív előjele azt mutatja, hogy az áramkör a felerősített jel fázisát nem fordítja meg. Mivel értékét csak a visszacsatoló hálózatban levő ellenállások határozzák meg, ez a tény tükrözi az áramkör előnyös tulajdonságait, amelyet a műveleti erősítő negatív visszacsatolásával valósíthatunk meg.

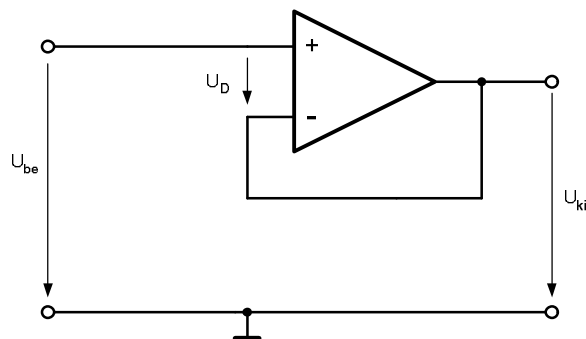
Az áramkör egy másik fontos paramétere az R_{be} bemeneti ellenállása. Ideális műveleti erősítő esetén a nem invertáló erősítő áramkör bemeneti ellenállása:

$$R_{be} = \frac{U_{be}}{I_{be}} = \infty$$

A negatív visszacsatolás következtében a kimeneti ellenállás (R_{kiv}) olyan mértékben csökken, mint a visszacsatolt erősítés (A_{uv}) a nyílthurkúhoz (A_{u0}) képest:

$$R_{kiv} = R_{ki} \cdot \frac{A_{uv}}{A_{u0}}$$

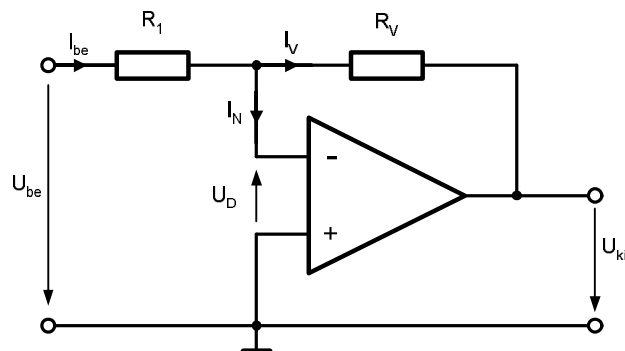
Egy különleges nem invertáló erősítő kapcsolás a feszültségkövető (3.2 ábra.). Ez gyakorlatilag egy olyan nem invertáló erősítő, amelyben $R_2 = 0$ és $R_1 = \infty$. Ennek megfelelően $A_{uv} = 1$, vagyis a kimeneti jel reprodukálja a bemeneti jelet. Előnye ennek a kapcsolásnak, hogy a bemeneti jelet magas impedancián fogadja és (erősítés nélkül), alacsony impedancián áll rendelkezésre a kimeneten.



3.2 ábra Feszültségkövető

3.2 Invertáló erősítő alapkapsolás

Az egyik legerjedtebb műveleti erősítővel kivitelezett áramkör az invertáló (fázisfordító) erősítő kapcsolás. Elnevezése onnan származik, hogy az U_{be} , bemeneti jelet az invertáló bemenetre kapcsoljuk és a kimeneten egy olyan felerősített U_{ki} feszültség jelenik meg, amelynek fázishelyzete ellentétes a bemeneti feszültség fázisával. Villamos kapcsolási rajza a 3.3 ábrán látható.



3.3 ábra Invertáló erősítő

Kirchhoff csomóponti törvényének felhasználásával következnek:

$$I_N = I_{be} - I_v = \frac{U_{be} + U_D}{R_1} - \frac{U_{ki} + U_D}{R_v}$$

Ideális műveleti erősítőt feltételezve, $U_D = 0$ és $I_N = 0$, következnek:

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = -\frac{R_v}{R_1}$$

Láthatjuk, hogy a visszacsatolt műveleti erősítő erősítését (A_{uv}), ha A_{u0} nagyon nagy, csak az alkalmazott ellenállások határozzák meg. A kapcsolat bemeneti ellenállása:

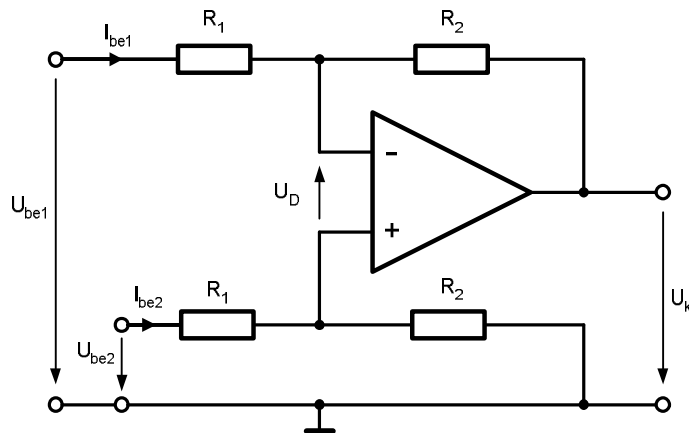
$$R_{be} = \frac{U_{be}}{I_{be}} = \frac{R_1 \cdot U_{be}}{U_{be} + U_D}, \text{ ha } U_D = 0, \text{ következnek: } R_{be} = R_1$$

Az erősítő kimeneti ellenállásának értékét a negatív visszacsatolás csökkenti:

$$R_{kiv} = R_{ki} \cdot \frac{A_{uv}}{A_{u0}}$$

3.3 Különbégképző áramkör

A 3.4 ábrán látható kapcsolat egy különbségképző áramkörnek tekinthető, mivel kimeneti feszültsége egyenesen arányos a bemenetekre kapcsolt feszültségek különbségével. A visszacsatolt erősítés kiszámítása céljából meghatározzuk a műveleti erősítő két bemenetének U_D potenciálkülönbségét leíró összefüggést.



3.4 ábra Különbégképző áramkör

Az összefüggés megállapításánál feltételezzük, hogy a műveleti erősítő bemeneti áramai nullának tekinthetők.

$$U_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{be2} - U_{be1} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (U_{ki} - U_{be1})$$

Ideális esetben $U_D = 0$, következnek:

$$R_1 U_{ki} = R_2 \cdot (U_{be2} - U_{be1})$$

A kapcsolat feszültségerősítése:

$$A_{uv} = \frac{U_{ki}}{U_{be2} - U_{be1}} = \frac{R_2}{R_1}$$

A különbségképző áramkörök nagyon jól alkalmazhatók két nagy értékű feszültség közötti kicsi különbség erősítésére (például egy mérőhíd kimenetén fellépő feszültség erősítésére).

3.4 Feszültségösszegező áramkör

A 8.23. ábrán látható kapcsolás kimeneti feszültsége egyenesen arányos a (tetszőleges számú) bemenetein fellépő feszültségek algebrai összegével. A kapcsolás működését egy két bemenetű feszültségösszegezőn vizsgáljuk a következőkben. Mivel az erősítő invertáló alapkapcsolásban működik, a kimeneti jel fázisa ellentétes a bemeneteken fellépő feszültségek fázisával. Az áramkör bemenete látszólagos földpontnak tekinthető:

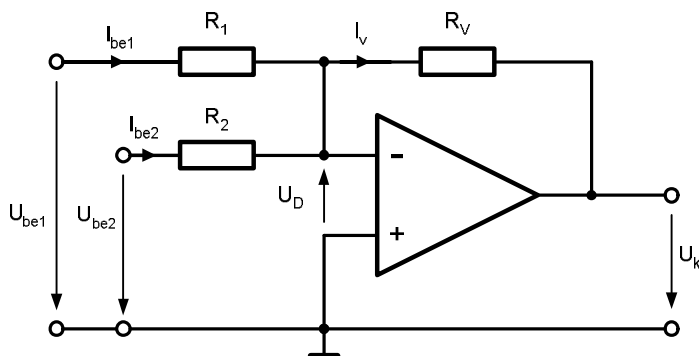
$$I_v = I_1 + I_2 \quad , \text{következik:} \quad -\frac{U_{ki}}{R_v} = \frac{U_{be1}}{R_1} + \frac{U_{BE2}}{r_2}$$

A bemeneti ellenállások értékét azonosnak választva ($R_1 = R_2 = R$), a kimeneti feszültség összefüggése a következő:

$$U_{ki} = -\frac{R_v}{R} \cdot (U_{be1} + U_{be2}) = A_{vu} \cdot (U_{be1} + U_{be2})$$

Tehát a kimeneti feszültség egyenesen arányos, a bemenetein fellépő feszültségek összegével. Abban az esetben ha a bemenetre n számú feszültséget kapcsolunk azonos R bemeneti ellenállások alkalmazásával, a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = -\frac{R_v}{R} \cdot (U_{be1} + U_{be2} + \dots + U_{ben}) = A_{vu} \cdot \sum_{k=1}^n U_{bek}$$



3.5 ábra Feszültségösszegező áramkör

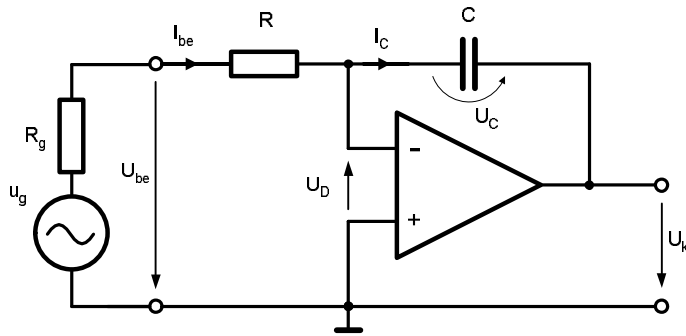
A feszültségösszegező áramkör felhasználása igen sokféle lehet. Alkalmazzák a mérés technikában, az automatikában, szabályozástechnikában és analóg számítógépek részegységként.

3.5 Integráló áramkör

A 3.6 ábrán látható fázisfordító integrátor az invertáló erősítőtől abban különbözik, hogy a visszacsatoló ellenállást a C kondenzátor helyettesíti.

Ha $i_c(t)$ a kondenzátoron folyó áram erőssége és kezdeti időpillanatban a kondenzátort töltés nélkülinek tekintjük, akkor egy t időpillanatban a kondenzátor kapcsain fellépő feszültség:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt$$



3.6 ábra Integráló áramkör elvi kapcsolása

Mivel a műveleti erősítőt ideálisnak tekintjük, bemeneti ellenállása végtelen nagy, bemeneti árama és a bemenetek potenciálkülönbsége nulla. Ennek megfelelően:

$$i_{be}(t) = i_c(t) \quad \text{és} \quad u_D(t) = 0$$

Következik:

$$i_{be}(t) = \frac{u_{be}(t)}{R}$$

A kondenzátoron folyó áram összefüggése:

$$u_c(t) = \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t u_{be}(t) dt$$

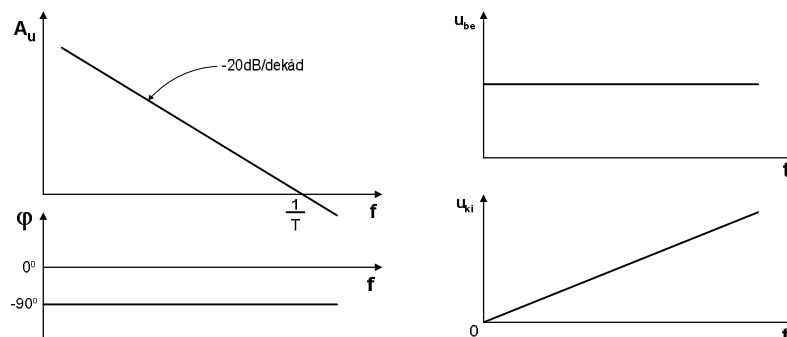
Mivel: $u_D(t) = 0$, következik: $u_{ki}(t) = -u_c(t)$, tehát:

$$u_{ki}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t u_{be}(t) dt$$

Tehát a kimeneti feszültség egyenesen arányos a bemeneti feszültség idő szerinti integráljával. Az ideális integrátor átviteli függvénye, az invertáló kapcsolás erősítését meghatározó képlet felhasználásával egyszerűen meghatározható:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C \cdot R} = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C \cdot R} = -\frac{1}{s \cdot T}$$

Az áramkör amplitúdó- és fázis karakterisztikáját a 3.7 ábra szemlélteti:



3.7 ábra Ideális integrátor karakterisztikái

Ha az integráló áramkör bemenetére egy négyszög-impulzust vezetünk (3.6 ábra), nulla kezdeti feltételek mellett, a kimeneten egy lineárisan változó feszültséget kapunk:

$$u_{ki}(t) = -\frac{u_{be}}{R \cdot C} \cdot t$$

Tehát ebben az esetben a kimeneti feszültség az idővel arányosan nő. Ezen tulajdonsága miatt a kapcsolás háromszög-, vagy fűrészjel előállítására alkalmas.

Ha a bemeneti feszültség időben cosinusfüggvény szerint változik, $u_{be} = U_{be} \cos \omega t$, akkor a kimeneti feszültség időfüggvénye:

$$u_{ki}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t U_{be} \cdot \cos \omega \cdot t dt + U_{ki0}$$

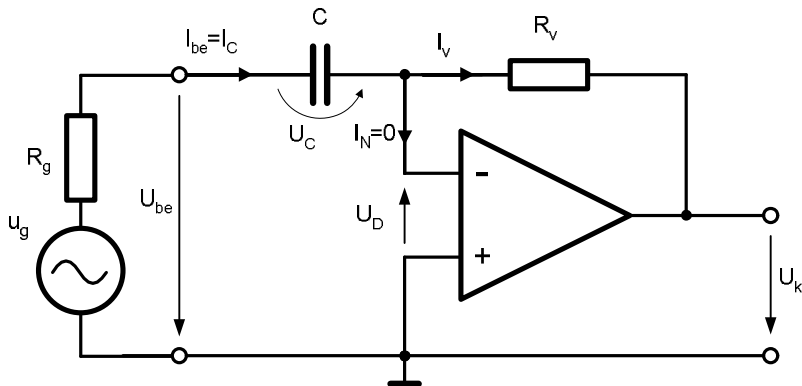
tehát:

$$u_{ki}(t) = -\frac{U_{be}}{R \cdot C \cdot \omega} \cdot \sin \omega \cdot t + U_{ki0}$$

Az összefüggés azt mutatja, hogy a kimeneti jel fázistolása $\pi/2$ nagyságú a bemeneti jelhez viszonyítva (a kimeneti jel 90° -ot siet a bemeneti jelhez viszonyítva).

3.6 Differenciáló áramkör

A 3.8 ábrán látható áramkört differenciáló áramkörnek nevezik, mivel a kimeneti feszültség egyenesen arányos a bemeneti feszültség idő szerinti deriváltjával. Megfigyelhető, hogy a kapcsolás egy olyan invertáló erősítő kapcsolásnak felel meg, amelyben a bemeneti ellenállást egy C kondenzátor helyettesít.



3.8 ábra Differenciáló áramkör elvi kapcsolása

Az áramkör átviteli függvénye meghatározható, ha az *invertáló bemenetre* alkalmazzuk Kirchhoff csomóponti törvényét ($i_{be} = i_c$):

$$i_v + i_c = i_N = 0$$

A kondenzátoron folyó áram időfüggvénye:

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt} = C \cdot \frac{d(u_{be} + u_D)}{dt}, \quad \text{mivel:} \quad i_v = \frac{u_{ki} + u_D}{R_v}$$

következik:

$$C \cdot \frac{d}{dt}(u_{be} + u_D) + \frac{u_{ki} + u_D}{R_v} = 0$$

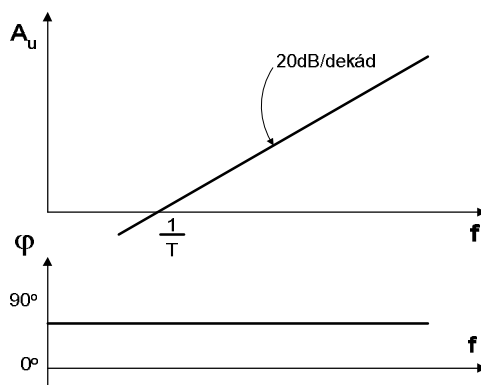
Ha $u_D = 0$, megkapjuk a bemeneti és kimeneti feszültség közötti kapcsolatot leíró függvényt:

$$u_{ki} = -R_v \cdot C \cdot \frac{du_{be}}{dt}$$

A kapott összefüggés azt bizonyítja, hogy az ideális differenciáló áramkör a bemeneti feszültség idő szerinti deriváltjával arányos kimeneti feszültséget állít elő. Átviteli függvénye az invertáló kapcsolás erősítését meghatározó képlet felhasználásával a következő:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -j \cdot \omega \cdot C \cdot R_v = -s \cdot T$$

Az ideális differenciáló áramkör amplitúdó- és fázis karakterisztikáját a 3.9 ábra szemlélteti.



3.9 ábra Differenciáló áramkör karakterisztikája

Abban az esetben, ha a bemeneti feszültség időfüggvénye szinuszos jellegű,

$$u_{be}(t) = U_{be} \cdot \sin \omega \cdot t$$

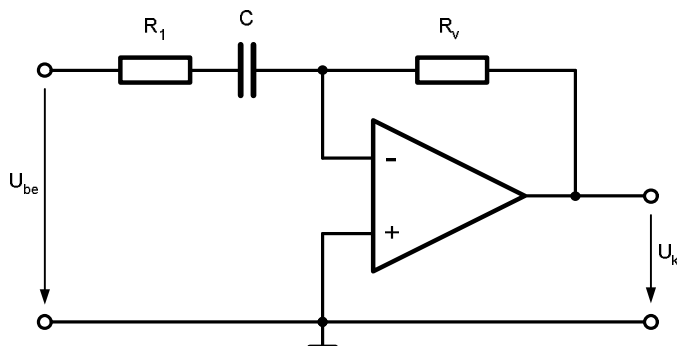
A differenciáló áramkör kimeneti feszültségének váltakozó áramú komplex összetevője a következő lesz:

$$u_{ki}(t) = -\omega \cdot C \cdot R_v \cdot U_{be} \cdot \cos \omega \cdot t$$

Az összefüggés azt mutatja, hogy a kimeneti jel fázistolása $\pi/2$ nagyságú, a bemeneti jelhez viszonyítva (a kimeneti jel késése 90° , a bemeneti jelhez viszonyítva).

A 3.9 ábrát tanulmányozva megállapítható, hogy a differenciáló áramkör erősítése a frekvencia növekedésével nő, határértékként végtelen felé tart. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy a kimeneten egy magas frekvenciás zajösszetevő jelentkezik, amelynek jelszintje gyakran nagyobb mint a hasznos jelé. Az áramkör működése ennek következtében nem tekinthető stabilnak.

Az említett hátrányok megszüntetése érdekében a kondenzátorral sorosan beiktatnak egy ellenállást és így a deriváló áramkör felépítése a 3.10 ábrán láthatóan módosul. Az áramkör így kiegészítve stabilan működik. Mivel az áramkör invertáló erősítőként (R_v/R_1 erősítéssel) működik, magas frekvencián az erősítés értéke állandó.



3.10 ábra Differenciáló áramkör gyakorlati kapcsolása

3.7 Logaritmikuss és exponenciális erősítők

A logaritmáló áramkör kimeneti feszültsége arányos a bemeneti feszültség logaritmusával. A legegyszerűbb logaritmáló áramkör a 3.11 ábrán látható, diódával visszacsatolt műveleti erősítő. Emlékezzünk a dióda karakterisztikára:

$$I_D = I_S \cdot \exp \frac{U_{AK}}{m \cdot U_T}$$

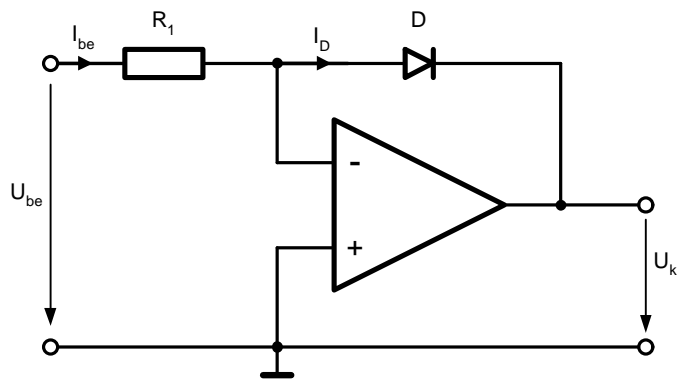
ahol I_S a visszáram, U_T a hőfeszültség, m a korrekciós együttható. Innen következik:

$$U_{AK} = m \cdot U_T \cdot \ln \frac{I_D}{I_S}$$

tehát logaritmus függvény.

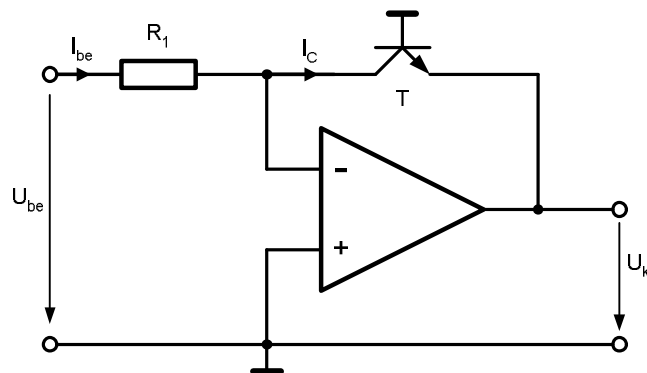
A műveleti erősítő kapcsolás az U_{be} bemeneti feszültséget $I = \frac{U_{be}}{R_1}$ árammá alakítja, a kimeneten pedig $U_{ki} = -U_{AK}$ feszültség jelenik meg. Tehát:

$$U_{ki} = -m \cdot U_T \cdot \ln \frac{U_{be}}{I_S \cdot R_1}$$



3.11 ábra Diódás logaritmáló kapcsolás

A használható tartományt két tényező korlátozza. Az egyik a dióda soros ellenállása, a másik az áramfüggő m együttható. Ezért kielégítő pontosság csak egy-két dekádon belül érhető el. Az m együttható kedvezőtlen hatása elhanyagolható, ha a dióda helyett tranzisztort használunk a 3.12 ábrán látható módon.



3.12 ábra Tranzisztoros logaritmáló kapcsolás

Mivel $I_C = I_S \exp \frac{U_{BE}}{U_T}$, a tranzisztoros logaritmáló kimeneti feszültsége:

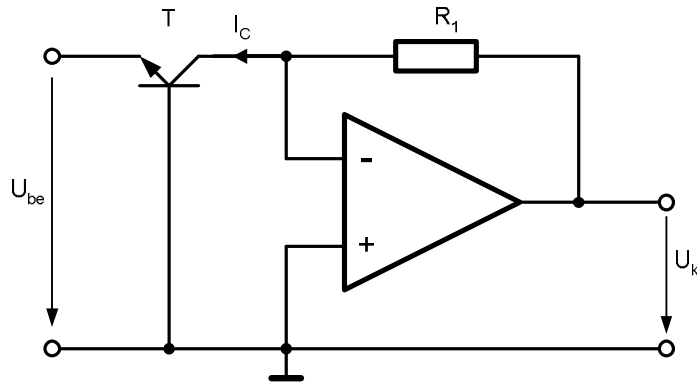
$$U_{ki} = -U_{BE} = -U_T \cdot \ln \frac{U_{BE}}{I_S \cdot R_1}$$

A 3.13 ábra egy exponenciális függvénygenerátor kapcsolását szemlélteti. Ha a bemenetre negatív feszültséget adunk ($U_{be} > 0$), akkor a tranzisztoron

$$I_C = I_S \exp \frac{U_{BE}}{U_T}$$

áram folyik és a kimenet feszültség értéke:

$$U_{ki} = I_C \cdot R_1 = I_S \cdot R_1 \cdot \exp \frac{U_{BE}}{U_T}$$



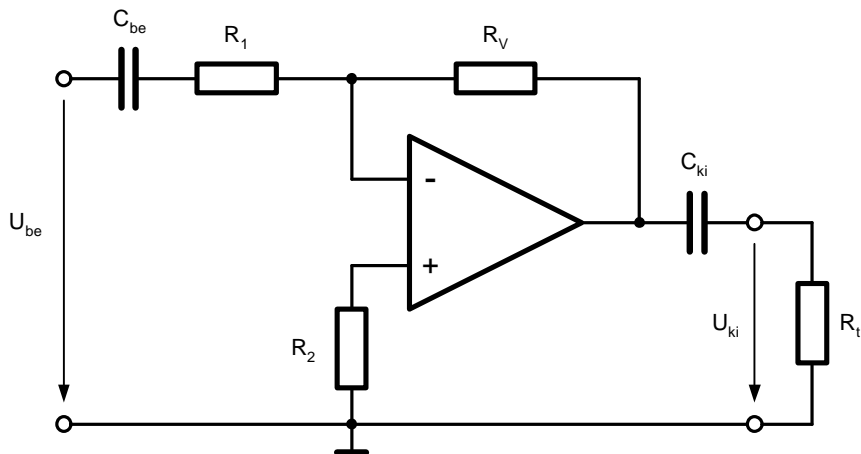
3.13 ábra Exponenciális függvénygenerátor kapcsolás

3.8 Váltakozó feszültségű erősítők

A műveleti erősítő invertáló és nem invertáló alkapcsolásai módosítás nélkül alkalmasak váltakozó feszültségek erősítésére. Abban az esetben, amikor szükség van a kimenet és bemenet egyenfeszültségű leválasztására, ezt legegyszerűbben csatolókondenzátorok alkalmazásával tehetjük. A csatolókondenzátorok kisfrekvenciás erősítéscsökkenést okoznak, ezért az erősítő alsó határfrekvenciáját ezek határozzák meg.

3.8.1 Invertáló alkapcsolás

A 3.14 ábra egy invertáló alkapcsolásban működő változó feszültségű erősítőt szemléltet.



3.14 ábra Váltakozó feszültségű erősítő invertáló alkapcsolásban

A kapcsolás jellemzői a következők:

- Bemeneti ellenállás: $R_{be} = R_1$
- Feszültségerősítés: $A_{uv} = -\frac{R_v}{R_1}$

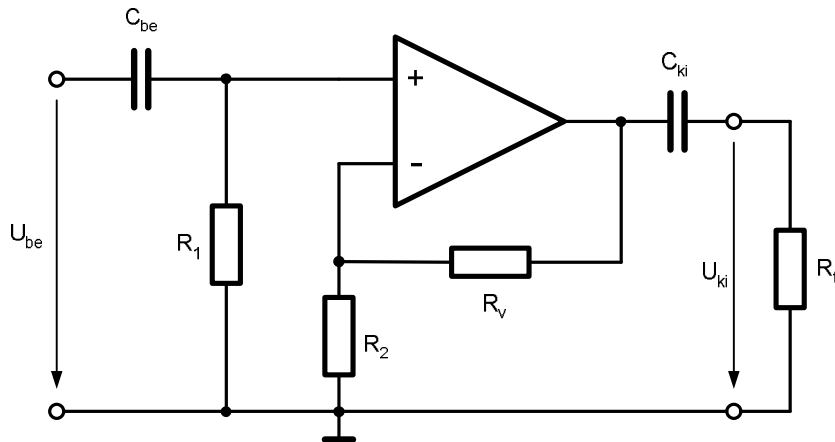
- A bemeneti nyugalmi áramot biztosító ellenállás: $R_2 = R_v$ (mivel az R_1 ellenálláson nem folyik áram a C_{be} csatolókapacitás leválasztó hatása miatt)
- Bemeneti csatolókapacitás: $C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a1} \cdot R_{be}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a1} \cdot R_1}$
- Kimeneti csatolókapacitás: $C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a2} \cdot R_t}$

Az erősítő alsó határfrekvenciája, a két alsó határfrekvencia (f_{a1} és f_{a2}) közül, a kedvezőtlenebb érték (a nagyobbik) lesz.

3.8.2 Nem invertáló alapkapcsolás

A 3.15 ábra egy nem invertáló alapkapcsolásban működő változó feszültségű erősítőt szemléltet. A kapcsolás jellemzői a következők:

- Bemeneti ellenállás: $R_{be} = R_1$
- Feszültségerősítés: $A_{uv} = 1 + \frac{R_v}{R_2}$
- Bemeneti csatolókapacitás: $C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a1} \cdot R_{be}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a1} \cdot R_1}$
- Kimeneti csatolókapacitás: $C_{be} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{a2} \cdot R_t}$



3.15 ábra Változó feszültségű erősítő nem invertáló alapkapcsolásban

3.9 Analóg szorzó áramkörök

A bipoláris tranzisztorok meredeksége arányos a kollektorárammal: $S = \frac{di_c}{du_{BE}} = \frac{I_{C0}}{U_T}$

A kollektoráram megváltozása eszerint arányos a bemeneti feszültségváltozás és a munkaponti kollektoráram szorzatával. Ezt a tulajdonságot a 3.16 ábrán látható differenciálerősítőnél szorzásra használjuk.

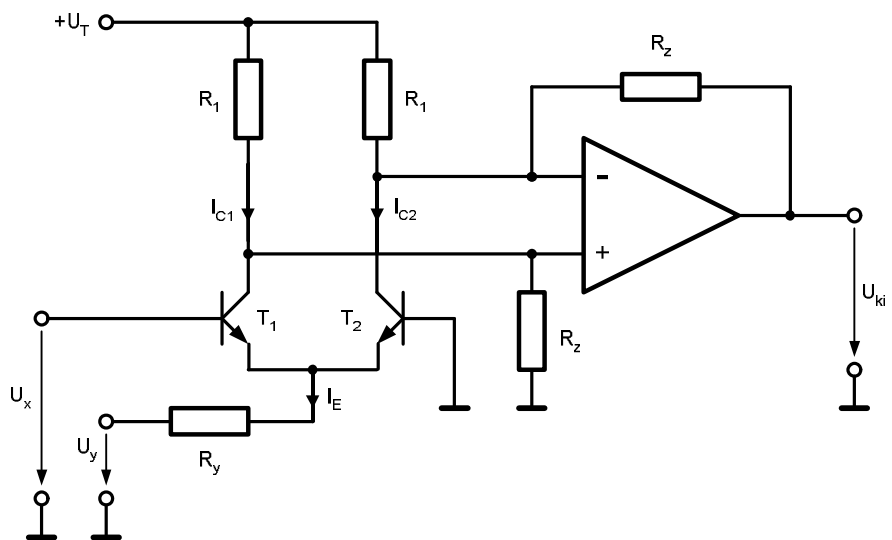
A műveleti erősítő kimeneti feszültsége arányos a kollektoráramok különbségével:

$$u_{ki} = R_z \cdot (i_{c2} - i_{c1})$$

A differenciálerősítő áramviszonyait meghatározva a következő összefüggéshez jutunk:

$$u_{ki} = \frac{R_z}{R_y} \cdot \frac{u_x \cdot u_y}{2 \cdot U_T}$$

A kapcsolás helyes működése miatt feltétel, hogy u_y mindig negatív legyen, miközben u_x pozitív és negatív is lehet. Az ilyen szorzót két síknegyedes szorzónak nevezzük.



3.16 ábra Meredekszsorzó elve