

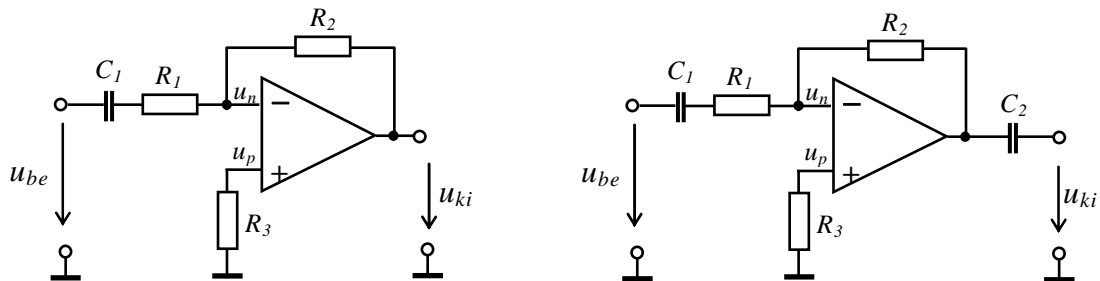
## 6.2. MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL MEGVALÓSÍTOTT VÁLTAKOZÓFESZÜLTÉG ERŐSÍTŐK

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  $C_1$  csatolókondenzátor 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.

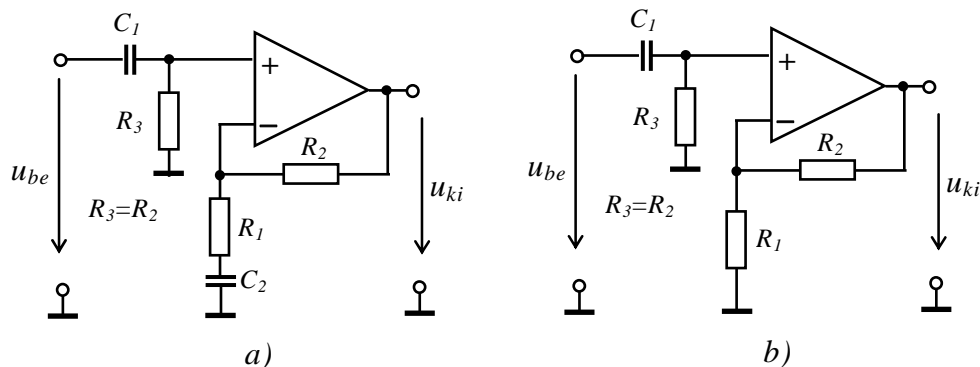
A kapcsolás váltakozófeszültségű erősítése az

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

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.

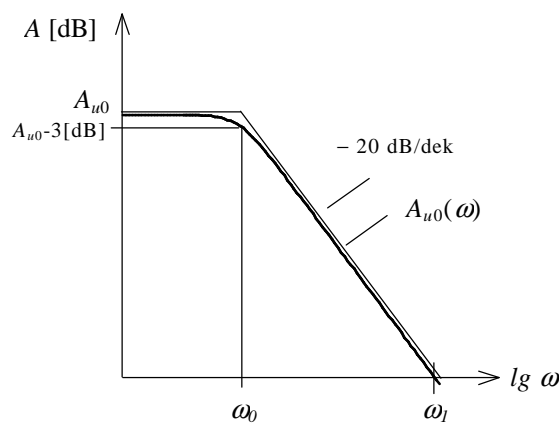
A kapcsolás váltakozófeszültségű erősítése az

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

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. Műveleti erősítő Bode-diagramja.

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

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

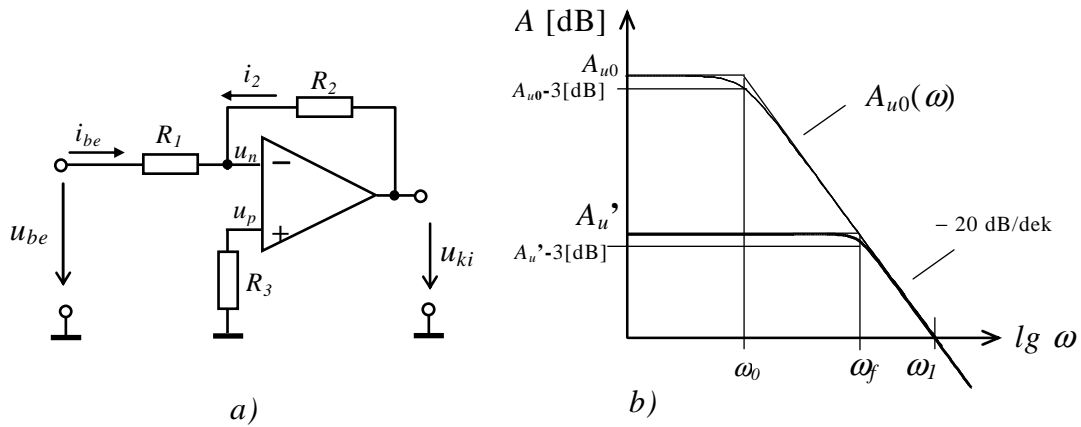
ahol a visszacsatoló hálózat erősítése

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

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. 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:

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

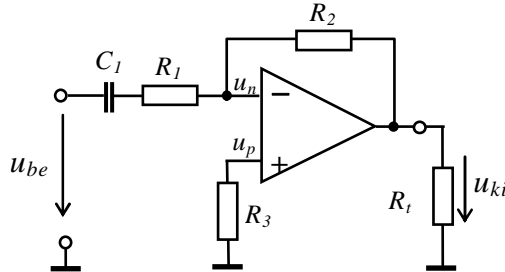
Ebből az összefüggésből meghatározható a felső törésponti frekvencia:

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

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 csatolókonduktzorok 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

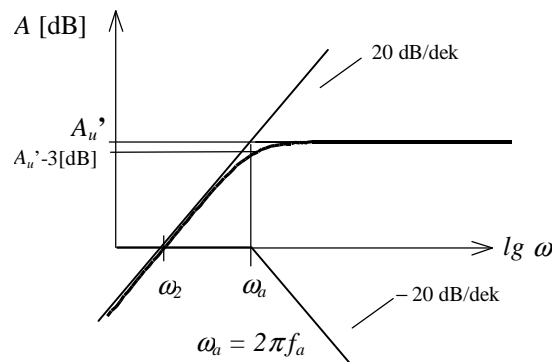
$$A'_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6.51)$$

összefüggéssel határozható meg.

A feszültségerősítés Bode-diagramja a 6.17. ábrán látható. Megállapítható, hogy kapsolás  $f_a$  alsó törésponti frekvenciáját a bemeneti  $C_1$  csatolókonduktzor 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.

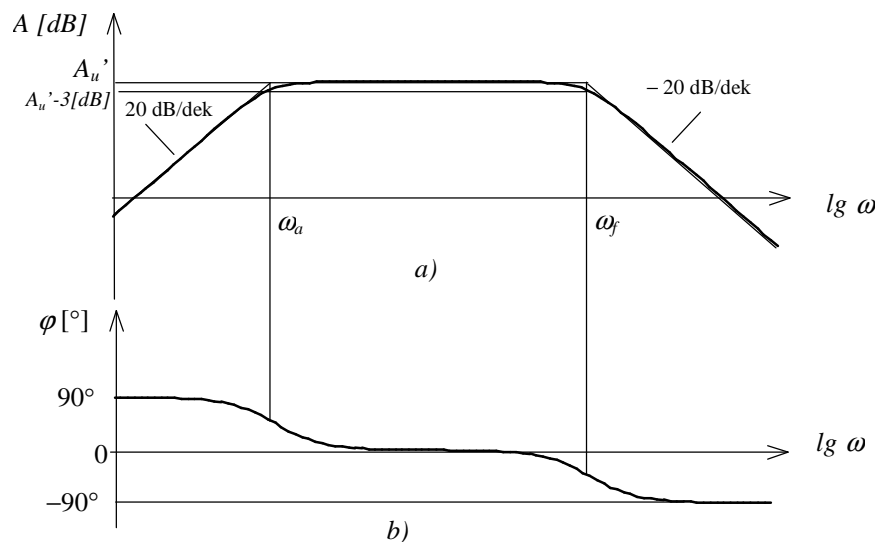


6.17. ábra. Ideális műveleti erősítővel megvalósított, a bemeneten csatolt invertáló AC erősítő Bode-diagramja

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

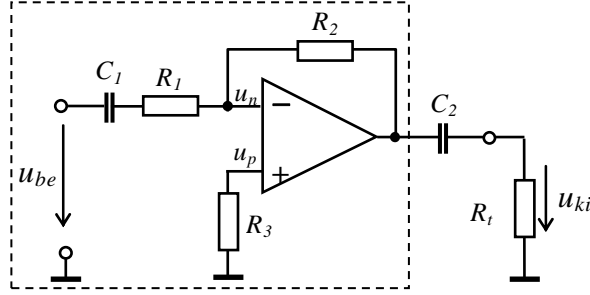
$$f_f = f_0 \frac{A_{u0}}{A_u'} = f_0 (1 + A_{u0}B) = f_0 (1 + H). \quad (6.53)$$

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 frekvenciamenétét a terhelő ellenállás nem befolyásolja, a 6.19. ábrán a kimeneti  $C_2$  csatolókapacitás miatt azonban megváltozik a kapcsolás frekvenciamenete.



6.19. ábra. Bemeneten és 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:

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

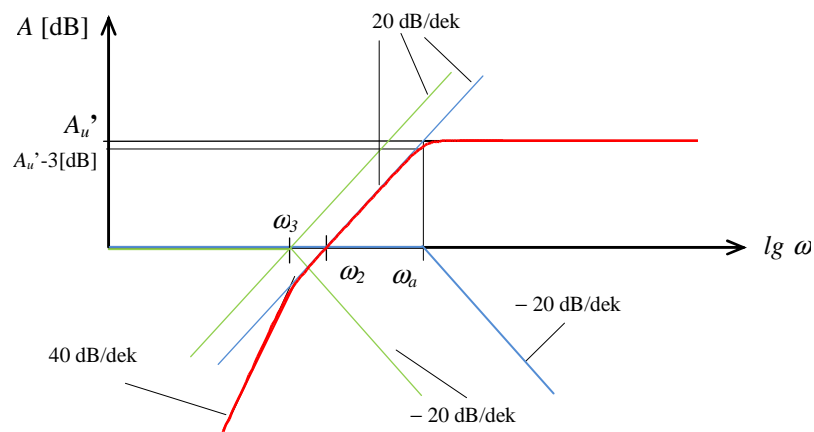
ennek törésponti körfrekvenciája:

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

A kapcsolat eredő feszültségerősítése:

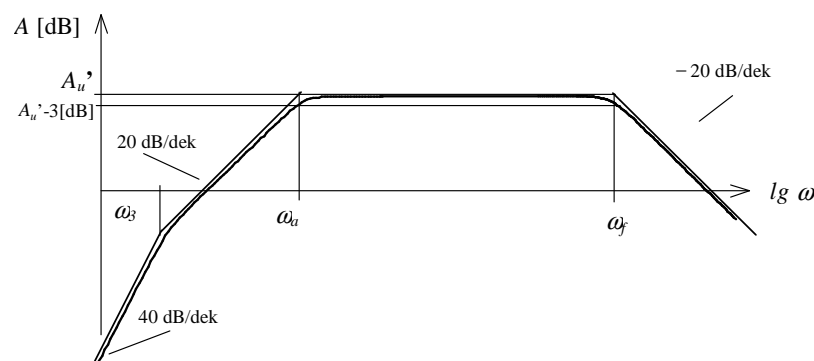
$$A'_u(\omega) = A_{u1}(\omega) \cdot A_{u2}(\omega) = -\frac{j\omega T_2}{(1 + j\omega T_a)} \cdot \frac{j\omega T_3}{(1 + j\omega T_3)}. \quad (6.57)$$

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.

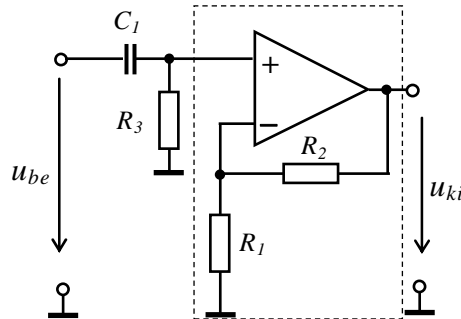


6.21. ábra. Valóságos műveleti erősítővel megvalósított, bemeneten és kimeneten is csatolt invertáló AC erősítő kapcsolás Bode-diagramja.



### 6.3.2. Neminvertáló AC erősítő alapkapsolás frekvenciafüggése

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



6.22. ábra. 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 kapsolás 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 kapsolás 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 kapsolásban a visszacsatoló tag erősítése a

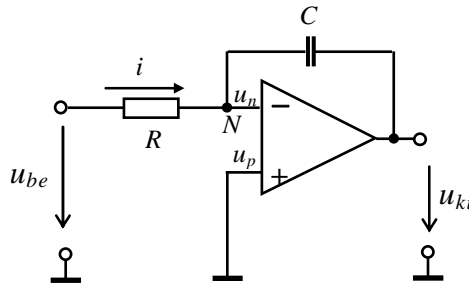
$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.64)$$

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.

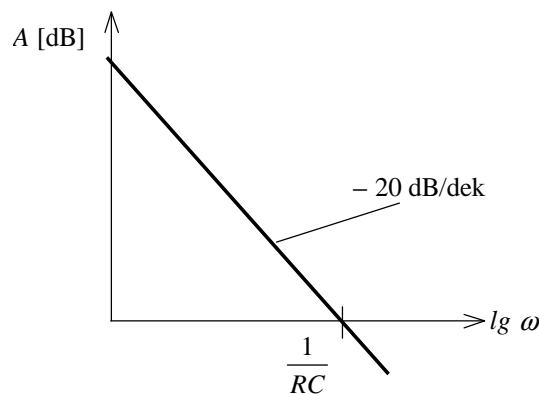
Ideális elemeket feltételezve (ideális, végtelen nagy erősítésű, ofszet nélküli műveleti erősítő, veszteségmentes kondenzátor), szinuszos bemeneti jel esetén a kimeneti feszültség meghatározható az invertáló műveleti erősítő átviteli jellemzője alapján is:

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

A kimeneti feszültség:

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

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

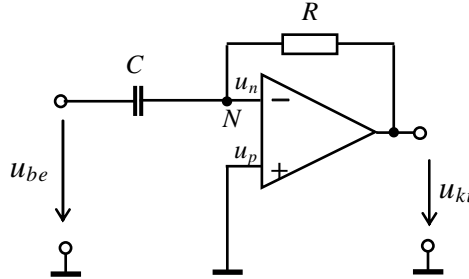


6.24. ábra. Integráló kapcsolás Bode-diagramja.

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

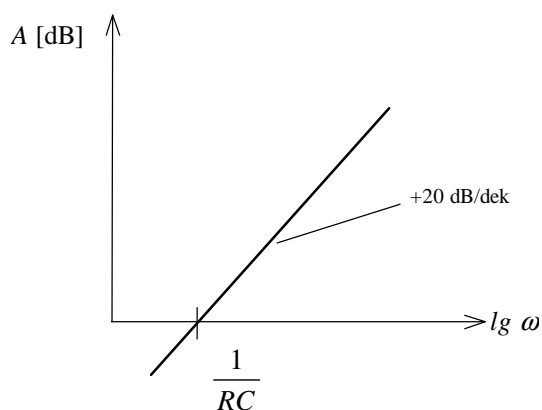
$$u_{ki} = -RC \frac{du_{be}}{dt}, \quad (6.72)$$

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. 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 kapcsolat 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.