

Elektronika II.

Szimmetrikus differencia erősítő mérése

2017.10.30. / frissítve 2021.3.1.

Mérés célja:

Bipoláris tranzisztoros szimmetrikus erősítő működésének tanulmányozása, paramétereinek mérése.

A mérésre való felkészülés során az órai anyag mellett tanulmányozza az alábbi jegyzeteket:
Elektronikus áramkörök I/B 181-234.o.
Elektronikus áramkörök II/B 186-190.o., 294-298.o., 311.o.

Javasolt további irodalom:

Hainzmann-Varga-Zoltai: Elektronikus áramkörök

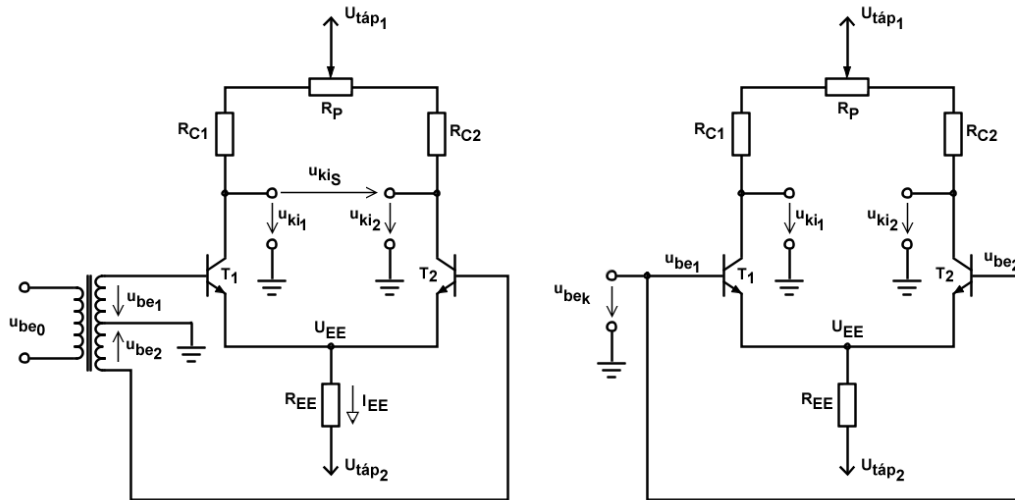
Tietze-Schenk: Analóg és digitális áramkörök

Az útmutatóban *dőlt betűvel* írtuk a megjegyzéseket illetve a szorgalmi feladatokat.

Alkatrészjegyzék

- 1db MD2369 tranzisztorpár (közös tokban, nyomtatott áramköri lapkára szerelve)
- 1db BC337 tranzisztor
- 1db ZPD3.3 Zener-dióda
- 1db szimmetrizáló transzformátor
- 2db 100k Ω
- 3db 10k Ω
- 2db 2k Ω
- 1db 1k Ω trimmer potencióméter

I. Összefoglaló



1. ábra: bal: szimmetrikus vezérlés, jobb: közös módusú vezérlés

A mérésben egy szimmetrikus felépítésű differenciaerősítőt vizsgálunk. A differenciaerősítő kapcsolások (kisjelű) működését kétféle bemenőjellel („vizsgálójellel”) szoktuk elemezni: a szimmetrikus és a közös módusú jelekkel. Az ezekre adott válaszok segítségével bármilyen bemenőjel kombinációra adott válasz megadható (szuperpozíció módszere, feltéve hogy az áramkör eléggé lineárisnak tekinthető), ugyanis bármilyen bemenő jelpár felbontható szimmetrikus és közös módusú összetevőkre.

A legtöbbször elemzett alapkapcsolás DC-illesztett (ilyenkor a bázisok az egyenáramú zérus munkapontot a generátoron keresztül kapják meg) így a bemenő jeleket egyen- vagy váltakozóáramúlag is értelmezhetjük. A szimmetrikus bemenőjelet jelen mérésnél transzformátor segítségével állítjuk elő, így az a bemenet csak AC lehet. A bázisok ebben az esetben a transzformátor középső kicsatolásán keresztül állnak munkapontba (a közös módusú esetben pedig a függvénygenerátoron keresztül, így ügyeljünk arra, hogy azon ne legyen ofszet beállítva).

Szimmetrikus bemenet:

Ilyenkor a két bemenet egyenlő nagyságú, de ellentétes előjelű:

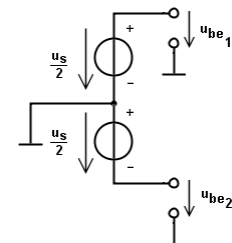
$$u_{be1} = -u_{be2}$$

Az ilyen jelet tekinthetjük úgy is, mint egy $\pm u_{beS}/2$ feszültségű kettős generátor jelét (ld. jobboldali ábra):

$$u_{be1} = \frac{u_{beS}}{2}$$

$$u_{be2} = -\frac{u_{beS}}{2}$$

$$u_{beS} = u_{be1} - u_{be2}$$



U_{beS} -t nevezzük szimmetrikus vagy különbségi bemenő feszültségnek.

Az áramkörnek két kimenete van, és a bemenethez hasonlóan itt is értelmezhetjük a különbségi kimenő feszültséget:

$$u_{kiS} = u_{ki1} - u_{ki2}$$

A két bemenet ill. két kimenet miatt többféle erősítést is értelmezhetünk: az egyoldali bemenet és kimenet közöttit, illetve a különbségi bemenet és kimenet közötti.¹

A szimmetrikus avagy különbségi erősítés (definíció ill. mérési utasítás):

$$A_{USS} = \frac{u_{kiS}}{u_{beS}} = \frac{u_{ki1} - u_{ki2}}{u_{be1} - u_{be2}}$$

Ideális esetben, ha a kapcsolás teljesen szimmetrikus ($R_{C1}=R_{C2}$, a potméter félállásban van és a két tranzisztor karakterisztikája megegyezik), akkor a két oldal erősítése külön-külön egyenlő, így azonos abszolútértékű bemenetek esetén a kimenetek is egyenlőek lesznek, tehát az egyoldali erősítés egyenlő lesz a különbségi erősítéssel.

$$\frac{u_{ki1}}{u_{be1}} = \frac{u_{ki2}}{u_{be2}} = \frac{u_{ki1} - u_{ki2}}{u_{be1} - u_{be2}}$$

Az erősítés kiszámítása:

A két bázis azonos potenciálon van (nulla) és a két emitter össze van kötve, tehát azonosak a bázis-emitter feszültségek. Így a közös emitterpont (U_{EE}) kb. -0,7 volton van. Az abszolútértékben egyenlő bemenő jelek hatására a két U_{BE} változása is egyenlő, így – a lineáris működési tartományban – az emitteráramok megváltozása is egyenlő. Ekkor az R_{EE} ellenálláson folyó áram konstans marad, hiszen a két áramváltozása kioltja egymást (feltéve, hogy kicsi a nemlinearitási hiba); így U_{EE} is konstans marad, azaz váltakozóáramúlag $u_{EE}=0$.

Ekkor a kapcsolás két oldala váltakozóáramú helyettesítőképe megfelel egy klasszikus közös emitterű (FE) kapcsolásnak (az emitter potenciálja konstans, azaz váltakozóáramúlag nulla, így itt nincs szükség a korábban megismert kapcsolás kondenzátorára.) Így az egyes oldalak erősítése (terheletlen esetben):

$$A_{U1} = \frac{u_{ki1}}{u_{be1}} = -g_{m1}R_{C1}$$

$$A_{U2} = \frac{u_{ki2}}{u_{be2}} = -g_{m2}R_{C2}$$

ideális esetben: $A_{U1} = A_{U2} = A_{USS}$

A meredekség számításához megint tekintsük a két tranzisztort azonos karakterisztikájúnak (azaz egyenlő U_{BE} -hez egyenlő I_C tartozzon).

¹ Az itt használt jelölésmódban az erősítéseknél az indexben az U utáni első betű a kimenetre, a második a bemenetre utal. Tehát pl. A_{USK} arra utal, hogy közös módusú bemenőjel mekkora mértékben hat a szimmetrikus (különbségi, differenciális) kimenetre stb.

$$I_{EE} = \frac{U_{EE} - U_{táp2}}{R_{EE}}$$

$$\text{ideális esetben: } I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2}$$

$$g_m = \frac{I_C}{U_T} = \frac{I_{EE}}{2U_T} = \frac{U_{EE} - U_{táp2}}{2R_{EE}U_T}$$

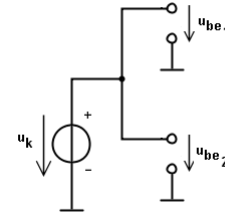
Közös módusú bemenet:

Ilyenkor a két bemenet egyenlő, és ezt elnevezzük közös módusú bemenő feszültségnek:

$$u_{be1} = u_{be2} = u_{beK}$$

A kimenetek átlagát közös módusú kimeneti feszültségnek nevezzük:

$$u_{kiK} = \frac{u_{ki1} + u_{ki2}}{2}$$



Az erre felírt közös módusú erősítés:

$$A_{UKK} = \frac{u_{kiK}}{u_{beK}} = \frac{\frac{u_{ki1} + u_{ki2}}{2}}{u_{beK}}$$

Ideális esetben (a korábbiakban említett szimmetrikus felépítésű áramkörben) az erősítések és így a kimenetek is egyenlőek: $u_{ki1} = u_{ki2} = u_{kiK}$. Egyúttal a különbségi kimenet ($u_{ki1} - u_{ki2}$) ilyenkor nulla.

$$A_{UKK} = \frac{u_{kiK}}{u_{beK}} = \frac{u_{ki1}}{u_{be1}} = \frac{u_{ki2}}{u_{be2}}$$

Az erősítés számolása:

Ebben az esetben is kihasználjuk a kapcsolás szimmetriáját. Ilyenkor azonban a két emitteráram változása egyenlő, azaz összeadódik, így R_{EE} -n folyó áram nem konstans, azaz u_{EE} nem nulla. Ekkor a helyettesítőképpen nem tűnik el az emitterellenállás, így az emitterkörben visszacsatolt (C_E kondenzátor nélküli) FE erősítőt vesszük elő korábbi tanulmányainkból. Ha R_{EE} -t egyenlően kettéosztjuk, akkor mindkét oldalon $2R_{EE}$ -t kapunk (ezeknek az eredője lesz u_i R_{EE}). Az emitterkörben visszacsatolt erősítő közelítő képletét felhasználva:

$$\frac{u_{ki1}}{u_{be1}} = -\frac{R_{C1}}{2R_{EE}}, \quad \frac{u_{ki2}}{u_{be2}} = -\frac{R_{C2}}{2R_{EE}}$$

$$\text{ideális esetben: } A_{UKK} = \frac{u_{kiK}}{u_{beK}} = -\frac{R_C}{2R_{EE}}$$

Tetszőleges bemenet:

Tetszőleges két bemenet esetén a bemenetek felbonthatóak szimmetrikus és közös módusú komponensekre, így a szuperpozíció módszerével az előző két eset ismeretében elemezni tudjuk az áramkör viselkedését. (A szuperpozíció módszere csak lineáris áramkörökre igaz, így itt csak az ún. kisjelű esetben használhatjuk, azaz amíg a bemenő jel elég kicsi ahhoz, hogy az általa a karakterisztikán elfoglalt szakasz nemlinearitása kellően kicsi.)

$$u_{beS} = u_{be1} - u_{be2}$$

$$u_{beK} = \frac{u_{be1} + u_{be2}}{2}$$

Illetve visszafele:

$$u_{be1} = u_{beK} + \frac{u_{beS}}{2}$$

$$u_{be2} = u_{beK} - \frac{u_{beS}}{2}$$

Hasonlóan értelmezhetjük a kimeneti jel komponenseit is.

A korábbiakban ismertetett egyenletekből látható, hogy a két üzemmódban az erősítés nagyon eltérő. Szimmetrikus módban nagy, közös módusban kicsi. A gyakorlati alkalmazásokban konkrétan az a célunk, hogy a szimmetrikus jelösszetevőket erősítsük, a közös módusú összetevőket elnyomjuk.

Mind analóg, mind digitális technikában használatos módszer a jelek háromvezetékes átvitele (differenciális jelátvitel) a zaj hatásainak csökkentése érdekében (pl. USB, CAN, RS-485 digitális átvitel vagy analóg stúdiótechnika). Ilyenkor két vezetéken a jel, illetve a jel negáltja (mínusz egyszerese) megy, a harmadik vezeték a nulla (föld). A felhasználási helyen a két jelvezeték különbségét vesszük (a két vezeték közé kötött terhelésen). A módszer lényege, hogy a zaj egy része kívülről jön (sugárzott, indukált). Ha feltesszük, hogy a két jelvezeték egymáshoz közel van, akkor a kellően messziről érkező sugárzott zavar a két vezeték egymás melletti egységnyi szakaszában közel hasonló zajfeszültséget kelt. A végén a két jel különbségének vételekor a hasznos jel (mint szimmetrikus jel) felerősödik, a zaj, mivel egyenlő (közös módusú), kivonódik, csökken. A jel-zaj viszony ilyenfajta növelését még jobban megvalósíthatjuk a vezeték végén differencia erősítő alkalmazásával. (Differencia erősítő alkalmazása esetén egyébként nem szükséges, hogy a két jelvezetéken szimmetrikus legyen a jel, a közös módusú zajt az erősítő akkor is elnyomja, de célszerűbb a szimmetrikus meghajtás, pl. hogy a vezeték sugárzását csökkentsük.)

A gyakorlatban a differenciaerősítőnek két alapvető változatával találkozhatunk: a szimmetrikus és az aszimmetrikus kimenetűvel. Az előbbit láthatjuk jelen mérésben. Az utóbbinál csak az első kimenetet használjuk, a másik oldalon R_{C2} helyett rövidzár van. A szimmetrikus változatot használhatjuk pl. akkor, ha vonali erősítőt akarunk, azaz tovább akarjuk a szimmetrikus jelet vinni. Az aszimmetrikus változatot használhatjuk pl. ha végerősítő kell, amikor a terhelés egyik pontját nullaponton, földponton szeretnénk tudni. A műveleti erősítők többségének a bemeneti fokozata egy aszimmetrikus differencia erősítő (de léteznek szimmetrikus kimenetű opampok is).

A **szimmetrikus (kettős) kimenetű áramkörnél** a cél az, hogy a különbségi kimenetben ($u_{ki1}-u_{ki2}$) ne jelenjen meg olyan összetevő, ami a közös módusú bemenő jelkomponensből ered (csak olyan, ami a szimmetrikusból). Ezt az A_{USK} paraméterrel számszerűsítjük:

$$A_{USK} = \frac{u_{kiS}}{u_{beK}} = \frac{u_{ki1} - u_{ki2}}{u_{beK}}, \text{ ha } u_{be1} = u_{be2} = u_{beK}$$

Ideális esetben a szimmetrikus felépítésű erősítőnél ez a paraméter nulla, hiszen közös módusú bemenet esetén a két kimenet egyenlő. Ha a kollektorellenállások nem egyenlőek, akkor A_{USK} értéke nullánál nagyobb (de jellemzően egynél jóval kisebb) lesz. Ekkor:

$$A_{USK} = \frac{u_{ki1} - u_{ki2}}{u_{beK}} = \frac{u_{ki1}}{u_{beK}} - \frac{u_{ki2}}{u_{beK}} = -\frac{R_{C1}}{2R_{EE}} - \left(-\frac{R_{C2}}{2R_{EE}} \right) = \frac{R_{C2} - R_{C1}}{2R_{EE}}$$

A hasznos (szimmetrikus) jel és (közös módusú) zaj ill. zavar viszonyát a közös módusú elnyomás (CMRR, common mode rejection ratio) adja meg. Szimmetrikus kimenetű esetben:

$$CMRR = \frac{A_{USS}}{A_{USK}}$$

$$CMRR[dB] = \left(20 \cdot \lg \frac{A_{USS}}{A_{USK}} \right) [dB] = a_{USS}[dB] - a_{USK}[dB]$$

Az **aszimmetrikus változatnál** csak egy kimenet van (legyen ez u_{ki1}), így különbségi kimenő jelet (u_{kis}) nem értelmezünk. Ilyenkor a közös módusú bemenet hatása mindenképp megjelenik a kimeneten, ideális esetben is. Ekkor az A_{USK} paraméter definíciója így módosul:

$$A_{USK} = \frac{u_{ki1}}{u_{beK}} = -\frac{R_{C1}}{2R_{EE}} \text{ (Azaz meg fog egyezni az } A_{UKK} \text{ paraméterrel.)}$$

A közös módusú elnyomás képletében a nevezőben az előbb ismertett A_{USK} kell, a számlálóban pedig a két kimenetű változatnál megkapott A_{USS} fele (ugyanis a bemenet továbbra is szimmetrikus, de csak egyoldalú a kimenet):

$$CMRR = \frac{\frac{u_{ki1}}{u_{beS}}}{\frac{u_{ki1}}{u_{beK}}} = \frac{A_{USS}}{2A_{UKK}}$$

Mindkét esetben, de főleg az aszimmetrikusnál, a közös módusú elnyomás növelésének módja az R_{EE} ellenállás növelése. Ennek hátránya, hogy ezzel csökken a kollektoráram és így a meredekség (g_m), azaz a szimmetrikus erősítés is. (Az R_C -ket a munkapont ill. kivezélhetőség meghatározza.) A problémára megoldást nyújt, ha R_{EE} helyére áramgenerátort teszünk, ennek úgy lehet nagy (dinamikus) ellenállása, hogy közben nem csökken az áramunk. A műveleti erősítők belsejében ezt egy kéttranszisztoros ún. áramtükör kapcsolással oldják meg. Mi most egy egytranszisztoros, korábban tanult áramgenerátor kapcsolással vizsgáljuk (lásd 4. ábra). Ennél készülünk fel arra, hogy a közös módusú kimenet kisebb lehet annál, mint amit mérni tudunk, illetve lehet, hogy csak zajt fogunk mérni. Természetesen ez nekünk jó, ez volt a cél (mármint nem a zaj, hanem az, hogy kicsi a közös módusú kimenet).

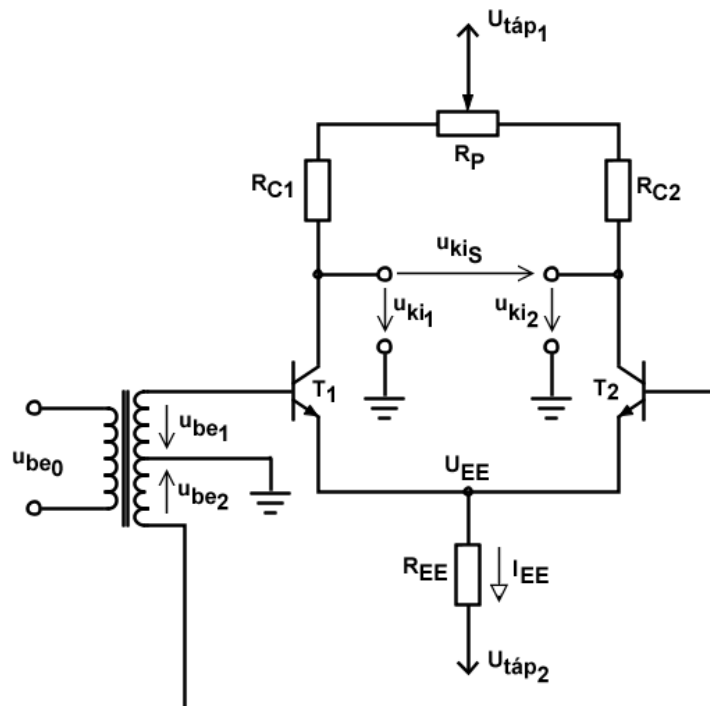
II. Számítások (házi feladat, mérés előtt elvégzendő!)

- 1) Szimmetrikus vezérlésű kapcsolás (2. ábra):
 - Számítsa ki a kapcsolás munkaponti feszültségeit és áramait ideális esetben (RP legyen középállásban, tranzisztorok paraméterei megegyeznek , RC-k egyenlőek). A szükséges adatokat az ábra alatt találjuk.
 - Számítsa ki a kimeneti ofszet feszültséget ($U_{C1}-U_{C2}$), ha R_{C1} 5%-kal nagyobb a névleges értéknél és $I_{C1}=1,1 \cdot I_{C2}$.
 - Számítsa ki a szimmetrikus (különbségi) feszültségerősítés értékét ideális esetben.
 - Számítsa ki a közös módusú feszültségerősítést ideális esetben.

- 2) Közös módusú vezérlés (3. ábra):
 - Számítsa ki a különbségi feszültségerősítést közös módusú bemenet esetén ideális esetben (azaz, a közös módusú bemenő jel mekkora mértékben jut át a szimmetrikus kimenetre).
 - Számítsa ki az A_{USK} értékét abban az esetben, ha $R_{C1}=10,1k\Omega$.
 - Számítsa ki a közös módusú elnyomást (CMRR) ideális és nem ideális (6. példa) esetben is szimmetrikus (különbségi) kimenet esetére.
 - Számítsa ki a közös módusú elnyomást arra az esetre, amikor csak az egyik kimenetet (u_{ki1}) használjuk (azaz aszimmetrikus a kimenet).

- 3) Számítsa ki a munkaponti emitteráramot a 4. ábra szerinti kapcsolásban!

III. Mérés



2. ábra: szimmetrikus vezérlés

Adatok:

$R_{C1}=R_{C2}=10\text{k}\Omega$; $R_{EE}=10\text{k}\Omega$; $R_P=1\text{k}\Omega$ trimmer ; $U_{\text{táp}1} = +12\text{V}$; $U_{\text{táp}2} = -12\text{V}$
A mérés elkezdése előtt állítson be 20mA áramkorlátot mindkét tápágban!

1. Szimmetrikus jel

A transzformátor primer tekercsére adjon akkora jelet (függvénygenerátorból), hogy a szekunder oldalon $f=5\text{kHz}$, $U_{cs}=100\text{mV}$ paraméterű szinuszjelet kapjon. A két szekunder jelalakot jelenítse meg az oszcilloszkóp két csatornáján! A kapott ábrát rajzolja le amplitúdó- és fázishelyesen.

Az oszcilloszkóp ADD üzemmódját kihasználva (digitális szkópon a MATH menü belül) ellenőrizhetjük a jel szimmetrikusságát: ideális esetben a két jel összege nulla.

2. Kimeneti ofsztet

Építse meg az 2. ábrán látható kapcsolást. A transzformátor bemenetére még ne kösse rá a függvénygenerátort. Ekkor az U_{ki1} és U_{ki2} pontok között mérhető DC feszültség a kimeneti ofsztet feszültség. Keresse meg ennek minimális értékét az R_P potméter állításával és ezt az értéket jegyezze fel.

3. Munkapont

Mérje meg a kapcsolás munkaponti feszültségeit és áramait! Hasonlítsa ezeket össze a házi feladatban számoltakkal!

4. Szimmetrikus erősítés

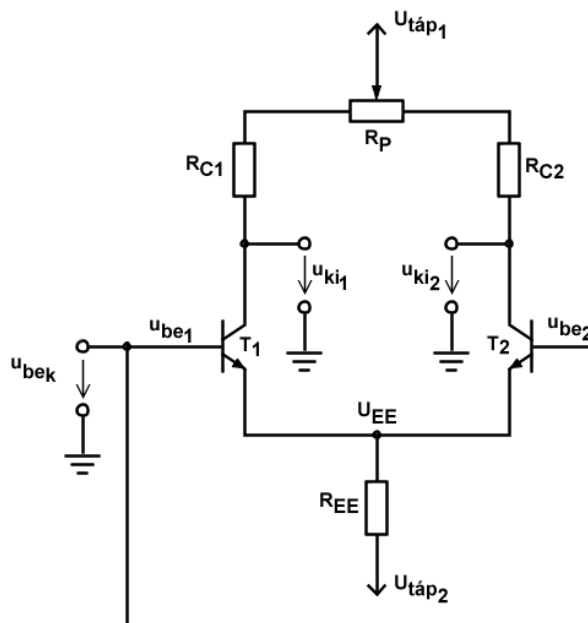
Adjon a függvénygenerátorból akkora jelet a transzformátorra, hogy a szekunder oldalon u_{be1} $f=5\text{kHz}$, $U_{eff}=10\text{mV}$ legyen! (Effektív értéket a millivoltmérő AC állásában mérhet.)

Oszilloszkóppal ellenőrizze, hogy a vizsgált jelek nem torzultak-e (túlvezérlés esetén csökkentse a bemenő jelszintet).

Vizsgálja és jegyzőkönyvben rögzítse (függvényábrázolással) az u_{be1} - u_{ki1} ; u_{be2} - u_{ki2} jelpárokat, az u_{kiS} - u_{beS} jelpárt valamint az u_{EE} jelet.

A mért u_{kiS} - u_{beS} jelek alapján határozza meg A_{USS} értéket és hasonlítsa össze a számolt értékkel.

5. Közös módusú erősítés



3. ábra: közös módusú vezérlés

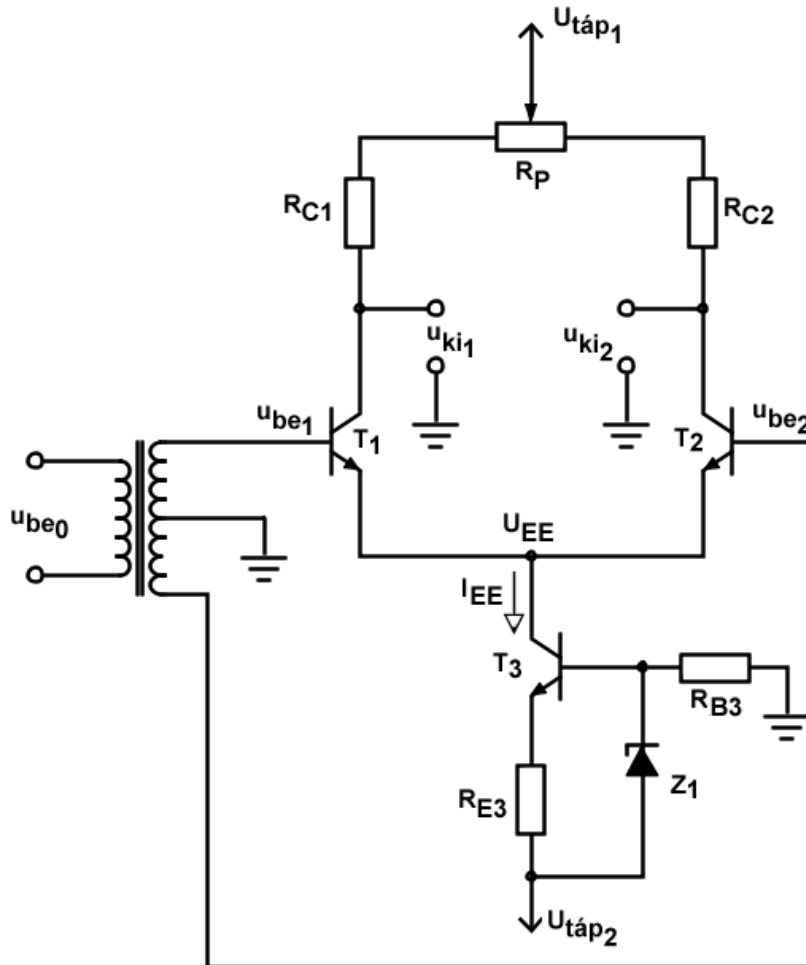
Ebben a mérésben nem kell a transzformátor, helyette a 2. ábra alapján a közösített bemenetekre kötjük a függvénygenerátort ($f=5\text{kHz}$, $U_{cs}=2\text{V}$ szinusz).

Oszilloszkóppal ellenőrizze, hogy a vizsgált jelek nem torzultak-e. AC millivoltmérővel mérje meg a kimeneti jeleket (u_{ki1} , u_{ki2}). (Hasonlítsa össze az oszcilloszkópot és a multimétert ezeknek a kis jeleknek a mérhetőségének szempontjából.)

Határozza meg A_{USK} értékét.

Határozza meg $CMRR$ értékét. Ehhez használja az előző feladatban kapott A_{USS} értéket és a mostani feladatban kapott A_{USK} értéket. (Határozza meg $CMRR$ értékét aszimmetrikus (egyoldalú) kimenet esetén is, ehhez használja fel az előző feladat és a mostani feladat u_{ki1} effektív értékeit.)

5. Áramgenerátoros szimmetrikus erősítő



4. ábra: áramgenerátoros emitterkörös differenciaerősítő

Építse meg a 3. ábra szerinti kapcsolást! Adatok: $R_{E3}=2\text{k}\Omega$; $R_{B3}=2\text{k}\Omega$; Z_1 : ZPD3.3 ; $U_{\text{táp1}} = +12\text{V}$; $U_{\text{táp2}} = -12\text{V}$

Végezze el a 3. és 4. pontban leírt méréseket erre a kapcsolásra is. Hasonlítsa össze a mért eredményeket az áramgenerátor nélküli kapcsolásával és értékelje a különbséget.

Határozza meg az emitterkörü áramgenerátor dinamikus ellenállását – lényegében ez helyettesíti itt az R_{EE} -t az AC számításokban. A méréshez használja fel az Elektronika I. laboratóriumban az áramgenerátor kimeneti ellenállásának mérésénél tanultakat. Vezéreljük a bemenetet közös módusban DC jellel, mérjük az U_{EE} feszültséget és az

I_{EE} áramot legalább két pontban. A dinamikus ellenállás $r_{EE} = \frac{\Delta U_{EE}}{\Delta I_{EE}}$.

IV. Ellenőrző kérdések

- 1) Ismertesse a differenciális jelátvitel elvét és célját!
- 2) Tetszőleges két bemenő jel esetén hogyan állíthatjuk elő a szimmetrikus és közös módusú összetevőket?
- 3) Rajzoljon fel egy tranzisztoros differencia erősítő kapcsolást! Jelölje a be- és kimeneteket!
- 4) Ismertesse a szimmetrikus differencia erősítő működését szimmetrikus bemenet esetén!
- 5) Ismertesse a szimmetrikus differencia erősítő működését közös módusú bemenet esetén!
- 6) Ismertesse a közös módusú elnyomást!
- 7) Milyen különbség van az egy és a két kimenetű kapcsolat között a közös módusú elnyomás szempontjából?
- 8) Milyen feltételei vannak annak, hogy a közös módusú elnyomás minél nagyobb legyen?
- 9) Milyen megoldással növelhető a közös módusú elnyomás és mi ennek az elve?