

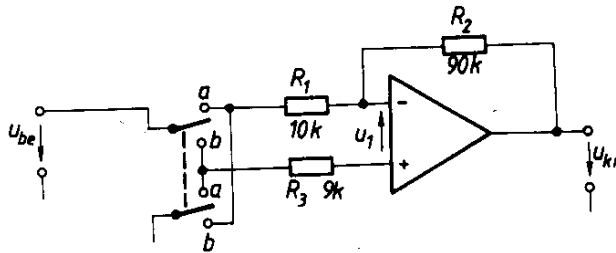
FELADATOK

F.2.8 A 2.F.3 ábrán látható kapcsolásban alkalmazott műveleti erősítő jellemzői:

$$A_{u0} = \infty, \quad R_{bek} = \infty, \quad R_{bes} = \infty.$$

Határozza meg a feszültségerősítést

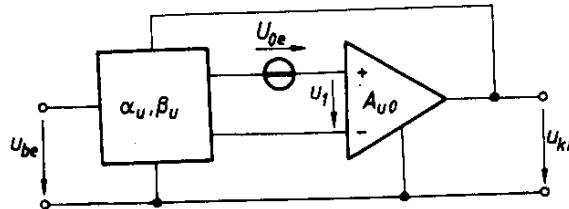
- K1 és K2 „a” állásában,
- K1 és K2 „b” állásában.



2.F.3 ábra
Átkapcsolható erősítésű erősítő

F.2.9 Adott a 2.F.4 ábrán látható visszacsatolt hálózat. Zérusfrekvencián: $A_{u0} = 10^5$, $\alpha_{u0} = 0,2$; $\beta_{u0} = 0,004$; $U_{0e} = 1$ mV.

- Számítsa ki a jelerősítés ideális értékét (A_{UN}) és a véges hurokerősítés miatti erősítéshibát (h_H)!
- Számítsa ki az ofszet feszültségre vonatkozó zavarjel-erősítés értékét!
- Számítsa ki a visszacsatolt erősítő bemenetére redukált nullhiba (U_{0e}^*) és a kimeneti nullhiba (U_{ki0}) értékét!



2.F.4 ábra
Műveleti erősítő általános feszültségvisszacsatolással

3. Szélessávú erősítő alapkapsolások visszacsatolt műveleti erősítővel

A műveleti erősítő (lásd 1.4. szakasz) az analóg áramkörtechnika legelterjedtebb építőeleme. Nagy erősítése visszacsatolt struktúrákban precíz, csak a visszacsatoló hálózattól függő eredő tulajdonságok elérését, szimmetrikus bemenete pedig nagy számú kapcsolási variációt tesz lehetővé, integrált kivitelben olcsón állítható elő.

E fejezetben a műveleti erősítő visszacsatolásával kialakított szélessávú erősítő alapkapsolások kapcsolási megoldásait, továbbá az eredő átviteli és illesztési jellemzők, az átviteli és az additív hibák számítási módszereit tárgyaljuk. A szélessávú átviteli tulajdonságokat többnyire valós (rezisztív) visszacsatoló hálózattal érjük el. Alapkapsolásnak e fejezetben az egy műveleti erősítővel megvalósított aszimmetrikus erősítő kapcsolásokat nevezzük.

A műveleti erősítővel megvalósított erősítő kapcsolások eredő tulajdonságainak számításához a műveleti erősítő tulajdonságait kellő pontossággal figyelembe vevő modellt kell használnunk. Ezért e fejezetben először összefoglaljuk a műveleti erősítők különböző szintű modelljeit és a modellparaméterek tipikus értékeit. Ezt követően a műveleti erősítővel felépített legfontosabb alapkapsolásokat tárgyaljuk.

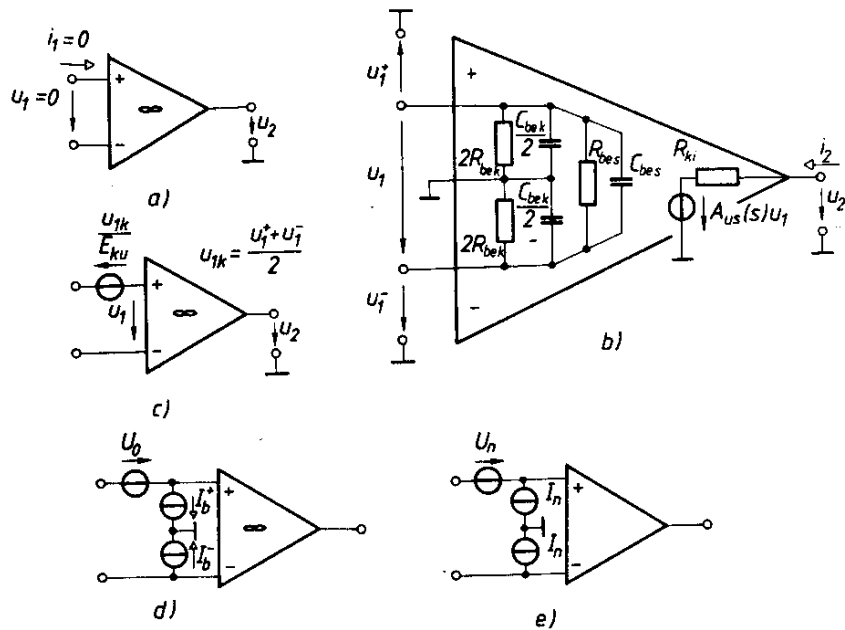
A műveleti erősítők tipikus belső felépítését és így a nemideális tulajdonságok forrásait, a paraméterek javításának korlátait a 12. fejezetben tárgyaljuk.

3.1 A műveleti erősítők modelljei és tipikus paraméterei

A műveleti erősítők szokásos modelljeit a 3.1 ábra, a modellparaméterek tipikus értékeit pedig a 3.1 táblázat foglalja össze.

Egy műveleti erősítőt tartalmazó hálózatot általában úgy tervezünk, hogy a névleges műszaki jellemzők számításakor először ideális műveleti erősítőt tételezzünk fel. Ezért a névleges (vagy ideális) tulajdonságok meghatározásakor a műveleti erősítőt a 3.1.a ábrán látható szimbólummal jelzett ideális műveleti erősítő modellel vesszük figyelembe. Mint ismert, az ideális műveleti erősítő végtelen feszültségerősítésű, végtelen bemeneti és zérus kimeneti ellenállású hibamentes erősítő. A végtelen erősítésből következik, hogy egy visszacsatolt struktúrában tetszőleges kimeneti feszültséghez mindig

$$u_1 = 0$$



3.1 ábra

A műveleti erősítő különböző szintű modelljei

bemeneti feszültség tartozik. A végtelen bemeneti impedancia miatt természetesen az $i_1 = 0$ feltétel is teljesül.

A műveleti erősítővel felépített visszacsatolt erősítő tulajdonságai eltérnek a névlegestől, mert az ideális műveleti erősítő nem realizálható. A visszacsatolt erősítő *átviteli és illesztési hibái* elsősorban a műveleti erősítő *véges és frekvenciafüggő erősítéséből*, *véges bemeneti impedanciáiból* és *nem zérus kimeneti ellenállásából* erednek. E hibák számításakor a 3.1.b ábra szerinti modellt célszerű használni.

A műveleti erősítő szimmetrikus feszültség-erősítésének zérus frekvenciás értéke, A_{us0} ha végtelenné nem is, de kellően nagyvá tehető (3.1 táblázat). Az erősítés azonban frekvenciafüggő, abszolút értéke nagyfrekvencián csökken és fázistolás lép fel. Mint a 2.3 szakaszban láttuk, a visszacsatolt erősítőket, így a műveleti erősítőket is gerjedés ellen kompenzálni kell (egy műveleti erősítőben a törésponti frekvenciák száma mindig több kettőnél). Egy megfelelő fázistartólékra kompenzált erősítő erősítése első közelítésben egyidőálló, azaz leírható az

$$A_{us}(s) = A_{us0} \cdot \frac{1}{1 + s/\omega_m} \quad (3.1)$$

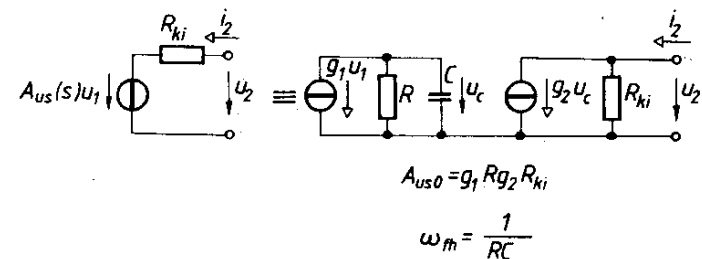
átviteli függvénnyel.

Műveleti erősítők paramétereinek tipikus értéktartománya (az aláhúzott értékek az univerzális műveleti erősítő típusokra jellemzőek)

Paraméter	Tipikus értéktartomány	Egység
A_{us0}	$10^4 \dots 10^5 \dots 10^8$	
f_{A1}	$0,1 \dots 1 \dots 100$	MHz
$ E_{ku} $	$66 \dots 86 \dots 120$	dB
R_{bes}	$0,1 \dots 1 \dots 10^6 \dots 10^7$	ohm
R_{bek}	$100 \dots 10^6 \dots 10^9$	ohm
C_{bes}	$1 \dots 5$	pF
C_{bek}	$0,8 \dots 5$	pF
R_{ki}	$60 \dots 75 \dots 200 \dots 1500$	ohm
U_0	$0,01 \dots 5 \dots 25$	mV
α_{VT}	$0,2 \dots 10 \dots 50$	$\mu V/^\circ C$
E_{PUT}	$70 \dots 86 \dots 120$	dB
I_b	$0,0001 \dots 0,05 \dots 200 \dots 500$	nA
I_0	$(0,1 \dots 0,2) \cdot I_b$	nA
U_{nw}	$3 \cdot 10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-7}$	V/\sqrt{Hz}
f_{ku}	$2 \dots 100 \dots 1000$	Hz
I_{nw}	$10^{-15} \dots 10^{-14} \dots 10^{-12} \dots 10^{-11}$	A/\sqrt{Hz}
f_{ki}	$150 \dots 1500 \dots 5000$	Hz
$U_{ki(max)}$	$\pm [U_T - (1 \dots 3)]$	V
$I_{ki(max)}$	$10 \dots 20 \dots 100$	mA
SR	$0,1 \dots 0,5 \dots 5 \dots 100$	$V/\mu s$
$U_{bek max}$	$\pm [U_T - (1 \dots 3)]$	V
$U_{be max}^+$	$\pm U_T$	V
U_{Tmin}	$\pm 1,5 \dots \pm 4,5 \dots \pm 9$	V
U_{Tmax}	$\pm 18 \dots \pm 150$	V

Megjegyzés

Ha a 3.1.b ábra szerinti modellben $A_{us}(s)$ -t a 3.1 összefüggéssel akarjuk figyelembe venni, és a modellt olyan számítógépes analízis programban kívánjuk használni, amelyben az $A_{us}(s)$ átviteli függvény megadása nem lehetséges, az erősítés egyidőálló közelítését egy új, RC-tagot tartalmazó csomópont beiktatásával modellezhetjük. Ezért ilyenkor a 3.1.b ábra kimeneti generátora helyett a 3.2 ábrán látható áramkört kell alkalmazni. Természetesen hasonló elven több független időálló is modellezhető.



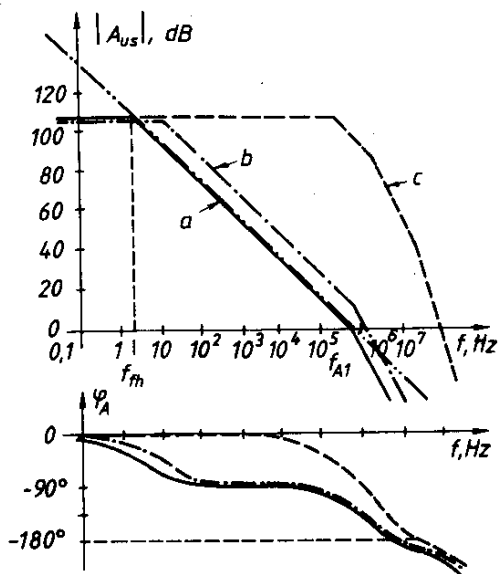
3.2 ábra
A 3.1.b ábra modelljének kiegészítése az erősítés frekvenciafüggésének egyidőálló közelítésével

$$A_{us0} = g_1 R g_2 R_{ki}$$

$$\omega_m = \frac{1}{RC}$$

3.3 ábra

Műveleti erősítők erősítésének frekvenciafüggése
 a) Belső kompenzációjú, b) $\beta_u = 0,2$ -re kompenzált, c) kompenzálás nélküli



Az integrált műveleti erősítők egy részét, a *belső kompenzálású műveleti erősítőket* megfelelő belső, integrált kompenzáló elemmel gyártják úgy, hogy a visszacsatolt erősítő a legkedvezőtlenebb esetben ($\beta_u = 1$, lásd a 2.3 szakaszi) se gerjedjen, és biztosítva legyen az általában 45° -os fázistartalék. Az erősítés abszolút értékének frekvenciakarakterisztikája ebben az esetben a 3.3 ábra a görbéje szerinti. A domináns törésponti frekvencia, f_{fh} a parazita törésponti frekvenciáknál több nagyságrenddel kisebb (sok műveleti erősítőnél < 10 Hz), az első parazita törésponti frekvencia f_{A1} felett van.

Megjegyzés

Ha egy alkalmazásban A_{us0} elegendően nagy ahhoz, hogy a műveleti erősítőt ideálisnak tekinthessük, de az erősítés frekvenciafüggése nem hanyagolható el, úgy az erősítést az $\omega \gg \omega_{fh}$ tartományban az alábbi átviteli függvényvel is leírhatjuk (integrátor-modell):

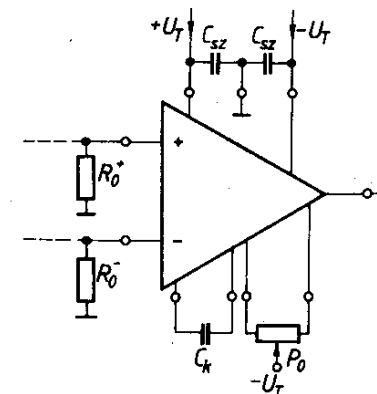
$$A_{us} \approx A_{us0} \cdot \frac{1}{s/\omega_{fh}} = \frac{\omega_{A1}}{s} \quad (3.2)$$

A (3.2) átviteli függvénynek megfelelő amplitúdókarakterisztikát a 3.3 ábrán kettős pont-vonallal jelöltük. A (3.2) összefüggés jól szemlélteti az f_{A1} egység-erősítés-frekvencia fontosságát.

A *külső kompenzálású műveleti erősítők* külső kompenzáló hálózat nélküli amplitúdókarakterisztikája 3.3.c ábra görbéjének megfelelő, a szükséges eredő

3.4 ábra

Műveleti erősítő tápfeszültség hozzávezetésekkel, tápfeszültségűző (C_{sz}) és kompenzáló (C_k) kapacitásokkal, ofszet-nullázó potenciométerrel és a bemenetre csatlakozó hálózat egyenáramú belső ellenállását jelképező munkapontbeállító ellenállásokkal



frekvenciamenet a mindenkor visszacsatolástól függően külső kompenzáló elemekkel (kapacitásokkal) állítható be. Egyes típusok tartalmaznak belső kompenzáló elemet is, de a $\beta_u = 1$ esetben további külső kompenzáló elem kell a stabilitás biztosítására (3.2 ábra b görbéje). Az univerzális külső kompenzálású műveleti erősítőknél a kívánt frekvenciamenet egyetlen külső C_k kompenzáló kapacitás megfelelő megválasztásával hozható létre (3.4 ábra).

A műveleti erősítők *bemeneti impedanciája* számos esetben tekinthető valósnak. A műveleti erősítők adatlapja $R_{be.s}$ értékét mindig tartalmazza, $R_{be.k}$ értékét azonban általában nem. Számításainkban gyakran tekintjük végtelennek. A bemeneti kapacitás értékét is ritkán találjuk meg az adatlapokon. Figyelembevétele – a táblázatban közölt közelítő adatokkal – gyors műveleti erősítőknél és nagyellenállású külső hálózatok esetén lehet indokolt.

A műveleti erősítő véges *közös feszültségennyomási tényezőjének* modellezésére a 3.1.c ábra szerinti modellt használhatjuk. Itt a közös bemeneti feszültségből adódó jelösszetevőt szimmetrikus hibagenerátorként vesszük figyelembe. Magát a műveleti erősítőt tekinthetjük ideálisnak, vagy a 3.1.b ábra szerinti módon modellezhetjük. Itt jegyezzük meg, hogy a műveleti erősítő bemeneti és kimeneti feszültségeit, áramait a továbbiakban – a visszacsatolt erősítő be- és kimeneti jellemzőitől megkülönböztetendő – 1, ill. 2 index-szel látjuk el. A 3.1 ábra jelöléseivel a műveleti erősítő bemeneti kapcsainak földhöz képesti feszültségeiből a szimmetrikus és közös összetevő az alábbiak szerint számítható:

$$u_1 = u_1^+ - u_1^-, \quad u_{1k} = \frac{u_1^+ + u_1^-}{2} \quad (3.3)$$

A visszacsatolt erősítők eredő *nullhibájának* számításakor a műveleti erősítőt a 3.1.d, míg az eredő *zaj* számításakor a 3.1.e ábra szerinti modellel célszerű figyelembe venni.

A 3.1 táblázat az ofszet feszültség tipikus, nullázás nélküli értékeit tartalmazza. Az integrált műveleti erősítők többségénél azonban ez a feszültség külső

kompenzáló körrel adott környezeti feltételek mellett (hőmérséklet, tápfeszültség) és adott időpontban nullázható (pl. a 3.4. ábra P_0 ofszet-nullázó potenciométere). Ilyenkor a hőmérsékleti és tápfeszültség-driftből kell a működési hőmérséklet-tartományban és a tápfeszültség változási tartományban az ofszet feszültség legkedvezőtlenebb értékét kiszámítani.

A munkaponti bemeneti áramnak az ofszet feszültségtől független nullázása külső áramforrással lehetséges, de erre csak különleges követelmények esetén van szükség. Ha ugyanis a bemeneti kör egyenáramú ellenállása állandó, úgy a feszültség-ofszet kiegyenlítésére szolgáló potenciométerrel a bemeneti áram hatását is tartalmazó eredő kimeneti nullhiba kompenzálható.

A bemeneti és ofszet áram hőmérsékletfüggése az egyes típusok katalógusainak diagramjaiból határozható meg.

Megjegyzés

A műveleti erősítők a bemeneti erősítők fokozatok felépítése, illetve a bemeneti hibaáramok szempontjából két fő csoportba sorolhatók. A bipoláris tranzistoros bemenetű műveleti erősítők bemeneti hibaáramai viszonylag nagyok, de a hőmérséklet növekedésével közel lineárisan csökkennek. A JFET vagy MOS tranzistoros bemenetű műveleti erősítők hibaáramai szobahőmérsékleten több nagyságrenddel kisebbek az előbbieknél, a hőmérséklet növekedésével azonban e hibaáramok exponenciálisan nőnek (MOS tranzisztor esetén voltaképpen a védődiodák áramáról van szó).

A 3.1 ábra modelljeinek használatával egy-egy hálózat eredő átviteli hibáját és zaját több lépésben határozzuk meg. A számításainkat természetesen végezhetnénk úgy is, hogy valamennyi jellemzőt egyetlen modellbe építjük be. Így azonban számításaink meglehetősen bonyolulttá válnának és egyes esetekben felesleges számításokat is elvégeznénk (egy-egy konkrét esetben nem minden hibajellemző ismerete szükséges). Ugyanakkor a hibák számításánál a műveleti erősítő számos nemideális tulajdonsága érdektelen, azok figyelembevétele számottevően nem módosítaná eredményeinket. Így például az eredő nullhiba számításánál felesleges a műveleti erősítő véges erősítésének vagy véges bemeneti impedanciáinak figyelembevétele. Ezért a 3.1.c, d, e modelleknél a fontosnak tartott hibajellemzőt hibagenerátorként kiemelve az ideális műveleti erősítő modellt használjuk.

A 3.1 ábra szerinti modellek lineáris hálózat leírására alkalmasak. Ismert azonban, hogy a műveleti erősítők lineáris működési tartománya korlátozott. Egyrészt bizonyos feszültség- és áramértékek túllépése után az erősítő nemlineáris válik, másrészt bizonyos – főleg bemeneti – feszültségek túllépésekor a műveleti erősítő tönkremegy. E határok betartását az erősítők tervezésekor ellenőrizni kell.

A lineáris működés határa a műveleti erősítő *maximális kimeneti feszültsége*, amely függ az alkalmazott tápfeszültségtől. A műveleti erősítők többsége szim-

metrikus kéttápfeszültséges táplálást kíván. A 3.1 táblázatban a tipikus megengedett tápfeszültségtartományokat is feltüntettük. A *maximális kimeneti áramot* a műveleti erősítő tönkremenetelének megakadályozására beépített túláramvédő áramkör működése szabja meg, e határ túllépésekor az erősítő nemlineárisra és a kimenet feszültségforrás-jellegűből áramforrás-jellegűvé válik. Természetesen minél jobban megközelítjük a működés során a maximális kimeneti feszültséget, ill. áramot, annál nagyobb lesz a visszacsatolt erősítő linearitási hibája.

A *maximális közös bemeneti feszültség* túllépése is nemlineáris tartományba vezérli az erősítőt. A *maximális megengedett szimmetrikus* vagy *aszimmetrikus bemeneti feszültség* túllépése viszont az erősítő tönkremenését eredményezheti.

A műveleti erősítő dinamikus kivezélhetőségére a *slew-rate* jellemző. Mivel a *slew-rate* függ a gerjedés elleni kompenzálástól, a katalógusok értékét a $\beta_u = 1$ esetre kompenzált műveleti erősítőre adják meg (3.1 táblázat).

A műveleti erősítő gyártó cégek katalógusaikban általában az egyes modellparaméterek tipikus és/vagy legkedvezőtlenebb értékeit adják meg. Ha biztonságos tervezésre törekszünk, úgy a legkedvezőtlenebb értékekkel számolunk (*legrosszabb esetre történő*, angol elnevezéssel *worst-case tervezés*). Jegyezzük meg, hogy a kiegyenlítetlenségből származó hibajellemzők például tetszőleges előjelűek lehetnek, így a legrosszabb esetre tervezéskor több ilyen jellegű hibajellemző egyidejű hatását az abszolút értékek összegzésével kell figyelembe venni. Ilyen jellemzők: E_{ku} , U_0 és annak megváltozásai (α_{UT} , E_{UUT}), a zajadatok (itt teljesítményösszegzés szükséges).

A 3.1 táblázatban közölt, a műveleti erősítő nemideális tulajdonságaira jellemző paraméterek forrásait, azok javításának korlátait a későbbiekben (12. fejezet) tárgyaljuk. Később igazoljuk azt is, hogy a táblázatban feltüntetett paraméterek legkedvezőbb értékei nem realizálhatók egyidejűleg egyetlen típusban. Az egymásnak ellentmondó követelmények teljesítése során létrejöttek ún. *univerzális műveleti erősítő típusok* (jellegzetes paramétereik a táblázatban aláhúzással szerepelnek), továbbá *precíziós típusok* (több változatuk van, de tipikusan nagy erősítéssel, kis nullhibával és kis zajjal, de rossz nagyfrekvenciás tulajdonságokkal rendelkeznek), valamint *nagysebességű típusok* (jó nagyfrekvenciás tulajdonságok, nagy *slew-rate*, de viszonylag kis erősítés és nagy additív zavarjelek).

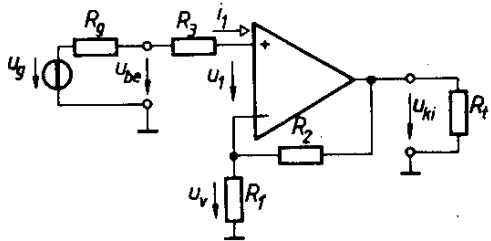
A 3.4 ábrán látható a műveleti erősítő jelképi jelölése, kiegészítve azt a gyakorlati alkalmazások szempontjából fontos külső elemekkel. A P_0 ofszetnullázó potenciométerről, a C_k gerjedés elleni kompenzáló kapacitásról és a szimmetrikus tápfeszültség-igényről már tettünk említést. A C_{sz} szűrőkondenzátorok szerepe a tápfeszültség-hozzávezetések induktivitása miatti gerjedési veszély elhárítása. Az R_0^+ , R_0^- ellenállások az I_b^+ , I_b^- munkaponti áramok számára biztosítják a műveleti erősítő bemenetei és a föld közötti egyenáramú áramutat (galvanikus kapcsolatot).

Az erősítő alapkapsolások most következő tárgyalásakor az alábbi sorrendet tartjuk szem előtt:

- a névleges feszültségerősítés számítása,
- a statikus erősítéshiba számítása,
- a dinamikus átviteli hiba számítása,
- az illesztési jellemzők számítása,
- a nullhiba számítása,
- a zaj számítása,
- tervezési szempontok, kapcsolási változatok számbavétele.

3.2 A neminvertáló alapkapsolás

A műveleti erősítővel megvalósított neminvertáló erősítő alapkapsolás a 3.5 ábrán látható. A kapsolás a 2.27.c ábrán bemutatott kapsolás rezisztív visszacsatoló hálózattal megvalósított változata, tehát frekvenciafüggetlen negatív soros feszültségvisszacsatolással ellátott műveleti erősítő kapsolás. A kapsolásban az R_3 ellenállás szerepe másodlagos, a nullhiba csökkentését szolgálja, az átviteli tulajdonságokat gyakorlatilag nem befolyásolja.



3.5 ábra
A neminvertáló erősítő alapkapsolás

a) A névleges erősítés

A névleges erősítés számításához:

$$\alpha_{uü} = 1; \quad \beta_{uü} = \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

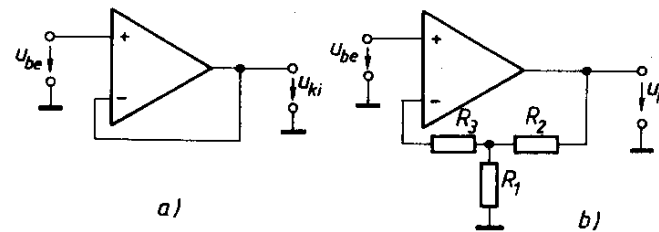
azaz

$$A_{uN} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

Hasonló eredményre jutunk, ha elemi megfontolással, $u_1 = 0$ feltételezésével felírjuk, hogy

$$u_{be} = u_v = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{ki}$$

Ha a neminvertáló alapkapsolásban $R_1 \rightarrow \infty$ választással élünk, úgy $A_{uN} = 1$. Az így létrehozott erősítő kapsolást (3.6.a ábra) követő erősítőnek nevezzük (kimenete mintegy lemásolja, követi a bemeneti potenciál változásait). A követő erősítő impedanciáttranszformálási feladatokat lát el.



3.6 ábra

A neminvertáló alapkapsolás kapcsolási változatai
a) Követő erősítő, b) a nullhiba-kompenzáló R_3 ellenállás helye nagy generátorellenállás esetén

b) A statikus erősítéshiba

Statikus erősítéshibát az R_1 , R_2 ellenállások értékének a névlegestől való eltérése és a véges zérusfrekvenciás hurokerősítés okoz. Legrosszabb esetben, kis hibákat feltételezve

$$|h_{se}|_{max} = \frac{A_{uN} - 1}{A_{uN}} \cdot (|h_{R1}|_{max} + |h_{R2}|_{max}) + |h_H|_{max} \quad (3.5)$$

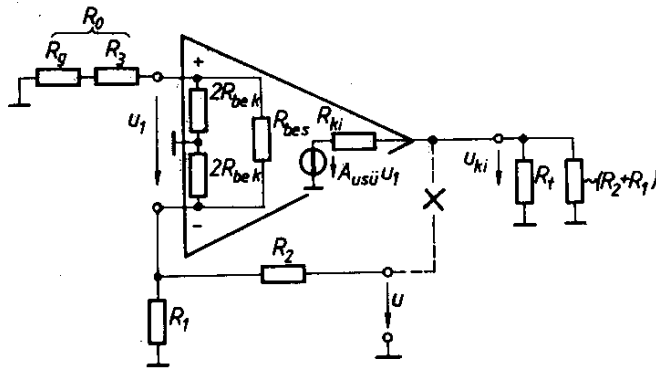
ahol

$$|h_H|_{max} = \frac{1}{H_{0min}} \quad (3.6)$$

A hurokerősítés a 3.7 ábrán látható helyettesítőkép alapján határozható meg:

$$\beta_u = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{2R_{bek}}{2R_{bek} + R_1 \times R_2} \cdot \frac{R_{bes}}{R_{bes} + R_1 \times R_2 \times (2R_{bek}) + R_0 \times (2R_{bek})} \quad (3.7)$$

$$A_{us0} = A_{us0ü} \cdot \frac{R_t \times (R_1 + R_2)}{R_{ki} + R_t \times (R_1 + R_2)}$$



3.7 ábra

A neminvertáló alapkapcsolás hurokerősítésének meghatározása

A véges hurokerősítés miatti hiba tehát:

$$h_H = -\frac{1}{A_{us0i}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_1 \times R_2 + R_0}{R_{bes}}\right) \left(1 + \frac{R_1 \times R_2}{2R_{bek}}\right) \left(1 + \frac{R_{ki}}{R_i \times (R_1 + R_2)}\right) \quad (3.8)$$

A neminvertáló erősítőnél az R_1 , R_2 ellenállásokat viszonylag kis értékre célszerű választani (3.2.g szakasz), ezért gyakorlatilag mindig igaz az

$$R_1 \times R_2 \ll 2R_{bek}, \quad \text{és} \quad R_3 \ll 2R_{bek} \quad (3.9)$$

közelítés, és így az összefüggés értelemszerűen egyszerűsödik.

Gyakorlati számításokban azonban a legtöbb esetben az R_{bes} véges és R_{ki} nem zérus értékét az üzemi feszültségerősítésben vesszük figyelembe, ezért számolhatunk a

$$h_H = -\frac{1}{A_{us0}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = -\frac{A_{uN}}{A_{us0}} \quad (3.10)$$

összefüggéssel. E kifejezés egyben az adott műveleti erősítővel, adott erősítéshiba esetén realizálható maximális névleges erősítés számítására is alkalmas.

c) A dinamikus átviteli hiba

A neminvertáló alapkapcsolás visszacsatoló hálózata frekvenciafüggetlen, így a gerjedés elleni kompenzáció és az eredő dinamikus tulajdonságok számítása a 2.5.c pont szerint történhet. Mivel itt $\alpha_u = 1$, azért a (2.63) egyenlet módosul és *belső kompenzálsú műveleti erősítőknél* az eredő 3 dB-es felső határ-körfrekvencia közelítő értéke

$$\omega_{fh}^* = \frac{\omega_{A1}}{A_{uN}} \quad (3.11)$$

Követő erősítőnél természetesen $\beta_u = 1$, ezért a hurokerősítés és a statikus erősítéshiba:

$$H_0 = A_{us0}, \quad |h_{se}|_{max} = \frac{1}{A_{us0min}} \quad (3.12)$$

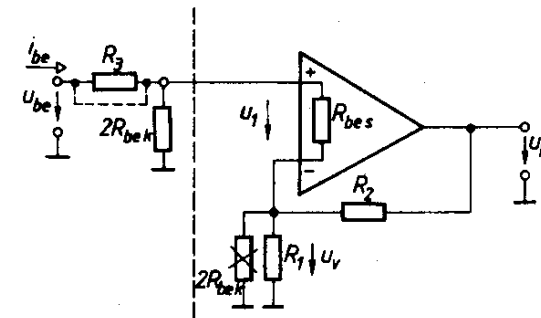
Belső kompenzálsú műveleti erősítőt tehát, ha a minél nagyobb felső határ-frekvencia követelmény, csak a követő erősítőknél célszerű alkalmazni.

d) A neminvertáló alapkapcsolás illesztési jellemzői

A neminvertáló alapkapcsolás *bemeneti ellenállása ideális műveleti erősítő feltételezésével végtelen* (mert $i_1 = i_{be} = 0$). A műveleti erősítő nemideális tulajdonságait a 3.1.b modellel vehetjük figyelembe.

A 3.8 ábra mutatja az eredő bemeneti ellenállás számítására alkalmas helyettesítő kapcsolást. A b pontban már használt (3.10) közelítésekkel felismerhető, hogy R_{bek} közvetlenül terheli a jelforrást, míg a szaggatott vonal mögötti hálózat ellenállása a soros feszültségvisszacsatolás következtében az R_{bes} hurokerősítés-szerese. Így

$$R_{be}^* = 2R_{bek} \times [R_{bes}(1 + H_0)] \quad (3.13)$$



3.8 ábra

Modell a neminvertáló alapkapcsolás eredő bemeneti ellenállásának meghatározására

A műveleti erősítők tipikus bemeneti ellenállásértékeit figyelembe véve a *bemeneti ellenállás* $10^7 \dots 10^{12} \Omega$ értékű lehet, ami a legtöbb esetben elegendően nagy a jelforrás üresjárási üzemmódjának biztosítására. Ez a nagy bemeneti ellenállás azonban csak zérus frekvencián realizálható. Növekvő frekvenciával

mind a műveleti erősítő $C_{be,k}$ kapacitása, mind a hurokerősítés csökkenése miatt a bemeneti impedancia abszolút értéke csökken.

A kimeneti ellenállás ideális műveleti erősítő esetén zérus, a valódi műveleti erősítő nemzérus kimeneti ellenállása az üresjárású hurokerősítés mértékében lecsökken. (2.4; feszültség-visszacsatolás). Mivel a műveleti erősítő kis kimeneti ellenállása következtében az üzemi és az üresjárású hurokerősítés között nincs lényeges eltérés, továbbá a műveleti erősítő nagy bemeneti ellenállása miatt a generátorellenállás hatása (2.1. táblázat) is rendszerint elhanyagolható, az eredő kimeneti ellenállás

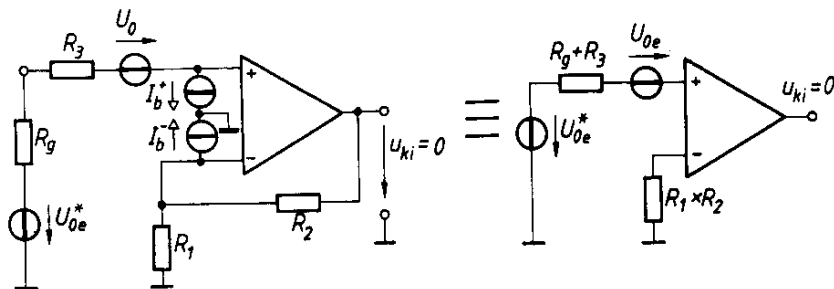
$$R_{ki}^* = \frac{R_{ki}}{1 + H_0} \quad (3.14)$$

A kimeneti ellenállás értéke a zérus frekvencián $< 0,1 \Omega$. A frekvencia növelésével a hurokerősítés frekvenciafüggése miatt a kimeneti impedancia abszolút értéke nő, jelentős frekvenciatartományban induktív jellegűvé válik, majd az $f \geq f_{H1}$ frekvenciatartományban a visszacsatolatlan műveleti erősítő kimeneti ellenállásához közelít.

e) A neminvertáló alapkapsolás nullhibája

A neminvertáló erősítő nullhibája a 3.2.d pont szerinti modell alkalmazásával a 3.9 ábra alapján számítható:

$$U_{0e}^* = U_{0e} = U_0 + I_b^+ (R_g + R_3) - I_b^- (R_1 \times R_2) \quad (3.15)$$



3.9 ábra

A neminvertáló alapkapsolás nullhibájának meghatározása

Neminvertáló kapcsolásban, ha a generátorellenállás nem túl nagy, kis R_1 , R_2 ellenállások választásával elérhető, hogy a bemeneti munkaponti áramok hatása elhanyagolható legyen. Ekkor R_3 ellenállásra nincs szükség. Egyébként a legkedvezőbb nullhibát az

$$R_3 = R_1 \times R_2 - R_g \quad (3.16)$$

választással érhetjük el. Ha $R_g > R_1 \times R_2$, az R_3 ellenállást az invertáló bemenetre kell áthelyezni (3.6.b ábra).

Érdeemes megjegyezni, hogy $\alpha_u = 1$ miatt a neminvertáló erősítőnél a jelerősítés és a zavarjel-erősítés azonos.

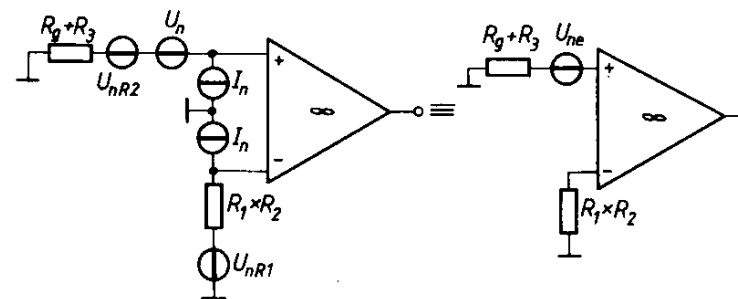
f) A neminvertáló alapkapsolás eredő zaja

A neminvertáló alapkapsolás zaja a 3.2.e modell alkalmazásával a 3.10 ábra alapján számítható. Mivel e kapcsolatban a beágyazó hálózat rezisztív, az eredő zajfeszültség négyzete a következőképpen írható fel:

$$U_{ne}^2 = U_n^2 + I_n^2 [(R_g + R_3)^2 + (R_1 \times R_2)^2] + U_{nR1}^2 + U_{nR2}^2 \quad (3.17)$$

ahol

$$U_{nR1}^2 = 4kT(R_g + R_3); \quad U_{nR2}^2 = 4kT(R_1 \times R_2) \quad (3.18)$$



3.10 ábra

A neminvertáló alapkapsolás eredő zajának meghatározása

külső ellenállások keskenysávú zajfeszültsége (fehérzajt feltételezve). Felhívjuk a figyelmet arra, hogy amíg az R_3 ellenállás segítségével a nullhiba csökkenthető, jelenléte egyben zajforrás is, a zaj szempontjából az $R_3 = 0$ választás a kedvező.

g) A visszacsatoló ellenállások megválasztása

A neminvertáló alapkapsolás R_1 , R_2 ellenállásainak arányát a névleges feszültségerősítésre, a két ellenállás pontosságát a statikus átviteli hibára vonatkozó előírások alapján kell megválasztani. A két ellenállás névértékének meghatározása az alábbi, egymásnak ellentmondó követelmények alapján történhet:

– Az R_1 , R_2 ellenállás legyen minél kisebb, mert így kicsi az ellenállások által létrehozott zaj, az I_b miatti nullhiba, és elhanyagolható az ellenállásokkal párhuzamosan kapcsolódó parazita kapacitások hatása.

– Az $(R_1 + R_2)$ ellenállás legyen elegendően nagy ahhoz, hogy ne terhelje túlságosan a műveleti erősítő kimenetét.

Mindenképpen teljesíteni kell az

$$\frac{U_{ki\max}}{R_{1\min} \times (R_1 + R_2)} < I_{ki\max} \quad (3.19)$$

feltételt, de minél kisebb a műveleti erősítő kimeneti árama, annál kisebb a linearitási hiba.

– Ha R_g viszonylag nagy, és a nullhiba kis értéke fontos, úgy az $R_1 \times R_2 = R_g$ választás előnye, hogy nem szükséges az R_3 ellenállás beiktatása.

FELADAT

F.3.1 A 3.F.1 ábrán látható kapcsolás elemértékei: $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 90 \text{ k}\Omega$. A műveleti erősítő jellemzői: $A_{us0} = 10^5$, $f_{fh} = 8 \text{ Hz}$, $R_{bes} = \infty$, $R_{bek} = \infty$, $R_{ki} = 0$.

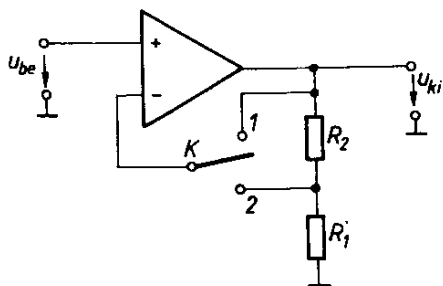
A) Határozza meg a zérusfrekvenciás feszültségerősítés és a felső határfrekvencia értékét a K kapcsoló 1. és 2. állásában!

B) Legyen az ellenállások tűrése 0,1%! A kapcsoló a 2. állásban van. Számítsa ki a statikus erősítéshiba maximális értékét

a) ideális műveleti erősítő esetén;

b) ha a műveleti erősítőre $A_{us0} = 10^5$, $R_{bes} = \infty$, $R_{bek} = \infty$, $R_{ki} = 0$;

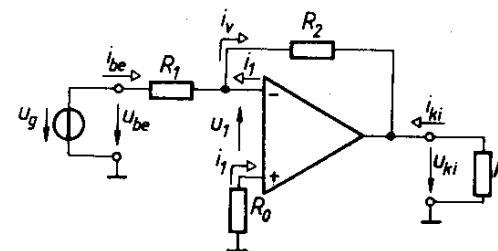
c) ha a műveleti erősítőre
 $A_{us0} = 10^5$, $R_{bes} = 1 \text{ M}\Omega$,
 $R_{bek} = 100 \text{ M}\Omega$, $R_{ki} = 200 \Omega$,
 $R_g = 1 \text{ k}\Omega$, $R_t = 2 \text{ k}\Omega$!



3.F.1 ábra
Átkapcsolható erősítésű erősítő

3.3 Az invertáló alapkapsolás

A műveleti erősítővel megvalósított invertáló erősítő alapkapsolás a 3.11 ábrán látható. E kapsolás a 2.27.e ábrán bemutatott kapcsolás rezisztív visszacsatoló hálózattal megvalósított változata. Az alkalmazott visszacsatolás nem sorolható a négy alaptípus (2.4 szakasz) egyikébe sem, ez a negatív párhuzamos feszültség-visszacsatolás egy bemeneti feszültség-áram átalakítással kibővített változata.



3.11 ábra
Az invertáló erősítő alapkapsolás

a) A névleges erősítés

A beágyazó hálózat üresjárási átviteli tényezői:

$$\alpha_{uü} = \frac{u_1}{u_{be}} \Big|_{u_{ki}=0} = - \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (3.20)$$

$$\beta_{uü} = \frac{u_1}{u_{ki}} \Big|_{u_{be}=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Az invertáló alapkapsolás névleges feszültségerősítése tehát:

$$A_{uN} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (3.21)$$

Hasonló eredményre jutunk, ha felhasználjuk az $u_1 = 0$ és $i_1 = 0$ összefüggéseket. Mivel az A pont ekkor virtuális földpont,

$$i_{be} = \frac{u_{be}}{R_1}; \quad i_v = - \frac{u_{ki}}{R_2}, \quad (3.22)$$

továbbá a bemeneti és a visszacsatoló áram azonos: $i_{be} = i_v$.

b) A statikus erősítéshiba

A statikus erősítéshiba az R_1 , R_2 ellenállások hibájából és a véges hurokerősítéshibából adódik.

$$|h_{se}|_{max} = |h_{R1}|_{max} + |h_{R2}|_{max} + |h_H|_{max}. \quad (3.23)$$

Ha a hurokerősítés meghatározásához a feszültségforrást rövidzárral helyettesítjük, az invertáló alkapcsolásra is a neminvertáló kapcsolásnál használt 3.7. ábra szerinti modellhez jutunk! Fontos felismerés az, hogy a neminvertáló és az invertáló alkapcsolásban a hurokerősítés azonos módon számítható. A két alkapcsolás közötti különbség a jelforrás helyében van: a neminvertáló kapcsolásnál a műveleti erősítő neminvertáló bemenete és a föld között található jelforrás, az invertáló kapcsolásban az $R_1 - R_2$ visszacsatoló osztó „talppontjában”, az R_1 ellenállással sorbakapcsolva jelenik meg. Az erősítéshiba tehát a (3.6) egyenlet alkalmazásával számítható.

Megjegyzés

Ha a követő erősítőhöz hasonlóan az invertáló alkapcsolással $A_{uN} = -1$ -szeres erősítést akarunk realizálni, ezt az $R_1 = R_2$ választással tudjuk elérni. Ekkor $\beta_u = 1/2$, és a hurokerősítés

$$H_0 = \frac{1}{2} \cdot A_{us0}, \quad (3.24)$$

azaz kisebb (tehát a statikus átviteli hiba nagyobb), mint a követő erősítőnél.

c) A dinamikus átviteli hiba

Az invertáló alkapcsolás visszacsatoló hálózata első közelítésben frekvenciafüggetlen, így a gerjedés elleni kompenzáció és az eredő dinamikus tulajdonságok számítása a 2.5.c pont szerint történhet. Az invertáló alkapcsolásnál $|\alpha_u| \neq 1$, de megjegyezzük, hogy nagy erősítésű erősítőnél az 1-től való eltérés nem jelentős, ezért az azonos erősítésű neminvertáló és az invertáló alkapcsolás kompenzálása és eredő dinamikus tulajdonságai között nincs jelentős eltérés. Kis erősítésnél azonban az eltérés már jelentős. Ha pl. azonos belső kompenzálású műveleti erősítővel valósítunk meg $+1$ -szeres, ill. -1 -szeres erősítésű erősítőt, az invertáló erősítő túlkompenzált lesz és az eredő 3 dB-es határfrekvencia a követő erősítő határfrekvenciájának felére adódik (2.63 egyenlet; $\alpha_u = 1$, ill. $\alpha_u = -1/2$). Invertáló alkapcsolásban tehát mindig kedvezőbb a külső kompenzálású műveleti erősítő alkalmazása.

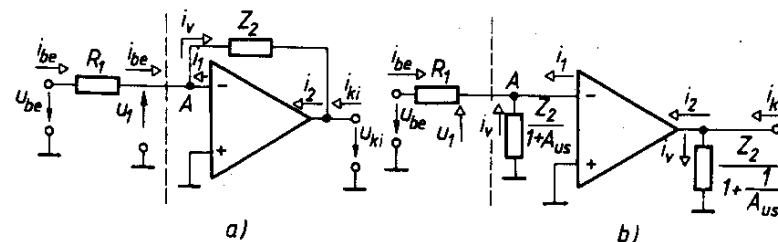
d) Az invertáló alkapcsolás illesztési jellemzői

Az invertáló erősítő alkapcsolás *bemeneti ellenállása* ideális műveleti erősítő feltételezésével egyszerűen számolható. Mivel a műveleti erősítő invertáló bemenete virtuális földpont, nyilvánvalóan

$$R_{be id}^* = R_1 \quad (3.25)$$

A műveleti erősítő véges erősítése következtében $u_1 \neq 0$, így a bemeneti ellenállás – ha a gyakorlatban elhanyagolható mértékben is –, de eltér az ideálistól. A 3.12.a ábrán ismét felrajzoltuk az invertáló kapcsolást, de azért, hogy eredményeinket később felhasználhassuk, az R_2 ellenállást Z_2 impedanciával cseréltük fel. A Z_2 impedancián folyó áram:

$$i_v = \frac{u_{ki} + u_1}{Z_2} = \frac{1 + A_{us}}{Z_2} u_1 = \left(1 + \frac{1}{A_{us}}\right) \cdot u_{ki}.$$



3.12 ábra

Magyarázó ábra az invertáló alkapcsolás bemeneti ellenállásának meghatározásához és a Miller-hatás bemutatására

az eredményünk felhasználásával a kapcsoláson ekvivalens átalakítást hajthatunk végre (3.12.b ábra), a Z_2 impedancia helyett az A pont és a föld között, továbbá a kimenet és a föld közé helyezett olyan impedanciát alkalmazva, amelyek azonos i_v áramot hoznak létre.

Látható, hogy ha egy erősítő (itt: műveleti erősítő) bemenete és kimenete között egy Z impedanciát kapcsolunk, az a számítások során helyettesíthető egy, a bemenetre kapcsolt, lényegében az erősítés mértékében letranszformált impedanciával, továbbá egy, a kimenetet terhelő, kisebb mértékben letranszformált nagy erősítésnél transzformálás nélküli impedanciával. Ezt a jelenséget, amelyet a későbbiekben még felhasználunk, *Miller-hatásnak* nevezzük.

Nyilvánvaló, hogy ideális műveleti erősítő esetén a műveleti erősítő invertáló bemenetére zérus impedancia transzformálódik (ezért $u_1 = 0!$).

Eredményeink felhasználásával az invertáló erősítő valódi bemeneti ellenállása, a műveleti erősítő 3.1.b modelljét is szem előtt tartva, a következő:

$$R_{be}^* = R_1 + R_{bes} \times 2R_{bek} \times \frac{R_2}{1 + A_{us}} \approx R_1 + \frac{R_2}{1 + A_{us}} \approx R_1. \quad (3.26)$$

Az invertáló erősítő bemeneti ellenállása a neminvertálóval szemben kapcsolási elemtől függ. Az R_1 ellenállás a nullhiba és a zaj miatt nem választható tetszőlegesen nagyra, ezért a neminvertáló alkapcsolás viszonylag kis bemeneti ellenállású.

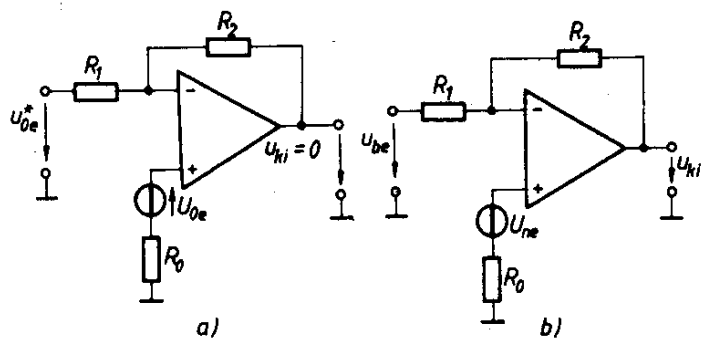
A kimeneti ellenállás ideális műveleti erősítő esetén zérus (feszültség-visszacsatolás), a valódi kimeneti ellenállás a neminvertáló kapcsolással azonos módon számítható (3.14).

e) Az invertáló alkapcsolás nullhibája

Az invertáló alkapcsolás nullhibája a már megismert módszerrel, a 3.1.d ábra modelljének felhasználásával számítható. Első lépésben a műveleti erősítő neminvertáló bemenetére redukált U_{0e} ofszet feszültséget határozhatjuk meg (3.13.a ábra):

$$U_{0e} = U_0 + I_b^+ \cdot R_0 - I_b^- (R_1 \times R_2) \quad (3.27)$$

A nullhiba csökkentése érdekében célszerű az $R_0 = R_1 \times R_2$ választás.



3.13 ábra

Az invertáló alkapcsolás additív zavarjelei

a) A műveleti erősítő neminvertáló bemenetére redukált eredő ofszet feszültség, b) a műveleti erősítő bemenetére redukált keskenysávú zajfeszültség

A visszacsatolt erősítő bemenetére redukált ofszet feszültség:

$$U_{0e}^* = - \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) U_{0e} \quad (3.28)$$

Mivel invertáló erősítőnél a zavarjel-erősítés nagyobb, mint a jelerősítés, a bemenetre redukált nullhiba nagyobb, mint a műveleti erősítő bemenetére redukált hiba. Ez a feltranszformálási tényező azonban nagy erősítéseknel jelentéktelen, legrosszabb esetben kétszeres ($A_{uN} = -1$).

f) Az invertáló alkapcsolás eredő zaja

Az invertáló alkapcsolás eredő zajának számítása során is első lépésben a műveleti erősítő bemenetére redukált eredő zajspektrumot határozzuk meg (3.13.b ábra).

A 3.1.e ábra szerinti modellel, az előző pontban ismertetett módszer szerint értelemszerűen:

$$U_{ne}^2 = U_n^2 + I_n^2 [(R_0)^2 + (R_1 \times R_2)^2] + U_{nR1}^2 + U_{nR2}^2, \quad (3.29)$$

ahol U_{nR1} az R_0 , U_{nR2} az $R_1 \times R_2$ ellenállások keskenysávú zajfeszültsége.

Mivel $|\alpha_u| < 1$, a zajerősítés nagyobb, mint a jelerősítés (a zajerősítés a neminvertáló alkapcsolás erősítésével azonos).

g) Az invertáló alkapcsolás kapcsolási változatai

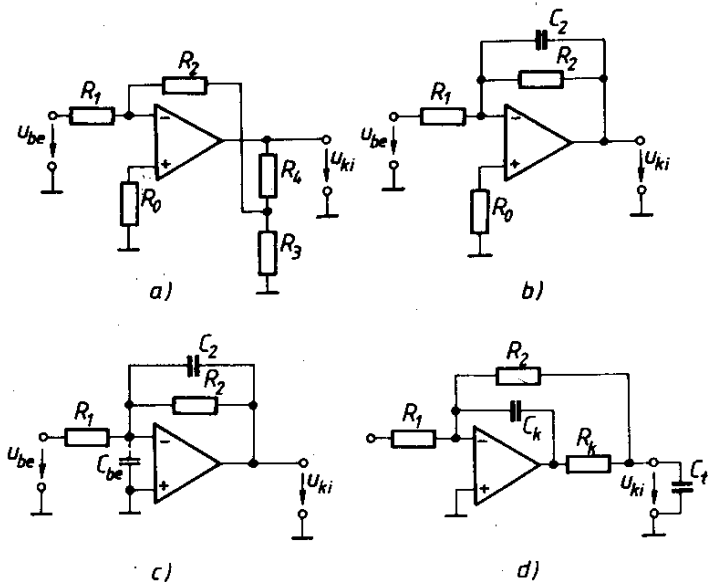
Ha az invertáló alkapcsolással nagy bemeneti ellenállást és nagy feszültség-erősítést kell elérni, úgy irreálisan nagy R_2 ellenállást kellene alkalmazni. Ennek kerülésére alkalmazhatjuk a 3.14.a ábra szerinti kapcsolást, ahol

$$R_{be}^* = R_1; \quad A_{uN} = - \frac{R_2 + R_3 \times R_4}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right). \quad (3.30)$$

Ha az alkapcsolással a c szakasz szerint számíthatónál kisebb felső határfrekvencia szükséges, a névleges erősítést frekvenciafüggővé tehetjük a 3.14.b ábra szerint. Ekkor:

$$A_{uN} = - \frac{Z_2}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + s/\omega_{fh}}, \quad (3.31)$$

ahol $\omega_{fh} = \frac{1}{R_2 C_2}$.



3.14 ábra

Az invertáló alapkapsolás változatai

a) Alapkapsolás nagy feszültségerősítéssel, b) alapkapsolás kis felső határfrekvenciával, c) a bemeneti kapacitás hatásának kompenzálása, d) a terhelő kapacitás hatásának kompenzálása

Invertáló erősítőnél gyakori, hogy viszonylag nagy ellenállásokat kell alkalmazni, elsősorban a nagy bemeneti ellenállás elérésére. Ekkor gerjedési problémát okozhat a műveleti erősítő eddig elhanyagolt bemeneti kapacitása (3.14.c ábra), a hurokerősítésben ugyanis egy újabb el nem hanyagolható törési frekvencia keletkezhet. Hatása kiküszöbölhető túlkompenzálással, vagy a 3.14.c ábrán látható, az R_2 ellenállással párhuzamosan kötött kapacitással. Így ugyanis a visszacsatolási tényező frekvenciafüggetlenné tehető ($R_1 C_{be} = R_2 C_2$). Fontos azonban megjegyezni, hogy a kompenzálás következtében a névleges erősítést is frekvenciafüggővé tettük (a 3.31 egyenlethez hasonlóan!).

Gerjedési problémát okozhat egy kapcsolásban a nagy terhelő kapacitás is, mert a műveleti erősítő kimeneti ellenállásával egy újabb parazita törési frekvenciát hoz létre. A 3.14.d ábra egy kompenzálási lehetőséget mutat be. A kompenzálás feltétele:

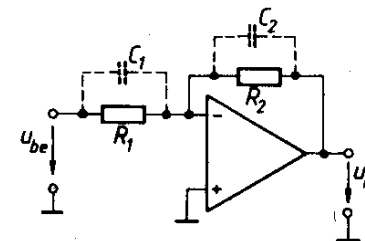
$$C_k = C_i \cdot \frac{R_{ki} + R_k}{R_2} \quad (3.32)$$

Az eddigiekben ideálisnak tekintettük a visszacsatoló ellenállásokat. Ismert azonban, hogy a gyakorlatban megvalósított ellenállások parazita reaktanciái bizonyos frekvenciatartományban nem hanyagolhatók el. Az invertáló erősítő-

ben használt, viszonylag nagy értékű (általában $\geq 10 \text{ k}\Omega$) ellenállásoknál a párhuzamos kapacitás okozhat pótlólagos dinamikus átviteli hibát. A névleges erősítés frekvenciafüggetlenné tehető, ha a párhuzamos parazita kapacitásokat külső kapacitással úgy egészítjük ki, hogy az

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (3.33)$$

azonosság létrejöjjön (3.15 ábra).



3.15 ábra

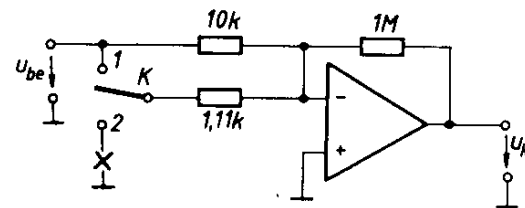
az R_1 és R_2 ellenállások párhuzamos parazita kapacitásai

TELEPÍTÉSI FELADATOK

3.2 A 3.F.2 ábrán látható kapcsolásban szereplő műveleti erősítőt tekintse időállandóságnak az alábbi paraméterekkel:

$$A_{us0} = 100 \text{ dB}, \quad f_{fh} = 15 \text{ Hz}, \quad R_{bes} = \infty, \quad R_{bek} = \infty, \quad R_{ki} = 0.$$

Számítsa ki a kapcsolás eredő zérusfrekvenciás névleges feszültségerősítését (A_{us0}), a statikus erősítéshibát és az eredő felső határfrekvencia értékét a kapcsoló 1. és 2. állásában!



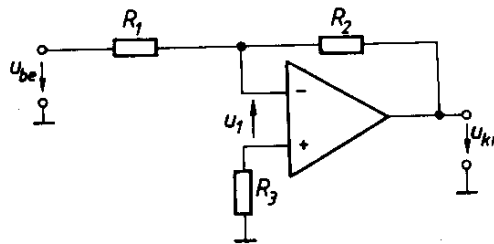
3.F.2 ábra

Átkapcsolható erősítésű erősítő

3.3 Egy műveleti erősítő közös feszültségnyomási tényezője $|E_{kw}| = 80 \text{ dB}$, althorokú feszültségerősítése $|A_{us0}| = 100 \text{ dB}$, a többi paramétere ideális. Mekkora hibát okoz a véges közösjel-elynyomás, ha a fenti műveleti erősítő felhasználásával

- neminvertáló alapkapsolást,
- invertáló alapkapsolást építünk?

F.3.4 A 3.F.3 ábrán látható kapcsolás elemértékei legyenek $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 9,1 \text{ k}\Omega$. A műveleti erősítőre: $R_{be,s} = 1 \text{ M}\Omega$, $A_{us0} = 10^5$, $R_{ki} = 200 \Omega$, $E_{ku} = \infty$, $R_{be,k} = 100 \text{ M}\Omega$.
Mekkora lesz a kapcsolás bemeneti ellenállása?

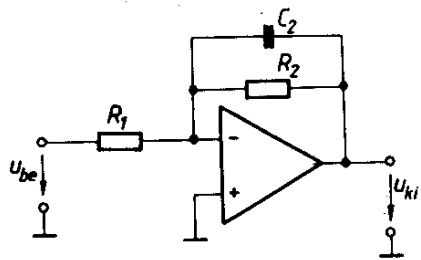


3.F.3 ábra
Invertáló alapkapcsolás

F.3.5 Írja fel a 3.F.4 ábrán látható kapcsolás ideális átviteli függvényét! Számítsa ki R_1 , R_2 és C_2 szükséges értékét, ha az alábbi előírásokat kell teljesíteni:

$$A_{uN0} = -10, \quad R_{be}^* = 10 \text{ k}\Omega, \quad f_{fh}^* = 1 \text{ kHz.}$$

(A műveleti erősítőt tekintse ideálisnak.)

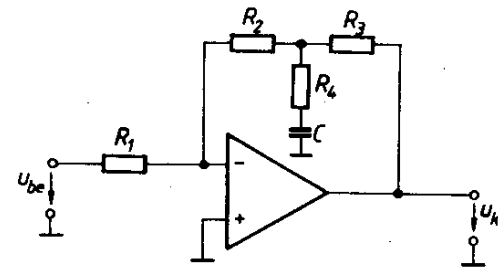


3.F.4 ábra
Invertáló erősítő kapcsolás, frekvenciafüggő visszacsatolással

F.3.6 Adott a 3.F.5 ábrán látható feszültségerősítő.

a) Írja fel az átviteli függvényt a frekvencia függvényében! (A műveleti erősítőt tekintse ideálisnak.)

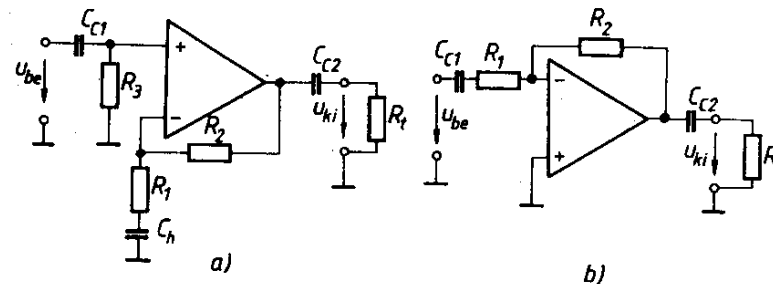
b) Adja meg a hurokerősítést a frekvencia függvényében és ábrázolja Bode-diagramon jellegre helyesen! (A műveleti erősítő zérusfrekvenciás feszültségerősítése véges, többi paramétere ideális.)



3.F.5 ábra
Invertáló erősítő kapcsolás, frekvenciafüggő visszacsatolással

3.4 Szélessávú váltakozófeszültségű erősítő alapkapcsolások

Amennyiben egy erősítő bemenetére jutó jel nem tartalmaz egyenfeszültségű részen kívül kisfrekvenciás összetevőt, úgy a zérus frekvenciás átvitel a 3.16 ábrán látható kapcsolások segítségével, a jelforrás és az erősítő, illetve az erősítő bemenete és a terhelés közé iktatott csatoló kondenzátorokkal megszüntethető. A kapcsolás bonyolultabbá válását egy jelentős additív zavarforrásnak, a nullpontnak a megszűnése kompenzálja.



3.16 ábra
Váltakozófeszültség-erősítő kapcsolások műveleti erősítővel

A kondenzátorok kapacitását úgy kell megválasztani, hogy a megkívánt frekvencia tartományban impedanciájuk a hálózat egyéb ellenállásaihoz képest zérusnak legyen tekinthető. Az átviteli sávban tehát valamennyi kondenzátor rövidzárnak tekintve látható, hogy a 3.16.a ábra szerinti kapcsolás nem-invertáló alapkapcsolás, névleges erősítése:

$$A_{uNO} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.34)$$

A 3.16.b ábrán egy invertáló alapkapsolás látható, ahol az átviteli sávban

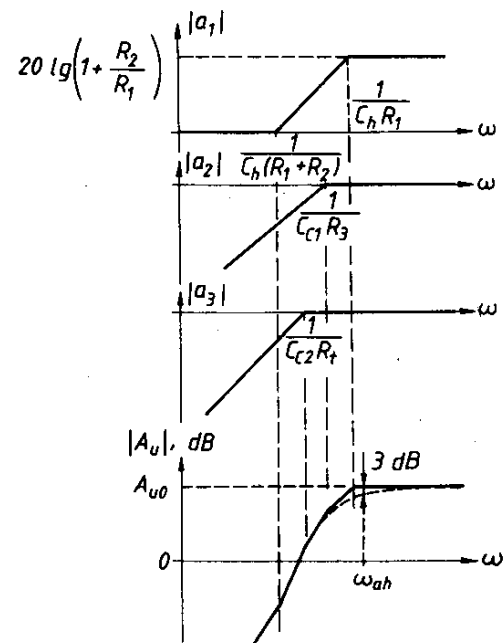
$$A_{uNO} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.35)$$

Zérus frekvencián a kondenzátorokat szakadással helyettesíthetjük, így nyilvánvaló, hogy jelátvitel nincs.

Kisfrekvencián az alkalmazott kondenzátorok természetesen frekvenciafüggővé teszik az erősítést. Ideális műveleti erősítőt feltételezve az eredő átvitel a neminvertáló kapcsolásra:

$$\begin{aligned} A_{uN} &= \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{sC_{c1}}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC_h}} \right) \frac{R_t}{R_t + \frac{1}{sC_{c2}}} = \\ &= \frac{sC_{c1}R_3}{1 + sC_1R_3} \frac{1 + sC_h(R_1 + R_2)}{1 + sC_hR_1} \frac{sC_{c2}R_t}{1 + sC_{c2}R_t} \end{aligned} \quad (3.36)$$

A 3.17 ábrán az egyes tényezők, majd az egész erősítés amplitúdókarakterisztikája látható. Nyilvánvaló, hogy az alkalmazott kondenzátorok hatására az erősítés kisfrekvencián a független időállandók számától függő meredekséggel csökken. A 3 dB-es alsó határfrekvencia jelöli ki az átviteli frekvenciasáv alsó határát.



3.17 ábra

A 3.16.a ábrán látható erősítő erősítésének amplitúdókarakterisztikája és annak összetevői kisfrekvencián

Az invertáló alapkapsolásra

$$A_{uN} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC_{c1}}} \frac{R_t}{R_t + \frac{1}{sC_{c2}}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{sC_{c1}R_1}{1 + sC_{c1}R_1} \frac{sC_{c2}R_t}{1 + sC_{c2}R_t} \quad (3.37)$$

Megjegyzések

Az alapkapsolások nagyfrekvenciás tulajdonságai a szélessávú egyenfeszültség-erősítő alapkapsolásokéval azonosak (3.2.c és 3.3.c szakasz).

A műveleti erősítő I_b^+ és I_b^- munkaponti egyenáramai számára a föld felé mindig biztosítani kell az egyenáramú áramutat. Ezért szükséges a 3.16.a ábrán az R_3 ellenállás.

A műveleti erősítő számára mindig biztosítani kell az egyenáramú negatív visszacsatolást is. A 3.16 ábra kapcsolásaiban a kondenzátorokat szakadással helyettesítve felismerhető a $\beta_u = 1$ visszacsatolási tényezőjű erős negatív visszacsatolás. Erre azért van szükség, hogy a műveleti erősítő bemeneti nullhibája és kisfrekvenciás zaja következtében ne jelenjen meg a műveleti erősítő kimenetén a terhelésre ugyan el nem jutó, de a kivezérelhetőséget csökkentő, esetleg megszüntető zavarösszetevő.

A 3.16 ábra szerinti kapcsolásokban az egyenáramú hibaösszetevőre vonatkozó zavarerősítés olyan kicsi, hogy a kimeneti csatoló kondenzátor gyakran elhagyható.

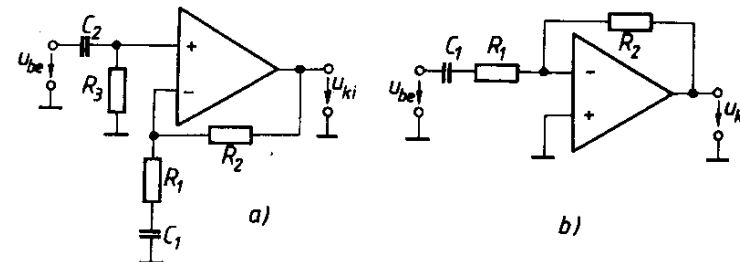
Kis erősítés esetén C_h elhagyható, mert az egyenáramú negatív visszacsatolás így is elegendően nagy lehet.

ELADAT

3.7 a) Határozza meg a 3.F.6 ábrán látható kapcsolások hurokerősítésének kvenciafüggését! Az alkalmazott műveleti erősítőkre: $A_{u0} = 10^5$, $f_0 = 1$ MHz, $R_{bes} = \infty$, $R_{bek} = \infty$, $R_{ki} = 0$, belső kompenzáció.

A passzív alkatелеmек: $R_1 = 10$ k Ω , $R_2 = 1$ M Ω , $R_3 = 1$ M Ω , $C_1 = C_2 = 1$ μ F.

b) Határozza meg a 3.F.6 ábrán látható erősítők felső határfrekvenciáját ($f_{f} = 0$ mellett)!



3.F.6 ábra

Váltakozófeszültség-erősítő kapcsolások

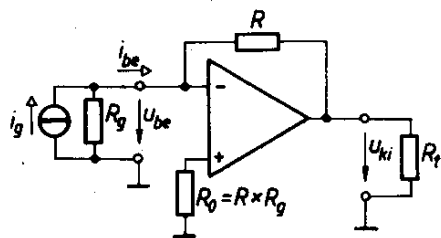
3.5 Áram-feszültség, feszültség-áram, áram-áram átalakító erősítő alapkapsolások műveleti erősítővel

Az eddigiekben a műveleti erősítővel megvalósítható feszültségerősítő alapkapsolásokat tárgyaltuk. Bár a gyakorlatban a feszültségerősítők alkalmazása a leggyakoribb, bizonyos esetekben az árambemenetű erősítők, továbbá a nagy belső ellenállású áramforrás-jellegű kimenettel rendelkező erősítők alkalmazása szükséges.

A következőkben bemutatjuk a műveleti erősítővel megvalósítható átalakító erősítők alapkapsolásait. E kapsolásokra nem végezzük el az átviteli és additív hibák számítását, csak a hurokerősítés összefüggését határozzuk meg. Az erősítők hibái a 3.1 ábra megfelelő modelljének felhasználásával az előző fejezetekben bemutatott elvek alapján számíthatók.

a) Áram-feszültség átalakító erősítő alapkapsolás

Az áram-feszültség átalakító erősítő alapkapsolás a 3.18 ábrán látható. Itt az R ellenállás negatív párhuzamos feszültség-visszacsatolást valósít meg, amely nyilvánvalóan csak nagy generátorellenállás esetén hatásos. Ideális műveleti erősítőt feltételezve a *névleges erősítés* (átviteli ellenállás):



3.18 ábra

Áram-feszültség átalakító erősítő

$$R_{AN} = \frac{u_{ki}}{i_{be}} = -R, \quad (3.38)$$

míg

$$R_{be id}^* = \frac{u_{be}}{i_{be}} = \frac{-u_1}{i_{be}} = 0! \quad (3.39)$$

A valódi *bemeneti ellenállás* a Miller-hatás következtében, elhanyagolva a műveleti erősítő saját nagy bemeneti ellenállását:

$$R_{be}^* \approx \frac{R}{1 + A_{us0}} \quad (3.40)$$

A *kimeneti ellenállás* ideális műveleti erősítő esetén zérus, a valóságban a feszültség-visszacsatolás következtében a (3.14) összefüggéssel számolható.

A hurokerősítés az i_g áramforrást szakadással helyettesítve, a műveleti erősítő bemeneti ellenállását elhanyagolva,

$$H \approx \frac{R_g}{R_g + R} A_{us}, \quad (3.41)$$

nagy generátorellenállásnál a hurokerősítés A_{us} -sel azonos.

b) Feszültség-áram átalakító erősítő alapkapsolások

A feszültség bemenetű, áramgenerátoros kimenetű erősítő három kapcsolási megoldását mutatja a 3.19 ábra. Az *a* és *b* ábrán látható, csak az átviteli tényező előjelében különböző kapcsolás *lebegő terhelésű* átalakító erősítő. Megfigyelhetjük, hogy ezek a neminvertáló, ill. invertáló erősítő alapkapsolások olyan változatai, amelyekben a visszacsatoló ellenállás helyére kerül a külső terhelőellenállás. Ideális műveleti erősítőt feltételezve a két kapcsolásra az alábbi összefüggések írhatók fel:

A 3.19.a ábrára

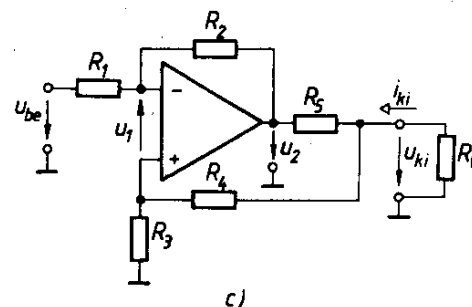
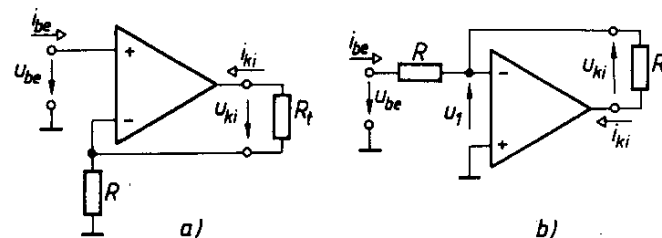
$$u_{be} = -i_{ki}R,$$

$$G_{AN} = \frac{i_{ki}}{u_{be}} = -\frac{1}{R}$$

A 3.19.b ábrára

$$\frac{u_{be}}{R} = i_{ki},$$

$$G_{AN} = \frac{1}{R} \quad (3.42)$$



3.19 ábra

Feszültség-áram átalakító erősítők
a) és b) lebegő terheléssel, c) földelt terheléssel

Mivel a kimeneti áram független a terhelőellenállástól, nyilvánvaló, hogy

$$R_{kiid}^* = \infty, \quad (3.43)$$

a kapcsolat ugyanis a kimeneti árammal arányos visszacsatolást létesít, ideális esetben végtelen hurokerősítéssel. A valódi kimeneti ellenállás természetesen véges. A hurokerősítés közelítő értéke (a műveleti erősítő bemeneti ellenállásának elhanyagolásával):

$$H \cong \frac{R}{R + R_t + R_{ki}} A_{us}, \quad (3.44)$$

függ a terhelőellenállástól.

A valódi kimeneti ellenállás

$$R_{ki}^* = R_{ki} + (1 + A_{us0})R \cong A_{us0}R \quad (3.45)$$

A közelítés azért engedhető meg, mert az R_t ellenállásra csatlakozó hálózat belső ellenállása visszacsatolás nélkül $R + R_{ki}$, ami az áramvisszacsatolás következtében a rövidzárási hurokerősítés-szeresére nő ($R_t = 0$ mellett számítható hurokerősítés).

A fentiekben tárgyalt kapcsolásokban a terhelőellenállás egyik végpontja sem földelhető, ami csökkenti az alkalmazhatóságukat. *Földelt terhelésre* dolgozó áramkimenetű erősítő a 3.19.c ábrán látható.

Ha betartjuk az

$$a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (3.46)$$

feltételt, az u_2 belső feszültségig az általános feszültség-visszacsatolás szerint határozhatjuk meg az átvitelt:

$$\alpha_{uü} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot a, \quad (3.47)$$

$$\beta_{uü} = a - \frac{R_t^*}{R_5 + R_t^*} \cdot a = a \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_t^*} \quad (3.48)$$

ahol

$$R_t^* = R_t \times (R_3 + R_4). \quad (3.49)$$

Ezzel:

$$\frac{u_2}{u_{be}} = \frac{\alpha_{uü}}{\beta_{uü}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{R_5 + R_t^*}{R_5}. \quad (3.50)$$

A teljes kapcsolásra:

$$i_{ki} = -u_2 \frac{R_t^*}{R_5 + R_t^*} \cdot \frac{1}{R_t} = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_t^*}{R_t} \cdot \frac{1}{R_5} u_{be}, \quad (3.51)$$

tehát a *névleges erősítés* (átviteli konduktancia):

$$G_{AN} = \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3 + R_4}{R_3 + R_4 + R_t} \cdot \frac{1}{R_5}. \quad (3.52)$$

Ha

$$R_3 + R_4 \gg R_t, \quad (3.53)$$

$$G_{AN} \cong \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_5} \quad (3.54)$$

A kimeneti ellenállás számításához:

$$u_{kiü} = -i_{ki} R_t |_{R_t \rightarrow \infty} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{R_3 + R_4}{R_5} u_{be}, \quad (3.55)$$

$$i_{kir} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R_5} u_{be}, \quad (3.56)$$

amivel

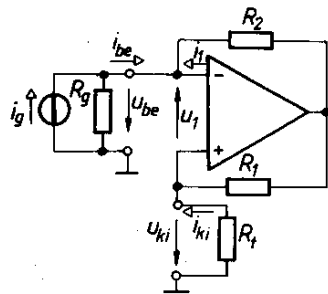
$$R_{ki}^* = -\frac{u_{kiü}}{i_{kir}} = R_3 + R_4 \quad (3.57)$$

Figyeljük meg: a műveleti erősítő kimenetéről az R_1, R_2 ellenállásokból megvalósított osztóval negatív, a műveleti erősítő kimeneti feszültségénél kisebb feszültségű kimeneti pontról az R_3, R_4 ellenállásokból megvalósított osztóval pozitív visszacsatolást létesítettünk. Az eredő visszacsatolás negatív, az eredő hurokerősítés:

$$H = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_t^*}{R_5 + R_t^*} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) A_{us} = \frac{R_5}{R_5 + R_t^*} a A_{us}. \quad (3.58)$$

Az áramkimenetű erősítők számára legkedvezőbb a zérus terhelőellenállás (maximális a hurokerősítés), míg a ∞ terhelőellenállás esetén a visszacsatolás minimális (ill. megszűnik). A terhelőellenállásnak azonban szigorúbb felső korlátot szab a műveleti erősítő *kivezérhetősége*. A műveleti erősítő maximális kimeneti árama természetesen minden esetben korlátozza a linearitási tartományt, de R_t növelésével kisebb kimeneti áram mellett is elérhetjük a linearitási tartomány határát, hiszen a műveleti erősítő kimeneti feszültsége (itt a kapcsolásban u_2) nem lépheti túl az alkalmazott tápfeszültség által meghatározott maximális értékét.

c) Áramerősítő alapkapsolás



3.20 ábra
Áramerősítő kapcsolás földelt terheléssel

A 3.20 ábrán a műveleti erősítővel megvalósított áramerősítő alapkapsolás egy lehetséges változata látható, földelt terheléssel. A kapcsolásra i_1 elhanyagolásával

$$u_1 = i_{ki}R_1 - i_{be}R_2.$$

Ekkor, ideális műveleti erősítő feltételezésével, a névleges áramerősítés

$$A_{iN} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (3.59)$$

független a terhelőellenállástól.

A kapcsolás bemeneti ellenállása ideális műveleti erősítőt feltételezve:

$$R_{beid}^* = \frac{u_{be}}{i_{be}} = \frac{-i_{ki}R_t}{i_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}R_t, \quad (3.60)$$

tehát negatív! A kapcsolás negatív impedancia-konverterként használható! A negatív bemeneti ellenállás azt jelenti, hogy bizonyos feltételek mellett az erősítő gerjedhet (ha a neminvertáló bemenetre csatlakozó pozitív visszacsatolás dominál). A gerjedés az

$$R_g > \frac{R_2}{R_1}R_t \quad (3.61)$$

feltétel betartásával kerülhető el, ami egyenértékű azzal, hogy a hurokerősítésben a negatív visszacsatolás dominál:

$$H = \left(\frac{R_g}{R_g + R_2} - \frac{R_t}{R_t + R_1} \right) A_{us} > 0. \quad (3.62)$$

A kimeneti ellenállás meghatározásakor nem használhatjuk az $R_{ki} = -u_{ki}/i_{ki}$ definíciót, mert az üresjárás-terhelés nem engedhető meg az előálló pozitív visszacsatolás miatt. Ehelyett a kimeneti ellenállást

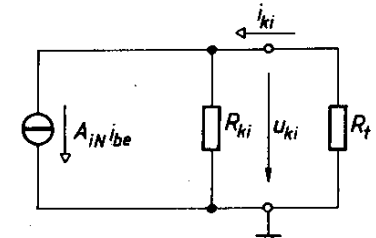
$$R_{ki} = \frac{\Delta u_{ki}}{\Delta i_{ki}} \quad (3.63)$$

alapján számíthatjuk, amikor azt vizsgáljuk meg, hogy a kimenetre kapcsolt Δu_{ki} forrásfeszültségű generátor hatására mekkora Δi_{ki} áramváltozás lép fel.

$$R_{ki} = \frac{\Delta u_{ki}}{\Delta i_{ki} - \Delta u_{ki} \left(1 + \frac{R_2}{R_g} \right)} = -\frac{R_1}{R_2}R_g. \quad (3.64)$$

Könnyen ellenőrizhető, hogy a kimeneti kör eredő ellenállása mindaddig pozitív ($R_{ki} \times R_t > 0$), amíg a negatív visszacsatolás feltétele teljesül [(3.62) összefüggés], így a negatív kimeneti ellenállás nem okoz gondot, sőt annál jobbnak mondható, minél nagyobb abszolút értékű.

A kimeneti áramkör helyettesítő képét a 3.21 ábra mutatja.

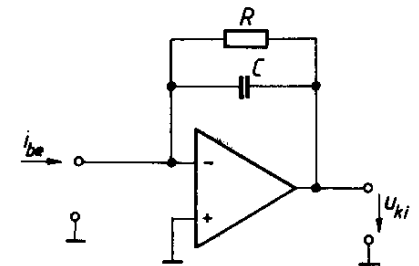


3.21 ábra
Az áramerősítő kimeneti helyettesítőképe

MEGLADATOK

3.8 A 3.F.7 ábrán látható áram-feszültség átalakító kapcsolás elemértékei: $R=1\text{ M}\Omega$, $C=1\text{ nF}$, az alkalmazott műveleti erősítő jellemzői: $A_{us0}=10^5$, $R_{be s}=\infty$, $R_{be k}=\infty$, $R_{ki}=0$.

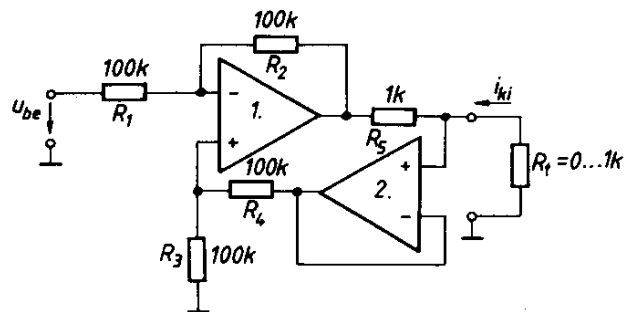
- Határozza meg Z_A^* értékét!
- Határozza meg a kapcsolás bemeneti impedanciáját!



3.F.7 ábra
Áram-feszültség átalakító

3.9 A 3.F.8 ábrán egy feszültség-áram átalakító erősítő kapcsolási rajza látható.

- Hasonlítsa össze a 3.19.c ábrán látható feszültség-áram átalakító erősítővel!
- Számítsa ki G_A^* értékét!
- Számítsa ki a kimeneti ellenállás értékét! (A műveleti erősítőket tekintse ideálisnak.)



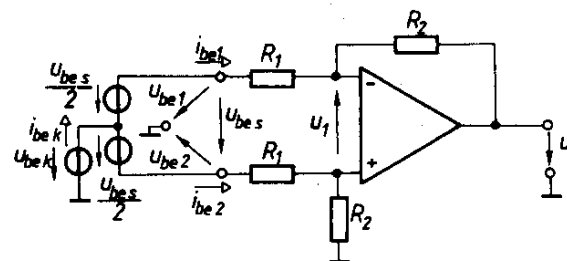
3.F.8 ábra
Feszültség-áram átalakító

4. Mérőerősítők

A mérőerősítő (angol irodalomban „instrumentation amplifier”) szimmetrikus bemenetű, aszimmetrikus kimenetű, szélessávú egyenfeszültség-erősítő, különlegesen kis statikus átviteli hibával (2.4 szakasz). Ez utóbbi követelmény miatt a mérőerősítők nagy egyenáramú hurokerősítéssel megvalósított visszacsatolt erősítők.

4.1 Mérőerősítő kapcsolás egy műveleti erősítővel

Az egy műveleti erősítővel megvalósított mérőerősítő kapcsolási megoldása 4.1 ábrán látható.



4.1 ábra
Egy műveleti erősítés mérőerősítő alapkapsolás

a) Névleges erősítés

A mérőerősítő kimeneti feszültsége a lineáris szuperpozíció elve alapján.

$$\begin{aligned}
 u_{ki} &= -\frac{R_2}{R_1} u_{be1} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot u_{be2} = \\
 &= -\frac{R_2}{R_1} (u_{be1} - u_{be2}) = -\frac{R_2}{R_1} u_{be,s}.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Tehát

$$A_{usN} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (4.2)$$

az invertáló alapkapcsoláshoz hasonlóan.

Mivel közös vezérlés esetén $u_{be1} = u_{be2} = u_{bek}$, ideális esetben az eredő közös feszültségerősítés zérus, a közös feszültségelnyomási tényező tehát végtelen:

$$A_{ukid}^* = 0; \quad E_{kuid}^* = \infty.$$

b) A szimmetrikus átviteli hibák

A statikus erősítéshiba az invertáló erősítőhöz hasonlóan értelemszerűen

$$|h_{se}|_{max} \cong |h_{R1}|_{max} + |h_{R2}|_{max} + |h_H|_{max}, \quad (4.3)$$

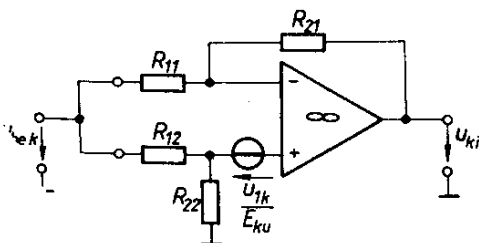
ahol $h_H = -\frac{1}{H_0}$.

A hurokerősítést a közös és a szimmetrikus jelforrást rövidre zárva határozhatjuk meg. Könnyű felismerni, hogy a visszacsatolt hurok teljesen azonos a neminvertáló (3.2. szakasz, 3.7 ábra) és az invertáló (3.3. szakasz) alapkapcsolásnál látottakkal, így a hurokerősítés az ott közölt módon számítható.

A hurokerősítés azonossága következtében a műveleti erősítő gerjedés elleni kompenzációját is az alapkapcsolásoknál leírtak szerint kell elvégezni, az eredő dinamikus átviteli hiba mértéke az invertáló alapkapcsolásnál leírtak szerint számítható.

c) Eredő közös feszültségelnyomási tényező

A valódi műveleti erősítő közösjel-erősítése nem zérus és az ellenállások valódi értékei is eltérnek a névleges értéktől, ezért a mérőerősítő közös jelre számított erősítése sem zérus. A 4.2 ábrán a közös feszültségerősítés meghatározására alkalmas kapcsolást rajzoltuk meg, figyelembe véve az ellenállások névleges



értékétől való eltérését, továbbá a műveleti erősítő saját véges közös feszültségelnyomási tényezőjét, E_{ku} -t (3.1.c modell).

4.2 ábra

Az egy műveleti erősítés mérőerősítő közös feszültségerősítésének meghatározása

Legyen

$$R_{11} = R_1(1 \pm h_{R1}); \quad R_{12} = R_1(1 \pm h_{R1}); \\ R_{21} = R_2(1 \pm h_{R2}); \quad R_{22} = R_2(1 \pm h_{R2}).$$

A kimeneti feszültség a lineáris szuperpozíció elve alapján

$$u_{ki} = -\frac{R_{21}}{R_{11}} u_{bek} + \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}} \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}} u_{bek} + \frac{u_{1k}}{E_{ku}} \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}}.$$

A műveleti erősítő közös bemeneti feszültsége:

$$u_{1k} \cong u_{bek} \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}}.$$

Fentiek alapján a közös feszültségerősítés:

$$A_{uk} = -\frac{R_{21}}{R_{11}} + \frac{R_{22}}{R_{11}} \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{12} + R_{22}} + \frac{1}{E_{ku}} \frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11}} \frac{R_{22}}{R_{12} + R_{22}}.$$

Tételezzük fel a továbbiakban, hogy az ellenállások relatív hibája kicsi, így névlegestől való eltérésüket csak ott célszerű figyelembe venni, ahol az összegésünkben azonos névleges értékű mennyiségek különbségképzése fordul elő.

Ezzel az egyszerűsítéssel

$$A_{uk} = \frac{R_{22}R_{11} - R_{21}R_{12}}{R_1(R_1 + R_2)} + \frac{1}{E_{ku}} \frac{R_2}{R_1}.$$

A továbbiakban keressük A_{uk} legkedvezőtlenebb, azaz maximális értékét. Nyilvánvalóan az a legkedvezőtlenebb eset, amikor R_{22} és R_{11} a lehető legnagyobb, míg R_{21} és R_{12} a lehető legkisebb értéket veszi fel, E_{ku} pedig pozitív és minimális abszolút értékű. Ekkor

$$|A_{uk}|_{max} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (2h_{R1} + 2h_{R2}) + \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{|E_{ku}|_{min}}, \quad (4.4)$$

és az eredő közös feszültségelnyomási tényező legkedvezőtlenebb, azaz minimális értéke:

$$\frac{1}{|E_{ku}^*|_{min}} = \frac{|A_{uk}|_{max}}{|A_{usN}|} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (2h_{R1} + 2h_{R2}) + \frac{1}{|E_{ku}|_{min}}. \quad (4.5)$$

Nyilvánvaló, hogy pontos ellenállások esetén $E_{ku}^* = E_{ku}$, míg az ellenállások értékszórása jelentősen lecsökkenti az eredő közös feszültségelnyomási tényezőt!

d) Illesztési jellemzők

A mérőerősítő szimmetrikus bemeneti ellenállása ideális műveleti erősítő feltételezésével:

$$R_{be s}^* = \left. \frac{u_{be s}}{i_{be s}} \right|_{u_{be k}=0} = 2 R_1, \quad (4.6)$$

mint az a 4.1 ábra bemenetére felírt hurokegyenletből és az ismert

$$i_{be s} = \frac{i_{be 1} - i_{be 2}}{2}$$

összefüggésből adódik.

Az eredő közös bemeneti ellenállás pedig

$$R_{be k}^* = \left. \frac{u_{be k}}{i_{be k}} \right|_{u_{be s}=0} = \frac{R_1 + R_2}{2}, \quad (4.7)$$

szintén ideális műveleti erősítőt feltételezve és felhasználva az

$$i_{be k} = i_{be 1} + i_{be 2}$$

összefüggést.

Az egy műveleti erősítés mérőerősítő alapkapsolás bemeneti ellenállásai láthatóan kapcsolási paraméterektől függenek és nem tehetők kellően nagygyá.

e) Additív zavarjelek

Az egy műveleti erősítés mérőerősítő kapcsolás *eredő nullhibáját* (a szimmetrikus bemenetre redukált eredő ofszet feszültséget) és az *eredő zajt* a kapcsolási hasonlóság alapján az invertáló erősítő alapkapsolásnál elmondottak alapján számíthatjuk (3.3.f szakasz).

f) Értékelés

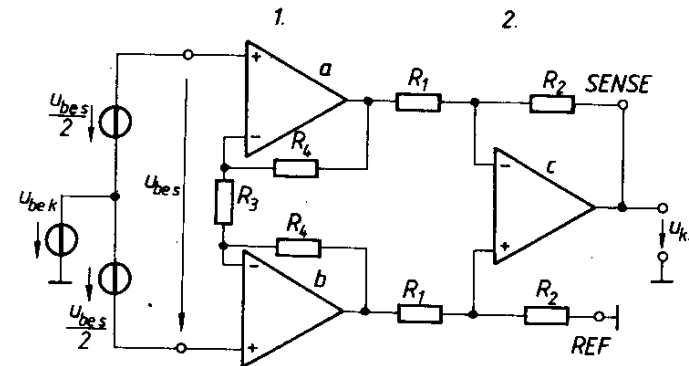
Az egy műveleti erősítés mérőerősítő ideális esetben alkalmas a szimmetrikus bemenetű, aszimmetrikus kimenetű, precíziós erősítésű erősítő funkció teljesítésére, de alkalmazhatóságát jelentősen korlátozzák az alábbi hátrányai:

bemeneti ellenállása kicsi,

kapcsolás nagyon kényes az R_1, R_2 ellenállások azonosságára, így kis értékesítésű és nagy stabilitású (tehát drága) precíziós ellenállások alkalmazása szükséges.

4.2 Három műveleti erősítés mérőerősítő

Az egy műveleti erősítés mérőerősítő hibái kiküszöbölhetők a 4.3 ábrán látható, az ismert kapcsolási megoldások közül a legkedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező úgynevezett három műveleti erősítés mérőerősítő kapcsolással. A kapcsolás bemenetét két műveleti erősítőtől felépített szimmetrikus bemenetű, szimmetrikus kimenetű neminvertáló jellegű első fokozat képezi, míg ezt a szimmetrikus-aszimmetrikus átalakítást végző egy műveleti erősítés mérőerősítővel megvalósított második fokozat követi.



4.3 ábra

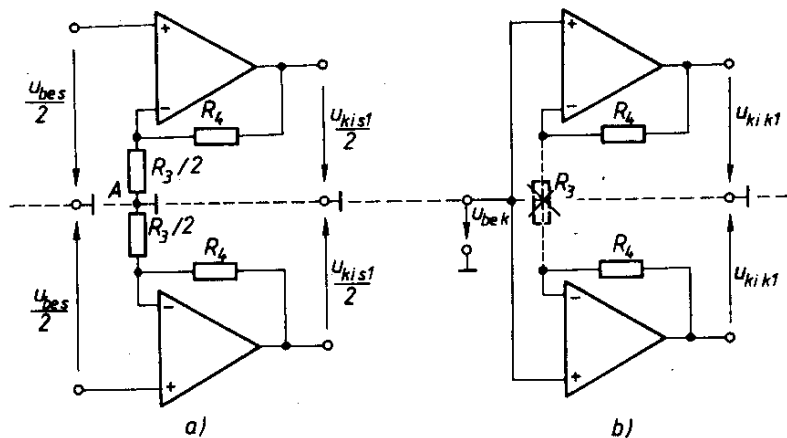
Három műveleti erősítés mérőerősítő kapcsolás

a) Névleges erősítés

Tisztán szimmetrikus, illetve tisztán közös bemeneti vezérlést feltételezve, a teljes kapcsolási szimmetria esetén a mérőerősítő első fokozata a 4.4.a. illetve b. ábrán látható módon helyettesíthető. Szimmetrikus kimeneti jelnél (a két műveleti erősítő kimeneti feszültsége azonos nagyságú, de ellentétes előjelű) az $R_3 - R_4$ ellenállásokból álló osztó R_3 ellenállását két azonos ellenállás összeállításával feltételezve az A pont potenciálja mindig zérus. Így az 1. fokozat két neminvertáló erősítőre bontható és a teljes fokozat szimmetrikus feszültségerősítése azonos az egyik neminvertáló fokozat erősítésével:

$$A_{uss1N} = \frac{u_{ki s1}}{u_{be s}} = \frac{u_{kus1}/2}{u_{be s}/2} = \left(1 + \frac{2 R_4}{R_3} \right). \quad (4.8)$$

Közös bemeneti és kimeneti jelnél viszont a két műveleti erősítő kimeneti feszültsége azonos, így az $R_3 - R_4$ osztón áram nem folyik, az R_3 ellenállás tehát



4.4 ábra

Magyarázó ábra a mérőerősítő szimmetrikus (a) és közös (b) feszültség-erősítésének meghatározásához

szakadással helyettesíthető. Így az 1. fokozat ekkor két követő erősítővé egyszerűsödik, tehát

$$A_{ukk1} = \frac{u_{ki k1}}{u_{be k}} = 1. \quad (4.9)$$

Az első fokozat kimeneti feszültségeit a második, már ismert erősítő fokozat erősíti tovább, így a mérőerősítő eredő szimmetrikus feszültség-erősítése:

$$A_{usN} = A_{uss1N} A_{us2N} = - \left(1 + \frac{2R_4}{R_3} \right) \frac{R_2}{R_1} \quad (4.10)$$

A közös feszültségelnyomási tényező ideális esetben végtelen ($E_{kuid} = \infty$), mint-hogy a második erősítőfokozat közös erősítése zérus ($A_{uk2} = 0$).

b) A szimmetrikus átviteli hibák

A (4.8) összefüggésből következik, hogy az eredő statikus erősítéshiba a két erősítő fokozat átviteli hibáinak összege:

$$|h_{se}^*|_{max} = |h_{s1}|_{max} + |h_{s2}|_{max}$$

ahol h_{s2} a (4.3) szerint, h_{s1} pedig a neminvertáló erősítő alapkapcsoláshoz hasonlóan (3.5) számítható. Az első fokozat erősítéshibáját a szimmetrikus jelre érvényes hurokerősítéssel kell számolni. A 4.4.a ábrából értelem-szerűen

$$H_{1s} = \frac{R_3/2}{R_3/2 + R_4} \cdot A_{us}. \quad (4.11)$$

Az eredő dinamikus hibára jellemző relatív feszültségátviteli függvény:

$$a_u^*(s) = a_{u1}(s) \cdot a_{u2}(s),$$

a 3 dB-es felső határfrekvencia tehát mindig kisebb bármelyik fokozat saját határfrekvenciájánál, a határfrekvenciáknál jóval kisebb frekvenciákon értelmezett amplitúdó- és fázishibák pedig összegződnek:

$$h_a^* = h_{a1} + h_{a2}, \quad (4.12)$$

$$\varphi_h^* = \varphi_{h1} + \varphi_{h2}. \quad (4.13)$$

c) Eredő közös feszültségelnyomási tényező

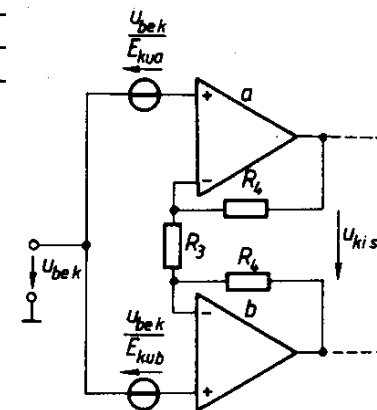
Nemideális viszonyok mellett a három műveleti erősítő mérőerősítő kimeneti feszültsége tisztán közös bemeneti feszültség mellett:

$$u_{ki} |_{u_{bes}=0} = (A_{ukk1} A_{uk2} + A_{usk1} A_{us2}) u_{be k}, \quad (4.14)$$

azaz az első fokozat közös kimeneti összetevőjét a második fokozat nemzérus közös erősítése erősíti, míg nemideális esetben a közös bemeneti feszültségből már az első fokozatban is létrejön szimmetrikus kimeneti jel, amit a második fokozat szimmetrikus erősítése növel.

Az első fokozat A_{usk1} erősítése a 4.5 ábrából határozható meg. A közös bemeneti feszültség azonos közös bemeneti feszültségként jelenik meg mindkét műveleti erősítő bemenetén. A műveleti erősítők saját véges közös feszültségelnyomási tényezőjének hatását az ismert modellel figyelembe véve (3.1 ábra, c modell)

$$A_{usk1} = \frac{u_{kis1}}{u_{be k}} \Big|_{u_{bes}=0} = \left(\frac{1}{E_{kua}} - \frac{1}{E_{kub}} \right) A_{uss1}.$$



4.5 ábra

A mérőerősítő eredő közös feszültségelnyomási tényezőjének meghatározásához

Elvileg tehát a két műveleti erősítő véges E_{ku} -jából adódó hiba különbségét kapjuk. Ezt speciális esetben egyes gyártó cégek ugyan

kihasználják, de a közös feszültségnyomási tényező egy belső kiegyenlítetlen-
ség következménye, ezért előjele tetszőleges lehet. Így a gyakorlatban az

$$A_{usk1 \max} = \left(\frac{1}{|E_{kua}|_{\min}} + \frac{1}{|E_{kub}|_{\min}} \right) A_{uss1}$$

összefüggéssel célszerű számolni.

Mivel (4.14) többi jellemzője ismert (4.3., 4.4., 4.2. összefüggések), így a
mérőerősítő eredő közös feszültségérősítésének legkedvezőtlenebb értéke:

$$A_{uk}^* = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (2h_{R1} + 2h_{R2}) + \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{|E_{kuc}|_{\min}} +$$

$$+ \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_4}{R_3} \right) \left(\frac{1}{|E_{kua}|_{\min}} + \frac{1}{|E_{kub}|_{\min}} \right).$$

Az eredő közös feszültségnyomási tényező minimális értéke pedig (4.10) fel-
használásával, némi átalakítással

$$\frac{1}{|E_{ku}^*|} = \frac{1}{|E_{kua}|_{\min}} + \frac{1}{|E_{kub}|_{\min}} + \frac{1}{A_{uss1}} \cdot \frac{1}{|E_{kuc}|_{\min}} +$$

$$+ \frac{1}{A_{uss1} + |A_{usN}|} \cdot (2h_{R1} + 2h_{R2}). \quad (4.15)$$

Az összefüggésből levonható következtetések: az eredő közös feszültség-
nyomási tényező mindig kisebb, mint az alkalmazott műveleti erősítők saját
közös feszültségnyomási tényezője, de nagyobb erősítés esetén a közös feszült-
ségnyomási tényező nagyobb; továbbá a szükséges eredő erősítést, A_{usN} -t úgy
megvalósítva, hogy az első fokozat erősítsen minél többet, a második fokozat
ellenállás-szórásából adódó eredő hiba csökkenthető. Gyakori ezért az

$$A_{uss1} = |A_{usN}|; \quad A_{us2} = -1$$

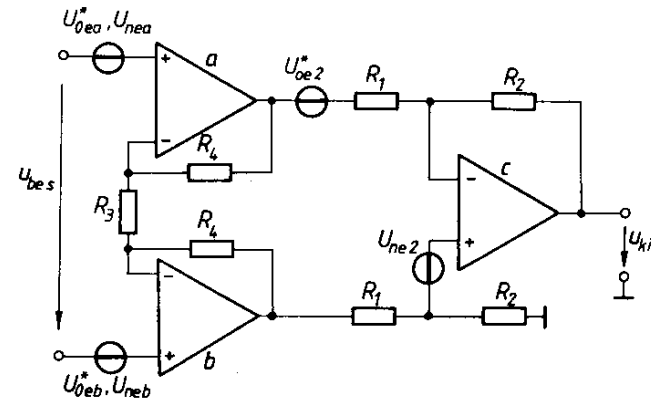
választás.

d) A mérőerősítő additív zavarjelei

A mérőerősítő eredő additív zavarjeleinek számítására a 4.6 ábra ad támpont-
tot. Az ábrán az első fokozat neminvertáló és a második fokozat invertáló
jellegű erősítőjének bemenetére redukált eredő zavarforrásokból indultunk ki,
felhasználva korábbi eredményeinket.

A mérőerősítő bemenetére redukált eredő nullhiba

$$U_{0e}^* = U_{0ea}^* - U_{0eb}^* + \frac{U_{0e2}^*}{A_{uss1}}, \quad (4.16)$$



4.6 ábra

A mérőerősítő nullhibájának és zajának meghatározása

ahol

$$U_{0ea}^* = U_{0a} + I_{ba}^+ \cdot R_g^- - I_{ba}^- [R_4 \times (R_3 + R_4)],$$

$$U_{0eb}^* = U_{0b} + I_{bb}^+ \cdot R_g^+ - I_{bb}^- [R_4 \times (R_3 + R_4)],$$

ig U_{0e2}^* (3.28) szerint számolható. Az első fokozat nagy erősítése láthatóan a
nullhiba szempontjából is kedvező.

A mérőerősítő eredő kimeneti zajfeszültsége:

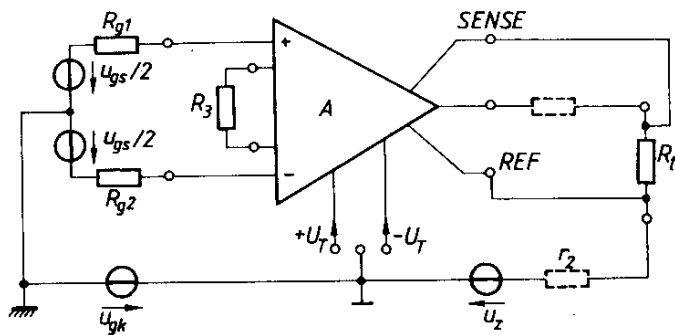
$$U_{ki \text{neff}}^2 = (U_{nwea}^2 + U_{nweb}^2) \cdot |A_{usN}|^2 \left[\Delta f_{ne} + f_{ke1} \ln \frac{f_{fne}}{f_{ane}} \right] +$$

$$\{1 + |A_{us2}|\}^2 U_{nwe2}^2 \left[\Delta f_{n2} + f_{ke2} \ln \frac{f_{fn2}}{f_{an2}} \right], \quad (4.17)$$

ahol U_{nwea} , U_{nweb} és f_{ke1} a bemeneti neminvertáló erősítő eredő bemeneti zaj-
jellemzői, U_{nwe2} , f_{ke2} a második, invertáló fokozat eredő zaj jellemzői; Δf_{ne} , f_{fne}
 f_{ane} a teljes mérőerősítő eredő zaj-sávzélessége, illetve zaj-határfrekvenciái,
ig Δf_{n2} , f_{fn2} és f_{an2} a második fokozat zajsávzélessége, illetve zaj-határfrek-
venciái.

e) Alkalmazási szempontok, integrált mérőerősítők

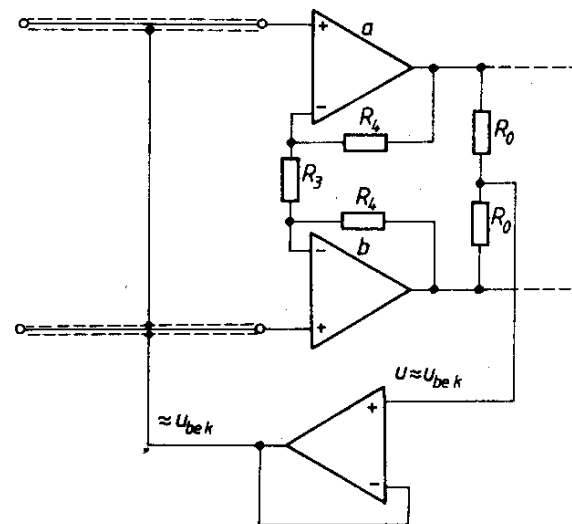
A három műveleti erősítés mérőerősítő alkalmazásának néhány szempontja:
A mérőerősítő bemeneti pontjai és a földpont között a műveleti erősítők
bemeneti munkaponti árama miatt mindig biztosítani kell az egyenáramú
áramutat.



4.7 ábra

Integrált mérőerősítő a külső áramkörti elemekkel, a SENSE és REF pontok megfelelő bekötésével az erősítőtől távol elhelyezkedő terhelés esetén

- Mérőerősítők alkalmazása során gyakori eset, hogy a terhelés a kimenetre hosszabb vezetéken keresztül csatlakozik. A vezeték nem elhanyagolható ellenállása, továbbá a hosszú vezetékeken keletkező U_z zavarfeszültségek nem befolyásolják számottevően az eredő erősítést, ha a kimeneti fokozat visszacsatolását közvetlenül a terhelőellenállás sarkairól biztosítjuk. Ezért a 4.3 ábrán bejelölt SENSE (érzékelő) pontot általában nem kötjük közvetlenül össze az erősítő kimenetével, hanem a 4.7 ábrán látható módon a terhelő ellenállásra csatlakoztatjuk. Hasonlóképpen a REF (referencia) jelű pontot sem közvetlenül az erősítőben, hanem a terhelő ellenállásnál kötjük földpontra.
- Az u_{gk} közös bemeneti feszültség gyakran az erősítőtől távol elhelyezkedő jelforrás földpontja és az erősítő tápfeszültségének földpontja közötti zavarfeszültségből adódik (4.7 ábra). Hiába tervezzük a mérőerősítő saját közös feszültségnyomási tényezőjét nagyra, a zavarelnyomást leronthatja, ha $R_{g1} \neq R_{g2}$, és ha a műveleti erősítő szimmetrikus és közös bemeneti ellenállása nem elég nagy. Ügyelni kell ezért a $\Delta R_g = R_{g1} - R_{g2}$ minimalizálására.
- Ha a jelforrás és az erősítő közötti távolság nagy, a hosszú vezetékek jelentős szimmetrikus zavarfeszültséget eredményezhetnek (mágneses és kapacitív csatolással). A zavarjelek csökkentésének egyik hatásos módja a vezetékek árnyékolása. Ha azonban a vezetékek árnyékoló harisnyáját földre kötjük, a vezeték és az árnyékolás közötti kapacitás nagymértékben csökkenti a közös bemeneti impedanciát és így csökkenti a frekvencia növekedésével az illesztési közös zavarelnyomást. E hatás kiküszöbölésére alkalmazhatjuk a 4.8 ábrán látható megoldást. Itt a mérőerősítő első fokozatának kimenetére helyezett, két azonos ellenállásból (R_0) álló osztóval előállítjuk az $u_{be k}$ -val azonos potenciálú pontot, majd egy követőerősítő segítségével e potenciálra kötjük



4.8 ábra

A mérőerősítő bemeneteinek árnyékolása a szimmetrikus zavarok csökkentésére, az árnyékoló harisnya feszültségutánhúzása a bemeneti jel közös összetevőjére

az árnyékoló harisnyát. E feszültség-utánhúzó kapcsolással kiküszöböljük a közös bemeneti feszültségből adódó kapacitív áramot, azaz a közös bemeneti kapacitás zavarelnyomás-csökkentő hatását.

A három műveleti erősítés mérőerősítőt integrált áramkörgyártó cégek önálló alkatelemként is gyártják. A monolit integrált kivitelben a három műveleti erősítő egyetlen félvezető chipen készül, míg a precíziós visszacsatoló ellenállásokat a chip felületére felvitt vékonyréteg ellenállásokként realizálják, melyeket azonos trimmeléssel állítanak be a pontos értékre. Annak érdekében, hogy a mérőerősítő erősítését a felhasználó tetszés szerint megválaszthassa, az R_3 ellenállást nem integrálják be, azt kívülről kell a mérőerősítőhöz csatlakoztatni (4.7 ábra). Elfogadható átviteli hibával egy mérőerősítővel R_3 értékétől függően 1...1000-szeres erősítés realizálható. Az integrált mérőerősítőnél a SENSE és REF pontokat is kivezetik, azokat kívülről kell megfelelő módon bekötni. Készülnek olyan mérőerősítők is, amelyeknél valamennyi az erősítés beállításához szükséges ellenállást integrálnak. (E megoldás előnye, hogy azonos típusú, tehát azonos hőfokfüggésű ellenállások hozzák létre az eredő erősítést). A kívánt erősítés beállítására az erősítés programozható. Az ún. pin-programozható erősítőknél a beállítható erősítés-értékeknek megfelelő visszacsatoló ellenállásokat az áramkörbe integrálják oly módon, hogy a kívánt erősítés az erősítő

kivezetéseinek (angolul pin) megfelelő külső összekötésével beállítható legyen. A digitális jellel programozható erősítésű erősítők visszacsatoló ellenállásait szintén integrált kivitelben beépített elektronikus kapcsolók (analóg kapcsolók, lásd a későbbi tanulmányok során) kapcsolják, külső digitális vezérlőjelek hatására.

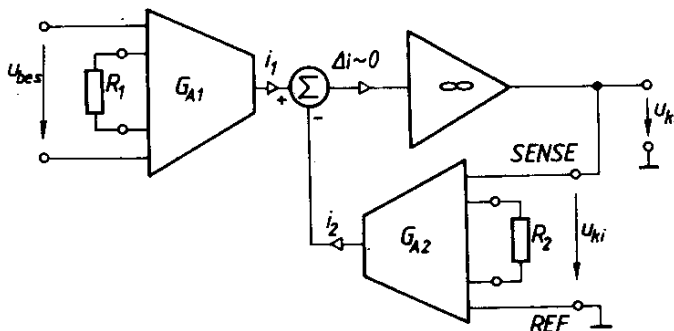
f) Értékelés

A három műveleti erősítés mérőerősítővel nagy bemeneti impedancia, 1...1000 tartományban pontos szimmetrikus erősítés és nagy közös feszültségelnyomási tényező érhető el. A kapcsolás hátrányai:

- 7 db precíziós ellenállás szükséges, amelyek közül 2-2 esetén az azonosság is alapvető követelmény. Ez különösen integrált kivitelben drágítja az előállítást.
- A nagy hurokerősítés miatt a dinamikus tulajdonságok nem túl kedvezőek.
- A megengedett maximális közös bemeneti jelet a műveleti erősítők maximális megengedett bemeneti feszültsége max. 15...30 V tartományra korlátozza, ami egyes területeken alkalmazását lehetetlenné teszi.

4.3 Belső áramvisszacsatolású integrált mérőerősítők

A könnyebb integrálhatóság, elsősorban a precíziós ellenállások számának csökkentése érdekében fejlesztették ki a 4.9 ábrán látható elvi felépítésű mérőerősítő struktúrát. Itt a bemeneten egy R_1 ellenállással visszacsatolt szimmetrikus bemenetű feszültség-áram átalakító erősítő található. Hasonló feszültség-áram átalakító hozza létre a visszacsatolást, míg a kimeneti áramok különbsége



4.9 ábra

A belső áramvisszacsatolású integrált mérőerősítő tömbvázlata

gy közel végtelen erősítésű áram-feszültség átalakító erősítőre kerül. Ideális esetben ez utóbbi erősítőre tetszőleges kimeneti feszültség esetén a műveleti erősítőkhöz hasonlóan

$$\Delta i = 0, \quad \text{így} \quad i_1 = i_2.$$

A két feszültség-áram átalakító erősítő kimeneti árama:

$$i_1 = G_{A1} \cdot u_{bes} = \frac{1}{R_1} \cdot u_{bes},$$

$$i_2 = G_{A2} \cdot u_{ki} = \frac{1}{R_2} \cdot u_{ki}$$

az eredő feszültségerősítés tehát

$$A_{usN} = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.18)$$

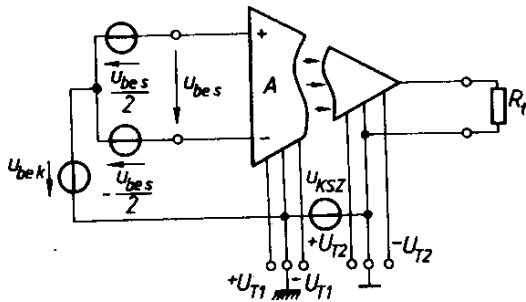
Indoklás nélkül közöljük, hogy e módszerrel a három műveleti erősítés kapcsolással szemben könnyebben integrálható áramkört kapunk, csak két precíziós ellenállás szükséges (amelyeket általában kívülről kell csatlakoztatni), így a mérőerősítő olcsón állítható elő. A két feszültség-áram átalakító kis hurokerősítésű visszacsatolással is precízen realizálható, a dinamikus tulajdonságokat elsősorban a kimeneti visszacsatolt hurok gerjedés elleni kompenzáció szabja meg. Ha az eredő erősítést csak R_1 változtatásával állítjuk be, a hurok hurokerősítése nem változik, így optimálisan kompenzálható.

A belső áramvisszacsatolású mérőerősítő főbb tulajdonságai:

- olcsó,
- dinamikus tulajdonságai kedvezőek,
- a statikus átviteli hiba a kisebb hurokerősítések miatt a három műveleti erősítés mérőerősítőénél nagyobb.

4.4 Szigetelt bemenetű mérőerősítők

Szigetelt bemenetű mérőerősítőt kell alkalmaznunk, ha a jelforrás és a kimeneti föld között galvanikus kapcsolat nem engedhető meg, ha a mérendő kis jel nagy (esetenként kV nagyságrendű) zavarfeszültségekre szuperponálva jelentkezik, ha a mérőkör nagyimpedanciás és így normál mérőerősítővel a nagy illesztési zavarelyomási tényező nem biztosítható, továbbá ha a jelforrás és a kimenet közötti szivárgási áramokat meghibásodás esetén is korlátozni kell (pl. orvostechnikai alkalmazások, életvédelmi előírások).



4.10 ábra
A szigetelt bemenetű mérőerősítő tömbvázlata, a szigetelési zavarfeszültség feltüntetésével

A szigetelt erősítőt (4.10 ábra) úgy kell kialakítani, hogy csak a jelforrás szimmetrikus összetevőjét erősítse, de a hasznos jelet a bemenet és a kimenet közötti szigetelő felületen keresztül, galvanikus kapcsolat nélkül juttassa a terhelésre. A szigetelt erősítő általában tartalmaz egy bemeneti mérőerősítőt (egyes esetekben precíziós aszimmetrikus bemeneti erősítőt), szigetelt jelátvivőt, és egy precíziós kimeneti erősítőt. A bemeneti és a kimeneti erősítőt természetesen egymástól szintén galvanikusan elválasztott egyenfeszültség-forrásról kell táplálni.

A szigetelt jelátvivő megoldási lehetőségei:

- transzformátoros jelátvivőknél a bemeneti mérőerősítő kimeneti jelével egy vivőhullámú jelet modulálunk, a modulált jelet transzformátor segítségével galvanikus kapcsolat nélkül továbbítjuk a kimenetre, ahol a kimeneti erősítő előtt a modulált jelet demoduláljuk (lásd a 11. fejezetet).
 - optocsatolt jelátvivőnél a mérőerősítő kimeneti jelét közvetlenül, vagy modulációs eljárással egy optikai csatolóval (fénysugárzó és fényérzékeny diódapárral) juttatjuk a kimenetre (lásd a 11. fejezetet).
- A szigetelt erősítők kimeneti feszültsége:

$$u_{ki} = A_{us} \left(u_{be s} + \frac{u_{be k}}{E_{ku}} + \frac{u_{ksz}}{E_{kusz}} \right), \quad (4.19)$$

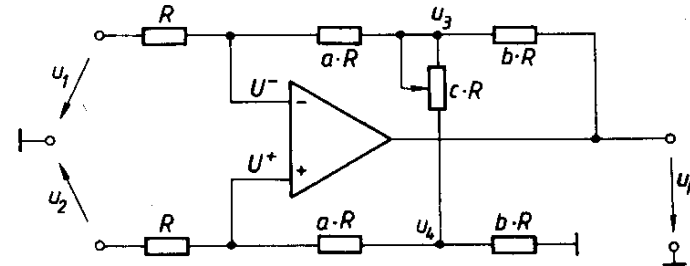
ahol u_{ksz} a szigetelőre jutó, gyakran igen nagy közös zavarófeszültség. A szigetelt erősítőre így értelemszerűen két elnyomási tényező definiálható.

A szigeteléssel kapcsolatos követelmények:

- a szigetelésnek ki kell bírnia a gyakran több kV nagyságú u_{ksz} feszültséget,
- a szigetelési ellenállásnak kellően nagyoknak, a szigetelési kapacitásnak kellően kicsinek kell lennie a nagy E_{kusz} , továbbá a kis egyenáramú, valamint hálózati frekvenciás szivárgási áramok biztosítására.

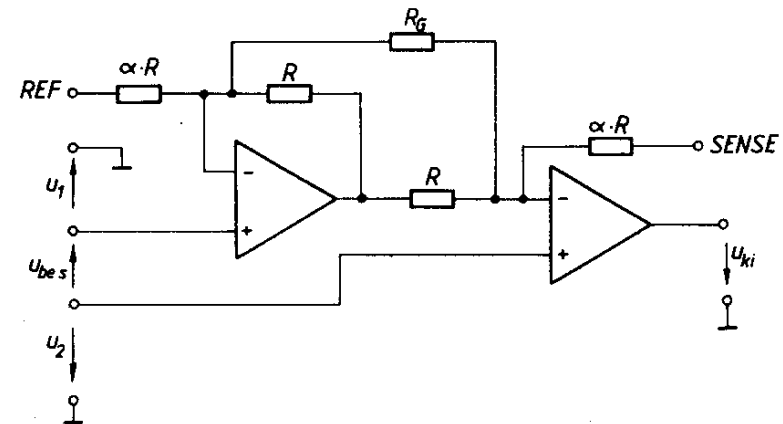
FELADATOK

F.4.1 Határozza meg a 4.F.1 ábrán látható kapcsolás szimmetrikus feszültség-erősítését ideális műveleti erősítőt feltételezve!



4.F.1 ábra
Mérőerősítő kapcsolás (A_{us} változtatható)

F.4.2 Határozza meg a 4.F.2 ábrán látható mérőerősítő szimmetrikus feszültség-erősítését! (A műveleti erősítőket tekintse ideálisnak!)



4.F.2 ábra
Mérőerősítő kapcsolás két műveleti erősítővel

F.4.3 A 4.F.3 ábrán látható mérőerősítő kapcsolásban az A jelzésű erősítő egy három műveleti erősítés mérőerősítő, melynek névleges szimmetrikus feszültség-erősítése $A_{us1N} = 30$. Mekkora lesz a kapcsolás eredő névleges szimmetrikus feszültség-erősítése?