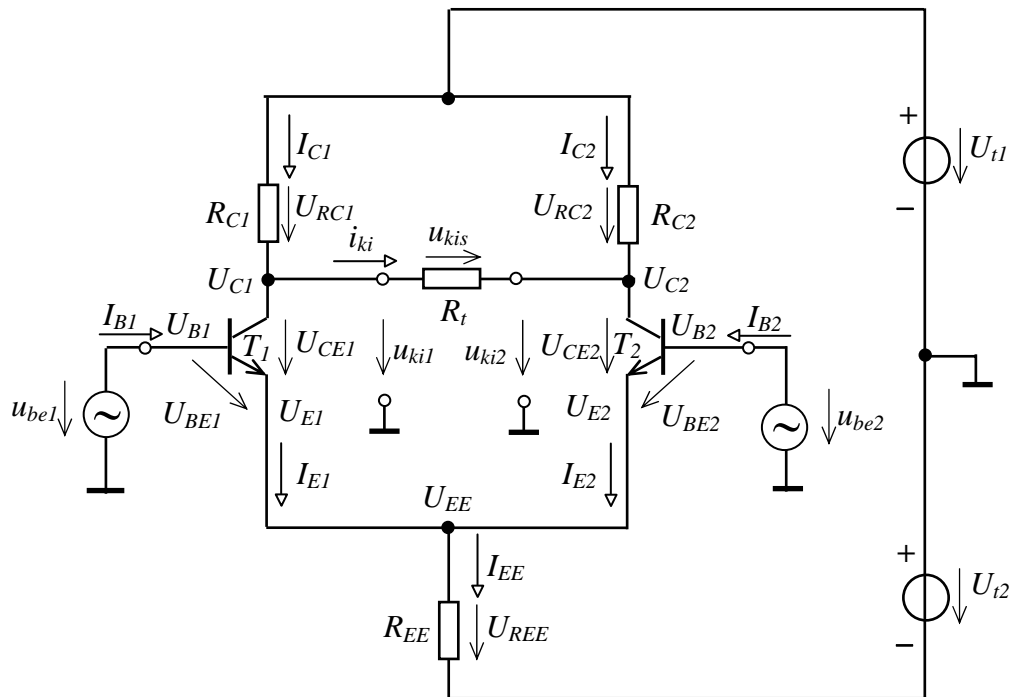


5. DIFFERENCIAERŐSÍTŐ

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.



5.1. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás

A szimmetrikus erősítő egyik lehetséges áramköri megvalósítása az *5.1. 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 csatolókondenzátorok 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:

$$u_{bes} = u_{bel} - u_{be2} . \quad (5.1.)$$

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

$$u_{kis} = u_{ki1} - u_{ki2} \quad (5.2.)$$

A differenciaerősítő szimmetrikus bemenetű és szimmetrikus kimenetű erősítő.

5.1. A differenciaerősítő munkapont beállítása

A szimmetrikus felépítés miatt feltételezhető, hogy a tranzisztorok paraméterei, az alkatrészecskéi 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:

$$U_{B1} = U_{B2} = U_B \cong 0. \quad (5.3.)$$

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:

$$U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}. \quad (5.4.)$$

A közös emitterpont feszültsége:

$$U_{EE} = U_B - U_{BE} = 0 - U_{BE} = -U_{BE}. \quad (5.5.)$$

A közös emitterellenállás feszültsége:

$$U_{REE} = U_{EE} - U_{i2}, \quad (5.6.)$$

a közös emitterellenálláson folyó áram:

$$I_{EE} = \frac{U_{EE} - U_{i2}}{R_{EE}}. \quad (5.7.)$$

Az egyes tranzisztorok emitterárama a közös emitteráram fele:

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I_{EE}}{2}. \quad (5.8.)$$

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

$$I_E \cong I_C. \quad (5.9.)$$

A kollektor ellenállások feszültsége:

$$U_{RC1} = U_{RC2} = I_C R_C. \quad (5.10.)$$

A kollektor elektródák feszültsége azonos kollektorellenállások esetén:

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{i1} - U_{RC}. \quad (5.11.)$$

A kimeneti feszültség a kollektor elektródák feszültségének különbsége:

$$U_{ki} = U_{C1} - U_{C2} = 0. \quad (5.12.)$$

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

5.2. 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:

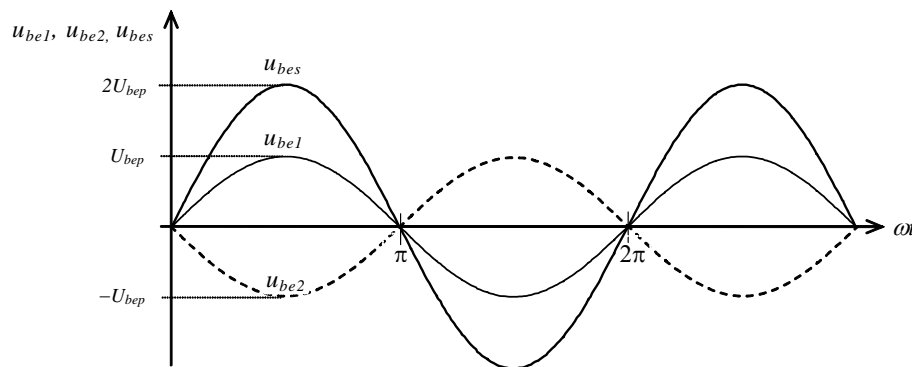
$$\begin{aligned} u_{be1} &= -u_{be2}, \\ u_{be1} &= U_{bep} \sin \omega t, & u_{be2} &= U_{bep} \sin(\omega t - \pi), \end{aligned} \quad (5.13.)$$

ahol U_{bep} a szinuszos feszültségek csúcértéke.

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

$$u_{bes} = u_{be1} - u_{be2}. \quad (5.14.)$$

A bemeneti feszültségek időfüggvényei láthatók az 5.2. ábrán.



5.2. 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 is. 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:

$$\Delta I_{E1} = -\Delta I_{E2}. \quad (5.15.)$$

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

$$\Delta I_{EE} = 0, \quad U_{EE} = \text{állandó}. \quad (5.16.)$$

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

$$\Delta U_{RC1} = \Delta I_{C1} R_{C1}. \quad (5.17.)$$

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

$$\Delta U_{RC2} = \Delta I_{C2} R_{C2}, \quad (5.18.)$$

Az 1-es kimeneti pont feszültsége a

$$\Delta U_{ki1} = U_{t1} - \Delta U_{RC1}. \quad (5.19.)$$

összefüggés szerint annyival csökken, mint amennyivel a

$$\Delta U_{ki2} = U_{t1} + \Delta U_{RC2}. \quad (5.20.)$$

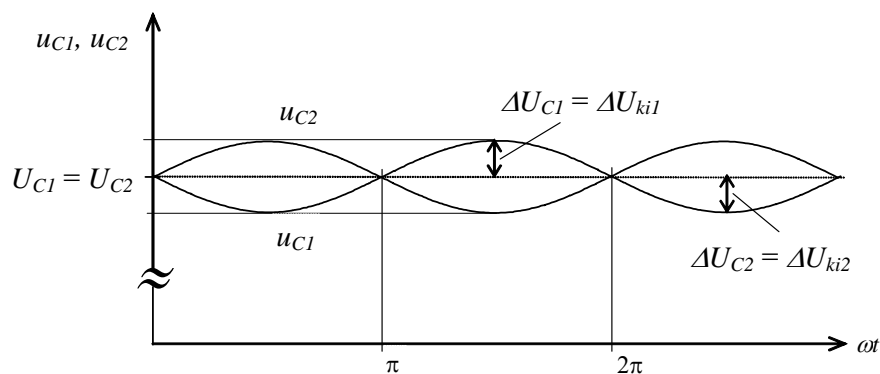
összefüggés szerint a 2-es kimenet feszültsége nő.

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

$$\Delta U_{kis} = \Delta U_{ki1} - \Delta U_{ki2} = (U_{t1} - \Delta U_{RC1}) - (U_{t1} + \Delta U_{RC2}) = -2 \cdot \Delta U_{RC}, \quad (5.21.)$$

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

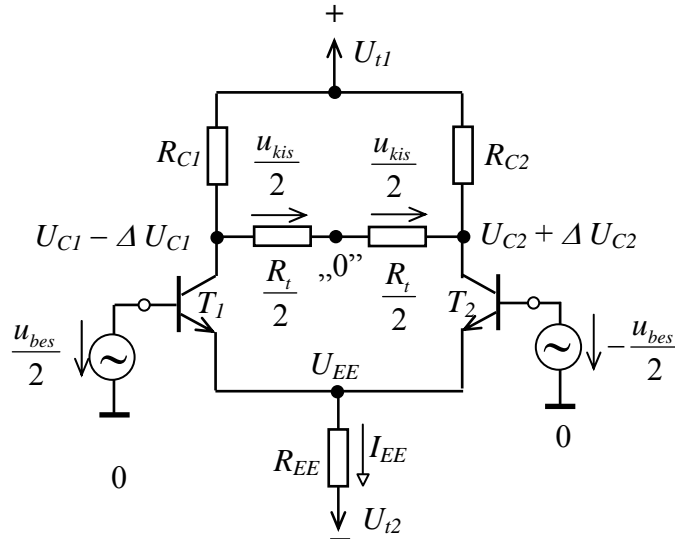
A bemeneti feszültségek ellentétes változását feltételezve, a T_1 tranzisztor annyival jobban lezár, mint amennyivel a T_2 tranzisztor kinyit, az u_{ki1} kimeneti feszültség annyival lesz nagyobb, mint amennyivel kisebb az u_{ki2} , a kimeneti szimmetrikus feszültség változása: $\Delta U_{kis} = 2\Delta U_{RC}$, ellentétes irányú az előző változáshoz képest. Belátható, hogy a bemeneti jelek szinuszos változása ellentétes fázishelyzetű szinuszos kimeneti jelváltozást hoz létre. A kollektor elektródák, egyben a kimeneti pontok feszültség-időfüggvényei láthatók az 5.3. ábrán.



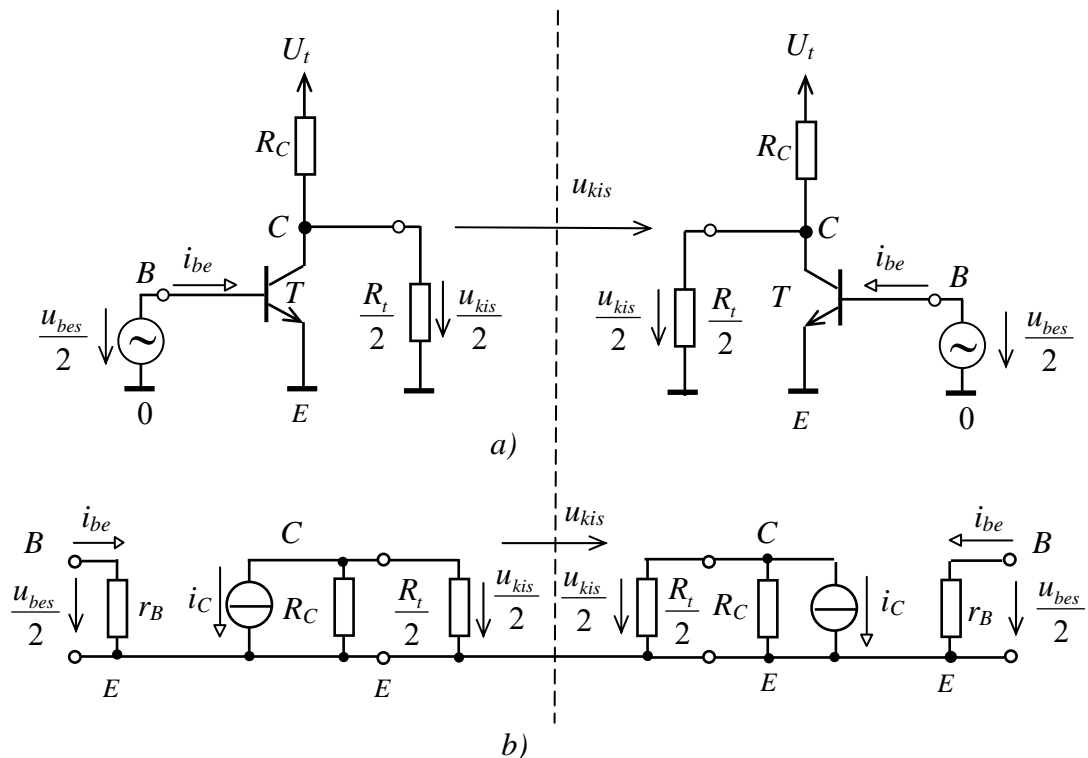
5.3. ábra. A differenciaerősítő kollektor pontjainak feszültség-időfüggvényei szimmetrikus vezérlés esetén.

Mivel a közös emitter U_{EE} feszültsége a vezérlés hatására nem változik (5.16.), tehát változóáramúlag földpont. Hasonlóképpen a szimmetria miatt a terhelés ellenállásának

„közepontja” 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 (5.5a) ábra).



5.4. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás szimmetrikus vezérlés esetén.



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

A differenciaerősítő feszültségerősítése az

$$A_{uss} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}}. \quad (5.22.)$$

összefüggés szerint határozható meg.

A kettébontott kapcsolás egyik felének feszültségerősítés:

$$A_{us1} = \frac{\frac{u_{kis}}{2}}{\frac{u_{bes}}{2}} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}} = A_{uss}. \quad (5.23.)$$

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

A közös emitterű erősítő jellemzőinek alapján a differenciaerősítő szimmetrikus feszültségerősítése:

$$A_{uss} = \frac{u_{kis}}{u_{bes}} = -g_m \left(R_C \times \frac{R_t}{2} \right), \quad (5.24.)$$

ahol g_m a tranzistor meredeksége:

$$g_m = \frac{di_C}{du_{BE}} \cong \frac{I_{CM}}{U_T}. \quad (5.25.)$$

A meredekség értéke kis áramok tartományában jó közelítéssel számítható az I_{CM} munkaponti kollektoráram és az U_T termikus feszültség ($T = 28,6^\circ \text{C}$ hőmérsékleten $U_T \cong 26 \text{ mV}$) hányadosaként. A kapcsolás kisjelű helyettesítőképe szimmetrikus vezérlésre az 5.5b) 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 (5.5b) ábra):

$$R_{bes} = \frac{u_{bes}}{i_{bes}} = \frac{\frac{u_{bes}}{2}}{\frac{i_{be}}{2}} \cdot 2 = 2 \cdot r_B \cong 2 \cdot \beta \cdot r_E, \quad (5.26.)$$

ahol β a közös emitterű kisjelű áramerősítési tényező,

r_E dinamikus ellenállás, a tranzistor g_m meredekségének reciproka.

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

$$R_{kis} \cong 2 \cdot R_C, \quad (5.27.)$$

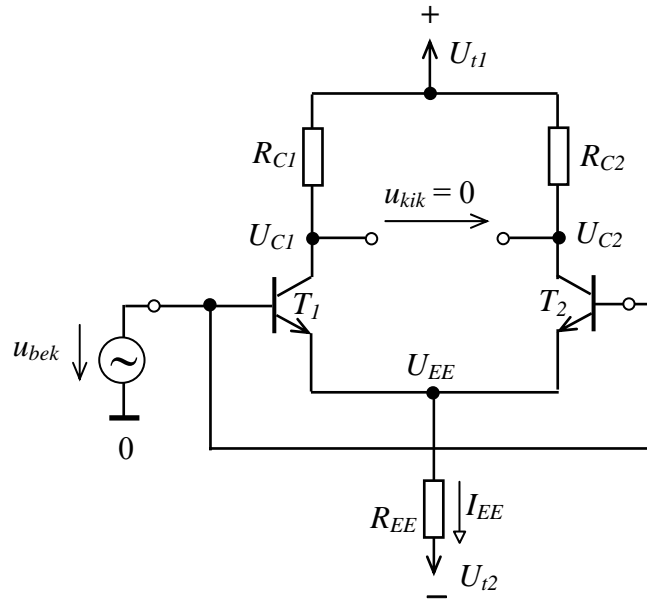
mivel a kollektorellenállások váltakozóáramúlag sorba kapcsolódnak (5.5b) ábra).

5.3. A differenciaerősítő működése közös vezérlés esetén

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

$$u_{be1} = u_{be2} = u_{bek}. \quad (5.28.)$$

A differenciaerősítő kapcsolási rajza közös vezérlés esetén az 5.6. ábrán látható.



5.6. 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:

$$\Delta I_{B1} = \Delta I_{B2}, \quad (5.29.)$$

a két kollektor áram változás is megegyezik:

$$\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}. \quad (5.30.)$$

A két kollektorellenálláson azonos feszültség esik:

$$\Delta I_{C1} R_{C1} = \Delta I_{C2} R_{C2}, \quad (5.31.)$$

így a kollektor elektródák feszültsége is azonos:

$$\Delta U_{C1} = U_{t1} - \Delta I_{C1} R_{C1}, \quad \Delta U_{C2} = U_{t1} - \Delta I_{C2} R_{C2}, \quad (5.32.)$$

$$\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2}.$$

A kimeneti feszültség közös vezérlés esetén:

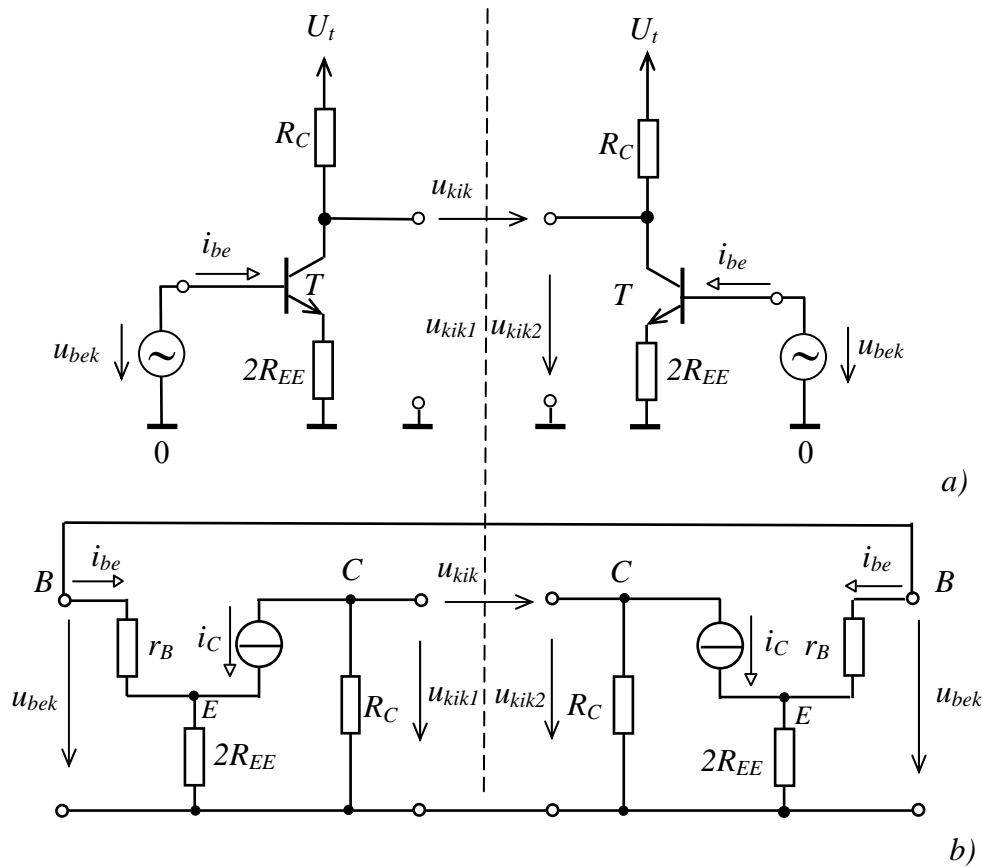
$$u_{kik} = \Delta U_{C1} - \Delta U_{C2} = 0, \quad (5.33.)$$

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

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

$$\Delta I_{E1} = \Delta I_{E2}, \text{ és } \Delta I_{EE} = \Delta I_{E1} + \Delta I_{E2} \quad (5.34.)$$

így a közös emitteráram a csomóponti törvény alapján nem lesz állandó, a közös emitter 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 (5.7a) ábra). A két részre bontott 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.



5.7. ábra. Differenciaerősítő kapcsolás a) két részre bontása, és b) kijelű helyettesítő képe közös vezérlés esetén.

A két részre bontott kapcsolás közös jelre vonatkoztatott feszültségerősítése:

$$A_{uk1} = \frac{u_{ki1}}{u_{bek}}, \quad A_{uk2} = \frac{u_{ki2}}{u_{bek}}. \quad (5.35.)$$

A differenciaerősítő teljesen szimmetrikus felépítése miatt:

$$A_{uk1} = A_{uk2} = A_{uk}, \quad (5.36.)$$

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

$$A_{ukk} = -\frac{R_C}{r_E + 2 \cdot R_{EE}} \cong -\frac{R_C}{2 \cdot R_{EE}}. \quad (5.37.)$$

A kapcsolás közös vezérlésre vonatkozó kijelű helyettesítőképe az 5.7b) ábrán látható. A kapcsolás időfüggvényei az 5.8. ábrán láthatók.

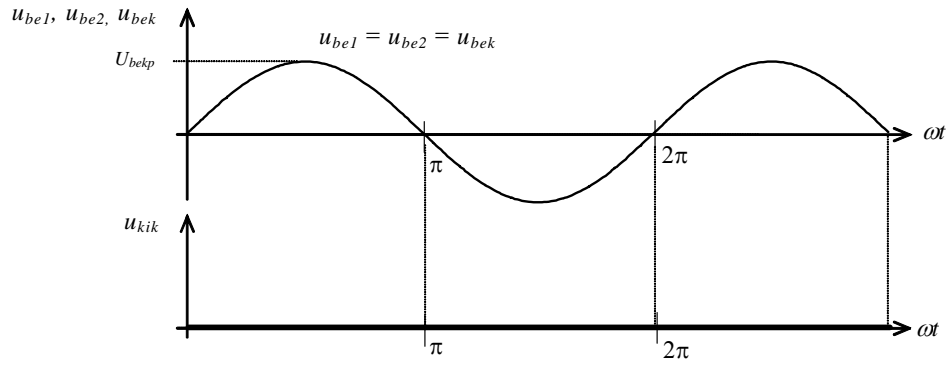
A közös vezérlés esetén az egyik oldal R_{bek1} bemeneti ellenállása a szimmetria miatt megegyezik a másik oldal R_{bek2} bemeneti ellenállásával:

$$R_{bek1} = R_{bek2} = \frac{u_{bek}}{i_{be}} \cong \beta \cdot (r_E + 2R_{EE}) \cong \beta \cdot 2R_{EE}. \quad (5.38.)$$

A differenciaerősítő közös bemeneti ellenállása, mivel a közös vezérlés miatt a bázisok együtt változnak, a bázis és a föld közötti ellenállás. Változás szempontjából a két oldal bemeneti ellenállása párhuzamosan kapcsolódik, ezért a közös bemeneti ellenállás:

$$R_{bek} = \frac{u_{bek}}{2i_{be}} = \frac{1}{2} R_{bek1} \cong \beta \cdot R_{EE} \quad (5.39.)$$

összefüggéssel határozható meg.



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