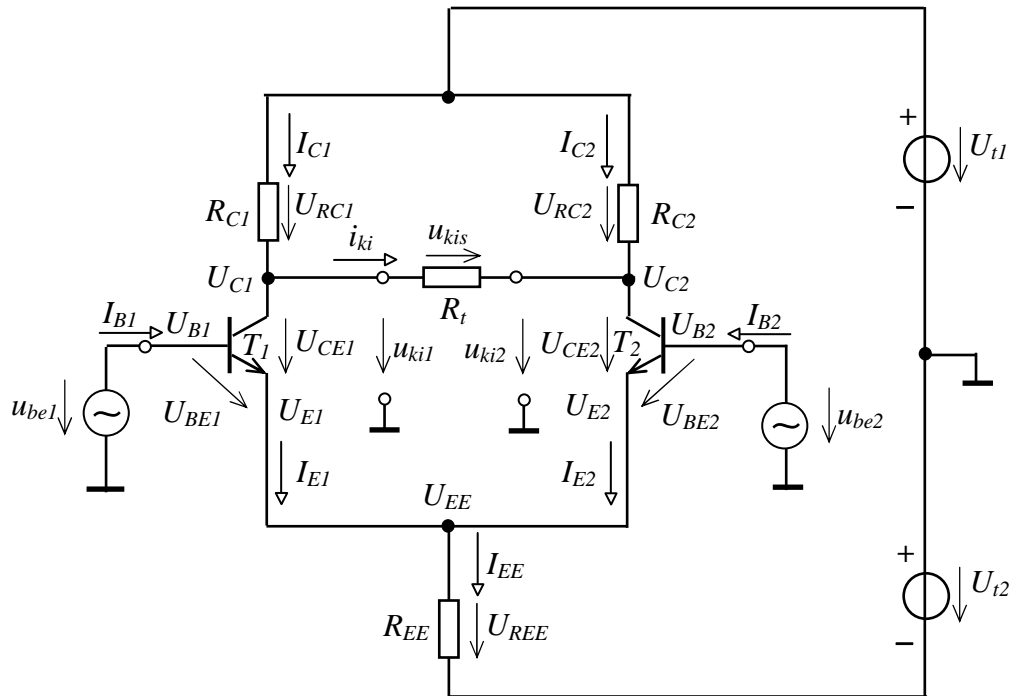


4.7. DIFFERENCIAERŐSÍTŐ

Egyenfeszültségek erősítésére, vagy abban az esetben, ha a hasznos jelet zajfeszültséget tartalmazó környezetben kell erősíteni, szimmetrikus erősítő alkalmazása indokolt. A szimmetrikus erősítő a két bemenetére kapcsolt feszültségek különbségét, a szimmetrikus bemeneti jelet erősíti, míg azt a jelet, amely mindkét bemenetére azonos mértékben hat, azaz a közös jelet nem erősíti, „elnyomja”. A szimmetrikus erősítő általános leírása a 2.2. fejezetben található.



4.27. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás

A szimmetrikus erősítő egyik lehetséges áramköri megvalósítása az 4.27. ábrán látható differenciaerősítő kapcsolás, amely felépítésében is szimmetrikus: két azonos paraméterű tranzisztor, két azonos értékű munkaellenállás és közös emitter ellenállás alkotja. A megfelelő működéshez nincs szükség emitterhidegítő kondenzátorra, és a csatoló kondenzátorok is elhagyhatók, így a kapcsolás egyenfeszültségek erősítésére is alkalmas. Táplálásához általában kettős tápforrás szükséges, amelyek abszolút értéke különböző is lehet.

A vezérlőgenerátorok a bázisok és a föld közé (0 potenciál) kapcsolódnak, az u_{bes} bemeneti szimmetrikus feszültség a vezérlőgenerátorok u_{be1} és u_{be2} feszültségének különbsége:

$$u_{bes} = u_{be1} - u_{be2} . \quad (4.66)$$

A kapcsolásnak két kimeneti pontja van: a két tranzisztor kollektor pontja. A kimeneti feszültséget a két kollektor pont feszültségének különbsége adja:

$$u_{kis} = u_{ki1} - u_{ki2} \quad (4.67)$$

A differenciaerősítő szimmetrikus bemenetű és szimmetrikus kimenetű erősítő.

4.7.1. A differenciaerősítő munkapont beállítása

A szimmetrikus felépítés miatt feltételezhető, hogy a tranzisztorok paraméterei, az alkatrészek értékei pontosan megegyeznek:

- a kollektorellenállások: $R_{C1} = R_{C2}$,
- a tranzisztorok bázis-emitter feszültsége: $U_{BE1} = U_{BE2}$,
- a tranzisztorok bázisárama: $I_{B1} = I_{B2}$,
- a tranzisztorok áramerősítési tényezője: $\beta_1 = \beta_2$,
- az elemek hőfokfüggése, stb.

Mindkét tranzisztor bázisa a vezérlőgenerátorok $R_{g1} = R_{g2} \cong 0$ belső ellenállásán keresztül a tápforrások közös 0 potenciáljára kapcsolódik, így a bázisok munkaponti egyenfeszültsége közel nulla:

$$U_{B1} = U_{B2} = U_B = 0. \quad (4.68)$$

A tranzisztorok emittere a közös emitterellenálláson keresztül a negatív tápforrásra csatlakozik, így a bázis-emitter átmenetekre nyitóirányú feszültség jut. Azonos paraméterű tranzisztorokat feltételezve a munkaponti bázis-emitter feszültségek megegyeznek:

$$U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}. \quad (4.69)$$

A közös emitterpont feszültsége:

$$U_{EE} = U_B - U_{BE} = 0 - U_{BE} = -U_{BE}. \quad (4.70)$$

A közös emitterellenállás feszültsége:

$$U_{REE} = U_{EE} - U_{t2}, \quad (4.71)$$

a közös emitterellenálláson folyó áram:

$$I_{EE} = \frac{U_{EE} - U_{t2}}{R_{EE}}. \quad (4.72)$$

Az egyes tranzisztorok emitterárama a közös emitteráram fele:

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I_{EE}}{2}. \quad (4.73)$$

Mivel az emitteráram általában nagyságrendekkel nagyobb a bázisáramnál, így jó közelítéssel az emitteráram megegyezik a kollektorárammal:

$$I_E \cong I_C. \quad (4.74)$$

A kollektor ellenállások feszültsége:

$$U_{RC1} = U_{RC2} = I_C R_C. \quad (4.75)$$

A kollektorpontok feszültsége azonos kollektorellenállások esetén:

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{t1} - U_{RC}. \quad (4.76)$$

A kimeneti feszültség a kollektorpontok feszültségének különbsége:

$$U_{ki} = U_{C1} - U_{C2} = 0. \quad (4.77)$$

Mivel a szimmetrikus felépítés miatt a kollektorpontok feszültsége megegyezik, így a kimenet munkaponti egyenfeszültsége nulla. A kapcsolás nulla bemeneti feszültségéhez nulla kimeneti feszültség tartozik.

4.7.2. A differenciaerősítő működése szimmetrikus vezérlés esetén

A differenciaerősítő szimmetrikus vezérlése esetén a két bemenetre kapcsolódó vezérlőgenerátorok bemeneti feszültsége a 0 potenciálhoz képest azonos amplitúdójú, azonos frekvenciájú, de ellentétes fázishelyzetű szinuszos feszültség:

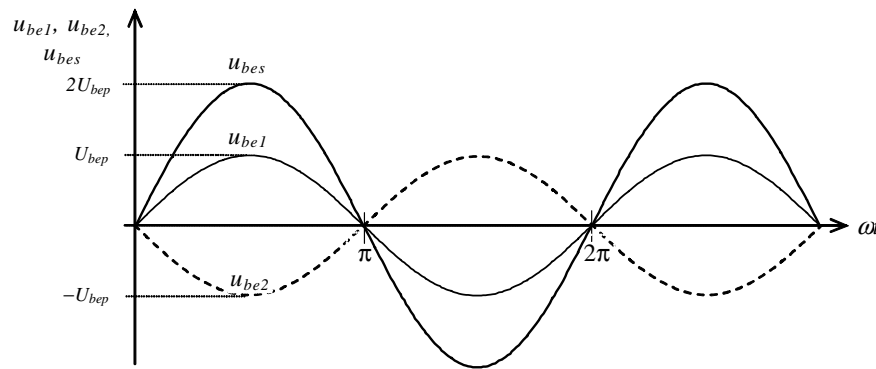
$$\begin{aligned} u_{be1} &= -u_{be2} \\ u_{be1} &= U_{bep} \sin \omega t & u_{be2} &= U_{bep} \sin(\omega t - \pi) \end{aligned} \quad (4.78)$$

ahol U_{bep} a szinuszos feszültségek csúcsértéke.

Az u_{bes} szimmetrikus bemeneti feszültség a két generátor bemeneti feszültségének különbsége:

$$u_{bes} = u_{be1} - u_{be2}. \quad (4.79)$$

A bemeneti feszültségek időfüggvényei láthatók az 5.2. ábrán.



4.28. ábra. A bemeneti feszültségek időfüggvényei szimmetrikus vezérlés esetén.

A kapcsolatban a bemeneti feszültségek változásának hatására végbemenő folyamatokat követve meghatározható a kimeneti feszültség változása, ahol a változás mindig a munkapont kis jelszintű környezetében értendő.

Ha például az u_{be1} bemeneti feszültség növekszik, megnő a T_1 tranzisztor u_{BE1} bázis-emitter feszültsége a munkaponti értékhez képest, megnő az i_{B1} bázisáram. Ennek következtében az emitteráram az $i_{E1} \cong (1 + \beta) i_{B1}$ összefüggés szerint ΔI_{E1} értékkel nagyobb lesz.

Ugyanakkor az u_{be2} bemeneti feszültség azonos mértékben csökken, csökken a T_2 tranzisztor u_{BE2} bázis-emitter feszültsége a munkaponti értékhez képest, ebből következően csökken az i_{B2} bázisáram, és csökken az emitteráram is ΔI_{E2} értékkel.

A szimmetria miatt a két emitteráram azonos mértékben változik: a T_1 tranzisztor emitterárama pontosan annyit növekszik, mint amennyit csökken a T_2 tranzisztoré:

$$\Delta I_{E1} = -\Delta I_{E2}. \quad (4.80)$$

Így a közös emitterellenállás árama nem változik a munkaponti értékhez képest, és változatlan a közös emitter feszültsége is:

$$\Delta I_{EE} = 0, \quad U_{EE} = \text{állandó}. \quad (4.81)$$

Mivel jó közelítéssel a tranzisztor emitterárama megegyezik a kollektor-áramával: $i_E \cong i_C$, a T_1 tranzisztor kollektorárama annyival lesz nagyobb, mint amennyivel a T_2 tranzisztoré csökken. Az R_{C1} kollektorellenállás feszültsége a

$$\Delta U_{RC1} = \Delta I_{C1} R_{C1}. \quad (4.82)$$

összefüggés szerint annyival növekszik, mint amennyivel az R_{C2} ellenállásé csökken:

$$\Delta U_{RC2} = \Delta I_{C2} R_{C2}, \quad (4.83)$$

Az 1-es kimeneti pont feszültsége a

$$\Delta U_{ki1} = U_{t1} - \Delta U_{RC1}. \quad (4.84)$$

összefüggés szerint annyival csökken, mint amennyivel a

$$\Delta U_{ki2} = U_{t1} + \Delta U_{RC2}. \quad (4.85)$$

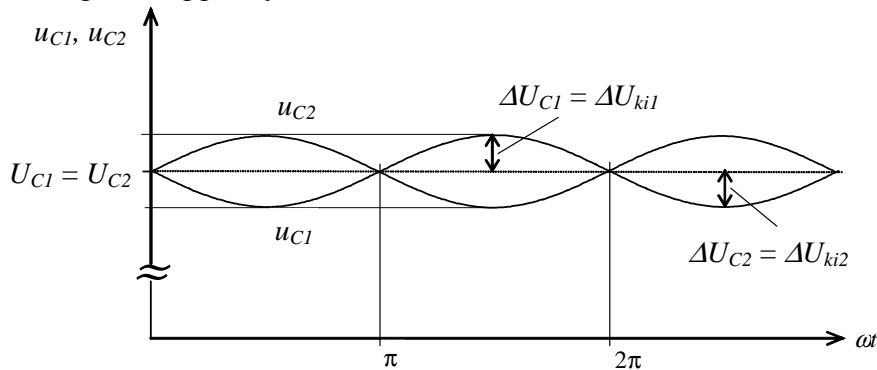
összefüggés szerint a 2-es kimenet feszültsége nő.

A ΔU_{kis} szimmetrikus kimeneti feszültség változása a két kimeneti feszültség változásának különbsége:

$$\Delta U_{kis} = \Delta U_{ki1} - \Delta U_{ki2} = (U_{t1} - \Delta U_{RC1}) - (U_{t1} + \Delta U_{RC2}) = -2 \cdot \Delta U_{RC}, \quad (4.86)$$

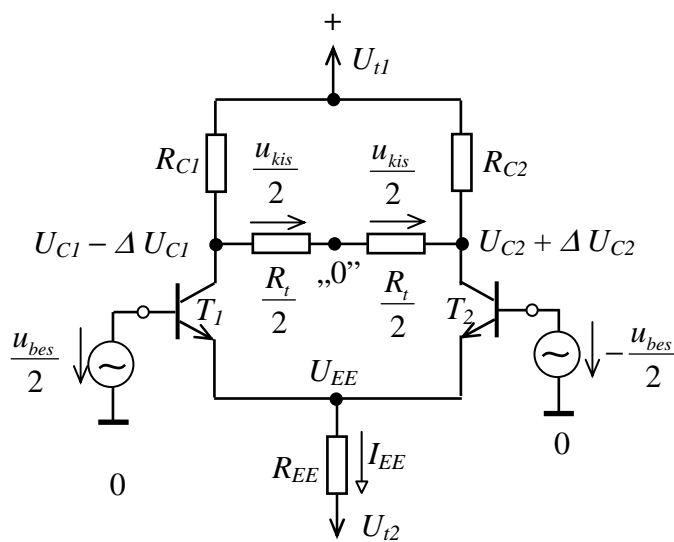
mivel $\Delta U_{RC1} = \Delta U_{RC2} = \Delta U_{RC}$.

A bemeneti feszültségek ellentétes változását feltételezve, a T_1 tranzisztor annyival jobban lezár, mint amennyivel a T_2 tranzisztor kinyit, az u_{ki1} kimeneti feszültség annyival lesz nagyobb, mint amennyivel kisebb az u_{ki2} , a kimeneti szimmetrikus feszültség változása: $\Delta U_{kis} = 2\Delta U_{RC}$, ellentétes irányú az előző változáshoz képest. Belátható, hogy a bemeneti jelek szinuszos változása ellentétes fázishelyzetű szinuszos kimeneti jelváltozást hoz létre. A kollektorpontok, egyben a kimeneti pontok feszültség-időfüggvényei láthatók a 4.29. ábrán.

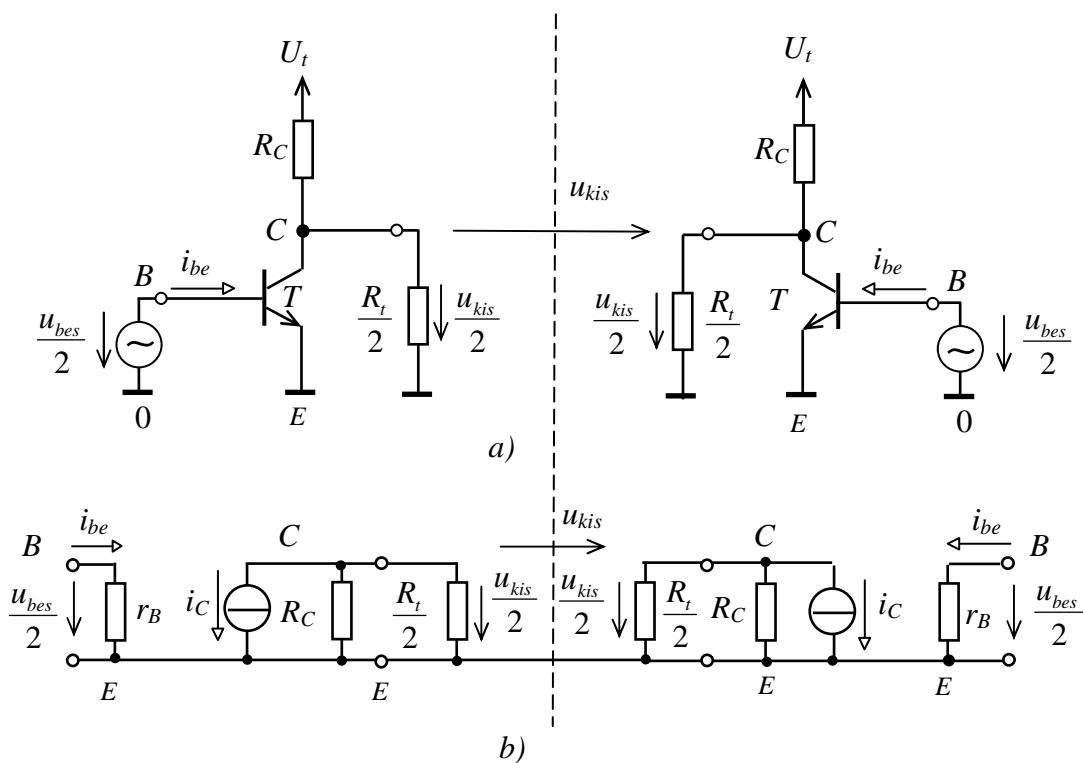


4.29. ábra. A differenciaerősítő kollektor pontjainak feszültség-időfüggvényei szimmetrikus vezérlés esetén.

Mivel a közös emitterpont U_{EE} feszültsége a vezérlés hatására nem változik (4.30.), tehát váltakozás szempontjából földpont. Hasonlóképpen a szimmetria miatt a terhelés ellenállásának „középpontja” sem változik (5.4. ábra), ezért a szimmetrikus vezérlés szempontjából a kapcsolás szétbontható két olyan közös emitterű (FE) kapcsolásra, amelynek az emittere a földre kapcsolódik, a bemeneti feszültsége a szimmetrikus bemeneti feszültség fele, a terhelése pedig a differenciaerősítő terhelő ellenállásának a fele (4.31a) ábra).



4.30. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás szimmetrikus vezérlés esetén.



4.31. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás a) két közös emitterű kapcsolásra bontva, és b) a kisjelű helyettesítő képek szimmetrikus vezérlés esetén.

A differenciaerősítő feszültségerősítése az

$$A_{uss} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}}. \quad (4.87)$$

összefüggés szerint határozható meg.

A kettébontott kapcsolás egyik felének feszültségerősítés:

$$A_{us1} = \frac{\frac{u_{kis}}{2}}{\frac{u_{bes}}{2}} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}} = A_{uss}. \quad (4.88)$$

Belátható, hogy az egyik „fél” kapcsolásra meghatározott feszültségerősítés megadja a differenciaerősítő feszültségerősítését szimmetrikus vezérlésre.

A közös emitterű erősítő jellemzőinek alapján a differenciaerősítő szimmetrikus feszültségerősítése:

$$A_{uss} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}} = -g_m \left(R_C \times \frac{R_t}{2} \right), \quad (4.89)$$

ahol g_m a tranzisztor meredeksége:

$$g_m = \frac{di_C}{du_{BE}} \cong \frac{I_{CM}}{U_T}. \quad (4.90)$$

A meredekség értéke kis áramok tartományában jó közelítéssel számítható az I_{CM} munkaponti kollektoráram és az U_T termikus feszültség (szobahőmérsékleten $U_T = 26$ mV) hányadosaként. A kapcsolás kisjelű helyettesítőképe szimmetrikus vezérlésre az 4.31b) ábrán látható.

A differenciaerősítő szimmetrikus bemeneti ellenállása az egyik közös emitterű kapcsolás bemeneti ellenállásának a kétszerese, mivel a változások szempontjából a bemeneti ellenállások sorba kapcsolódnak (4.31b) ábra):

$$R_{bes} = \frac{u_{bes}}{i_{bes}} = \frac{\frac{u_{bes}}{2}}{\frac{i_{be}}{2}} \cdot 2 = 2 \cdot r_B \cong 2 \cdot \beta \cdot r_E, \quad (4.91)$$

ahol β a közös emitterű kisjelű áramerősítési tényező,

r_E dinamikus ellenállás, a tranzisztor g_m meredekségének reciproka.

A szimmetrikus kimeneti ellenállás az egyik közös emitterű erősítő kimeneti ellenállásának a kétszerese:

$$R_{kis} \cong 2 \cdot R_C, \quad (4.92)$$

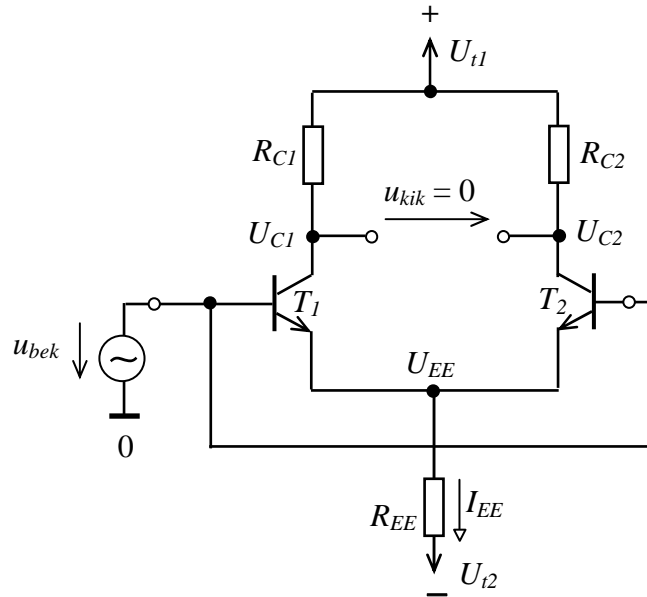
mivel a kollektorellenállások váltakozó áramúlag sorba kapcsolódnak (4.31b) ábra).

4.7.3. A differenciaerősítő működése közös vezérlés esetén

A differenciaerősítő bemeneteire közös vezérlés esetén azonos amplitúdójú, azonos frekvenciájú és azonos fázishelyzetű szinuszos feszültség kapcsolódik:

$$u_{be1} = u_{be2} = u_{bek}. \quad (4.93)$$

A differenciaerősítő kapcsolási rajza közös vezérlés esetén a 4.32. ábrán látható.



4.32. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás közös vezérlés esetén.

Közös vezérlés esetén a kapcsolás teljes szimmetriája miatt a bemenetekre kerülő változás azonos hatást eredményez mindkét tranzisztoron. Azonos mértékben változik a tranzisztorok bázisárama:

$$\Delta I_{B1} = \Delta I_{B2}, \quad (4.94)$$

a két kollektor áram változás is megegyezik:

$$\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}. \quad (4.95)$$

A két kollektorellenálláson azonos feszültség esik:

$$\Delta I_{C1} R_{C1} = \Delta I_{C2} R_{C2}, \quad (4.96)$$

így a kollektorpontok feszültsége is azonos:

$$\begin{aligned} \Delta U_{C1} &= U_{t1} - \Delta I_{C1} R_{C1}, & \Delta U_{C2} &= U_{t1} - \Delta I_{C2} R_{C2}, \\ \Delta U_{C1} &= \Delta U_{C2}. \end{aligned} \quad (4.97)$$

A kimeneti feszültség közös vezérlés esetén:

$$u_{kik} = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2} = 0, \quad (4.98)$$

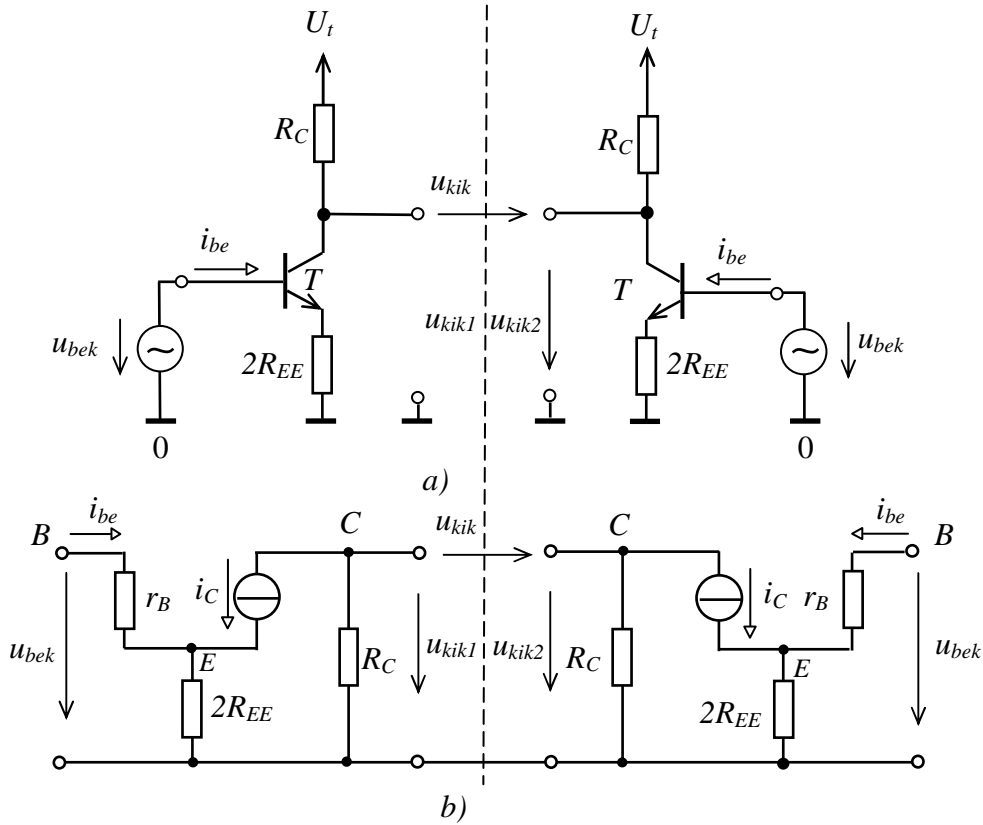
a differenciaerősítő ideális esetben nem erősíti a bemenetére kerülő közös jelet.

Mivel a tranzisztorok emitterárama a bemeneti változás hatására azonos mértékben változik:

$$\Delta I_{E1} = \Delta I_{E2}, \text{ és } \Delta I_{EE} = \Delta I_{E1} + \Delta I_{E2} \quad (4.99)$$

így a közös emitteráram a csomóponti törvény alapján nem lesz állandó, a közös emitterpont feszültsége változik. Belátható, hogy közös vezérlés szempontjából a differenciaerősítő felbontható két olyan közös emitterű kapcsolásra, amelyeknek emitterköri negatív visszacsatolása van (soros áram visszacsatolás), azaz van emitterellenállása és nem rendelkezik hidegítő kondenzátorral (4.33a) ábra). A két fél kapcsolás emitterellenállásának értéke a közös emitterellenállás kétszerese, így

biztosítható az eredeti kapcsolás emitteráramával azonos értékű áram. Mivel a közös kimeneti feszültség nulla, a terhelésen nem folyik áram, ez a terhelő ellenállás szakadással való helyettesítésével modellezhető.



4.33. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás a) két részre bontása, és b) kijelű helyettesítőképe közös vezérlés esetén.

A két fél kapcsolás közös jelre vonatkoztatott feszültségerősítése:

$$A_{uk1} = \frac{u_{ki1}}{u_{bek}}, \quad A_{uk2} = \frac{u_{ki2}}{u_{bek}}. \quad (4.100)$$

A differenciaerősítő teljesen szimmetrikus felépítése miatt:

$$A_{uk1} = A_{uk2} = A_{uk}, \quad (4.101)$$

így a kapcsolás közös jelre vonatkoztatott feszültségerősítése a soros áramvisszacsatolt, közös emitterű erősítő feszültségerősítésével adható meg:

$$A_{ukk} = -\frac{R_C}{r_E + 2 \cdot R_{EE}} \cong -\frac{R_C}{2 \cdot R_{EE}}. \quad (4.102)$$

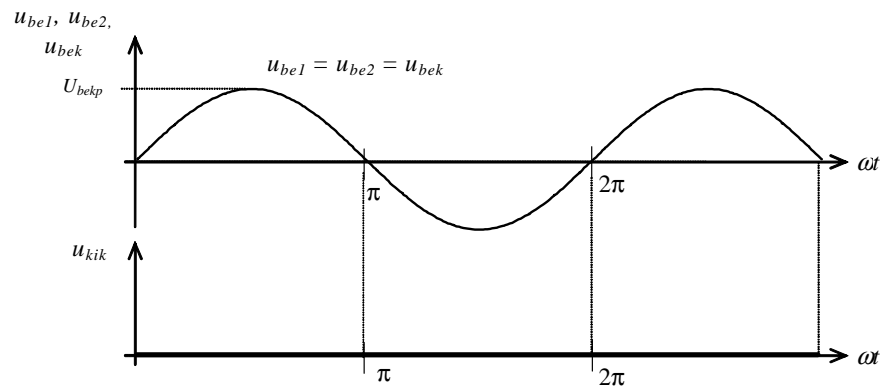
A kapcsolás közös vezérlésre vonatkozó kijelű helyettesítőképe az 4.33b) ábrán látható. A kapcsolás időfüggvényei az 4.34. ábrán láthatók.

A közös vezérlés esetén az egyik oldal R_{bek1} bemeneti ellenállása a szimmetria miatt megegyezik másik oldal R_{bek2} bemeneti ellenállásával:

$$R_{bek1} = R_{bek2} \cong \beta \cdot (r_E + 2R_{EE}) \cong \beta \cdot 2R_{EE}. \quad (4.103)$$

A differenciaerősítő közös bemeneti ellenállása, mivel a két oldal közös bemeneti ellenállása párhuzamosan kapcsolódik:

$$R_{bek} = \frac{1}{2} R_{bek1} \cong \beta \cdot R_{EE} . \quad (4.104)$$



4.34. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás feszültség-időfüggvényei közös vezérlés esetén.