

Analóg Integrált Elektronikai Tervezés

DR SZALAI ALBIN | 2018 ŐSZI FÉLÉV



Visszacsatolás

Általános megfontolások

Visszacsatolási topológiák

A visszacsatolás hatása a zajra

Visszacsatolt hálózatok analízisének nehézségei

A terhelés hatása

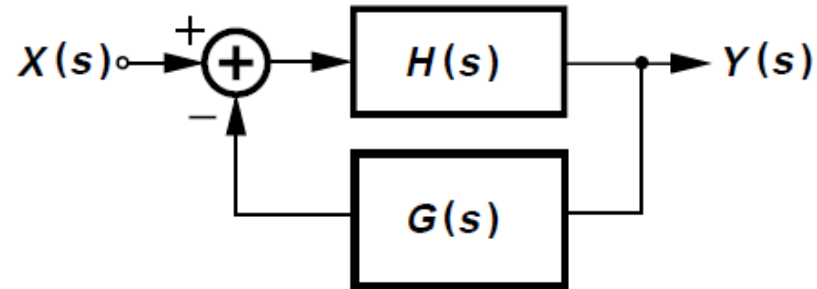
Visszacsatolt hálózatok Bode analízise

A hurokerősítés számítása és annak nehézségei

A Bode analízis alternatívái



Általános megfontolások



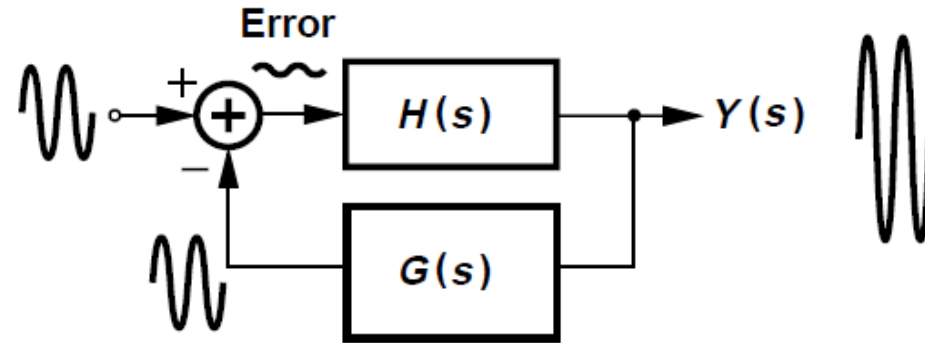
- A fenti ábrán egy negatívan visszacsatolt rendszer látható
- $H(s)$: előrecsatoló hálózat $G(s)$: visszacsatoló hálózat
- Visszacsatolási hiba: $X(s) - G(s)Y(s)$
- Így:

$$Y(s) = H(s)[X(s) - G(s)Y(s)]$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

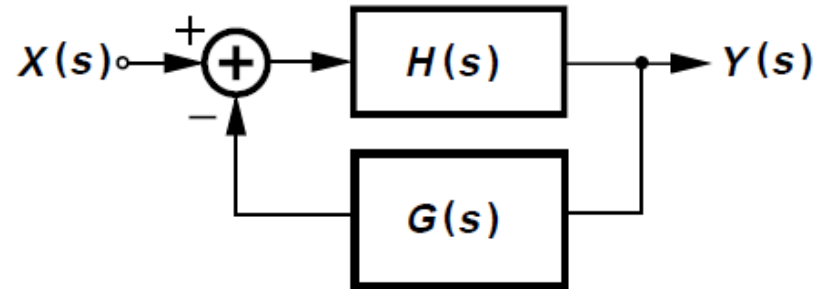
- $H(s)$: nyílthurkú átviteli függvény
- $Y(s)/X(s)$: zárthurkú átviteli függvény

Általános megfontolások



- Általában $H(s)$ egy erősítőt jelöl, $G(s)$ pedig egy frekvenciafüggetlen mennyiség
- Egy jól megtervezett, negatívan visszacsatoló hálózatban a visszacsatolási hiba minimális, így a $G(s)$ kimenete a bemenetének „pontos” mása, így a rendszer kimenete a bemenetének egy hű (skálázott) replikája
- $H(s)$ bemenete „virtuális föld” mivel ezen a ponton a jel amplitúdója kicsi
- A következőkben $G(s)$ -t lecseréljük egy frekvenciafüggetlen mennyiségre amit β jelöl és visszacsatolási (feedback) tényezőnek nevezzük

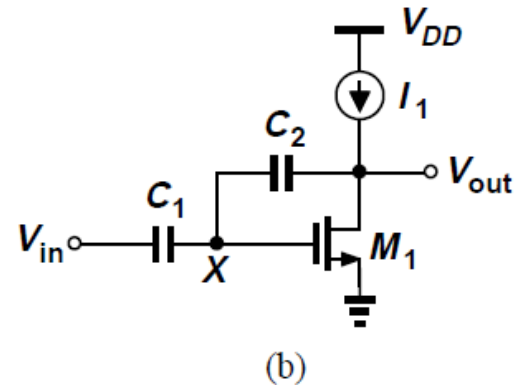
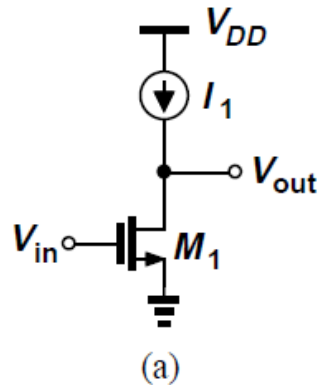
Általános megfontolások



- Egy visszacsatolt rendszer részei:
 - Előrecsatoló hálózat (erősítő)
 - Kimenetet mérő elem
 - Visszacsatoló hálózat
 - Visszacsatolási hibaképző elem, általában kivonó (vagy összeadó)
- A fentiek minden visszacsatolt rendszerben megtalálhatóak, bár olykor a beazonosításuk nem triviális

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Erősítés stabilizálása (Gain Desensitization):

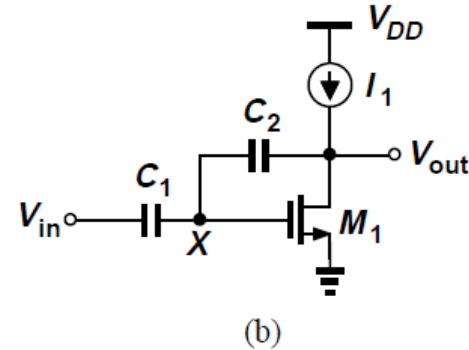
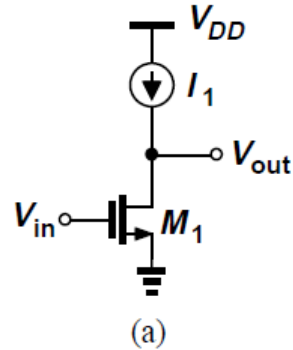


- Az (a) ábrán látható közös source fokozat erősítése $g_{m1}r_{O1}$
- Az erősítés nem pontosan meghatározott mennyiség, mivel g_{m1} és r_{O1} változik a hőmérséklettel és a technológiai szórásokkal
- A (b) ábrán M_1 munkapontbeállítása nincs feltüntetve, az eredő feszültségerősítés alacsony frekvenciákon:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}\right) \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{g_{m1}r_{O1}}}$$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Erősítés stabilizálása (Gain Desensitization):

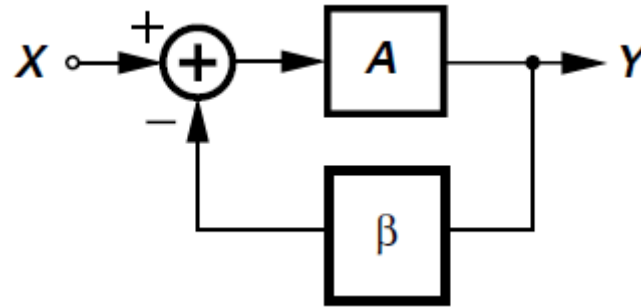


- Ha $g_{m1}r_{O1}$ elegendően nagy, akkor:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1}{C_2}$$

- Az erősítés $g_{m1}r_{O1}$ –hez képest nagy pontossággal beállítható két kapacitás arányával, a hőmérséklettől és a technológiai szórásoktól meglehetősen függetlenül, ha C_1 és C_2 azonos típusú kapacitások
- A zárthurkú erősítés kevésbé érzékeny az eszközparaméterekre, mint a nyílthurkú erősítés (gain desensitization)

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

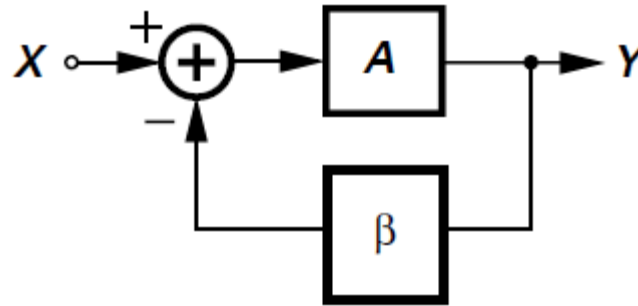


- A frekvenciatartománybeli stabilitás általában romlik a visszacsatolás következtében
- Általános esetben, az erősítés stabilizálása (gain desensitization) a következőképp számszerűsíthető:

$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 + \beta A}$$
$$\approx \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{1}{\beta A} \right)$$

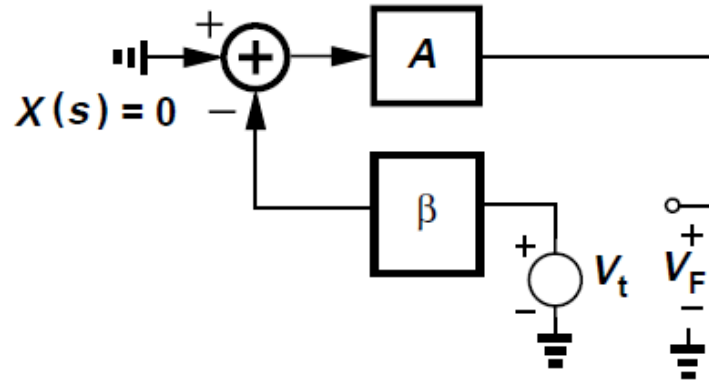
- Feltételezve hogy $\beta A \gg 1$; még ha a nyílthurkú erősítés relatív szórása 2x-es is, Y/X csak jóval kisebb szórással fog rendelkezni mivel $1/(\beta A) \ll 1$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői



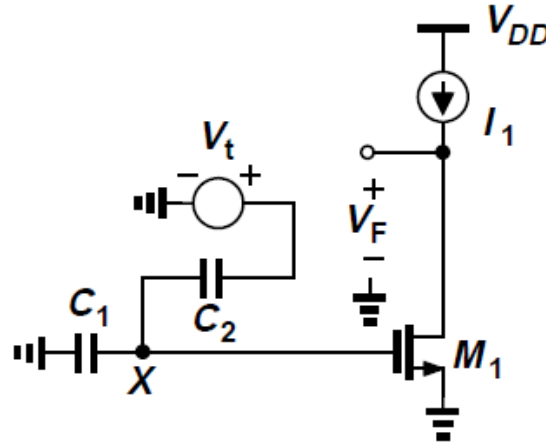
- Az ún. „hurokerősítés” , βA fontos mennyiség a visszacsatolt rendszerekben
- Minél nagyobb βA , annál kevésbé érzékeny Y/X arány A szórásaira, de a zárthurkú erősítés jóval kisebb A -nál, azaz kompromisszumot kötünk az erősítés nagysága és annak pontossága között
- A visszacsatoló hálózat kimenete $\beta Y = X \cdot \beta A / (1 + \beta A)$
mely X -hez közelít, ha βA jóval nagyobb 1-nél

A hurokerősítés kiszámítása



- A hurokerősítés számítása:
- Legyen a bemeneti (AC) jel zérus
- Injektáljunk a hurokba a teszt jelet a „helyes” irányban
- Kövessük a jelet körben a hurokban, és vegyük azt az értéket, mellyel visszatér a hurok felszakítási pontjába
- Az így meghatározott átviteli függvény mínusz egyszerese a hurokerősítés
- A hurokerősítés dimenziótlan mennyiség
- A fenti ábrán, $V_t \beta (-1) A = V_F$ így $V_F / V_t = -\beta A$

A hurokerősítés kiszámítása: példa



- Az előbb megismert módszert a fenti áramkörre alkalmazva:

$$V_X = V_t C_2 / (C_1 + C_2)$$

$$V_t \frac{C_2}{C_1 + C_2} (-g_{m1} r_{O1}) = V_F$$

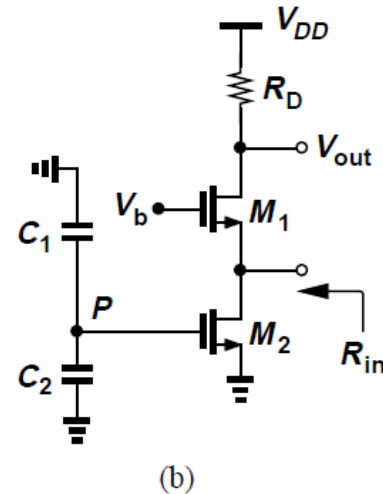
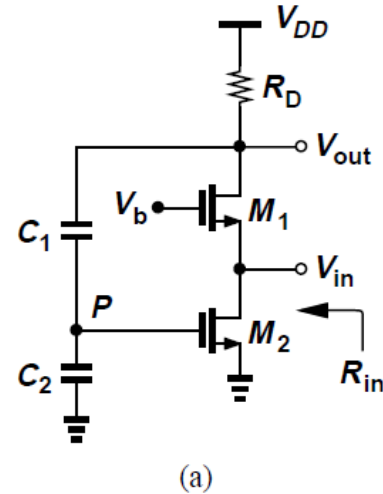
- Ezzel,

$$\frac{V_F}{V_t} = -\frac{C_2}{C_1 + C_2} g_{m1} r_{O1}$$

- C_2 által a bementről „ellopott” áramot elhanyagoltuk

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Impedanciák megváltozása: Bemeneti impedancia

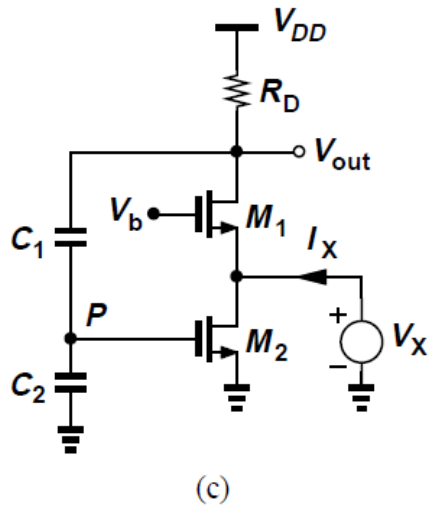


- Az (a) áramkörben egy kapacitív osztó érzékeli a közös gate fokozat kimenetét, és az eredményt az M_2 áramgenerátor gate-jére juttatja, ezen keresztül pedig a bemeneti pontra
- A csatornahossz-modulációt és a C_1 által vezetett áramot elhanyagolva, majd az áramkört a (b) ábra szerint szétbontva:

$$R_{in,open} = \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}$$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Impedanciák megváltozása: Bemeneti impedancia
- A zárthurkú áramkörre a (c) ábrán írható:



$$V_{out} = (g_{m1} + g_{mb1}) V_X R_D$$

$$V_P = V_{out} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

- Hozzáadva M_1 és M_2 kisjelű drain áramát,

$$\begin{aligned} I_X &= (g_{m1} + g_{mb1}) V_X + g_{m2} (g_{m1} + g_{mb1}) \frac{C_1}{C_1 + C_2} R_D V_X \\ &= (g_{m1} + g_{mb1}) \left(1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) V_X \end{aligned}$$

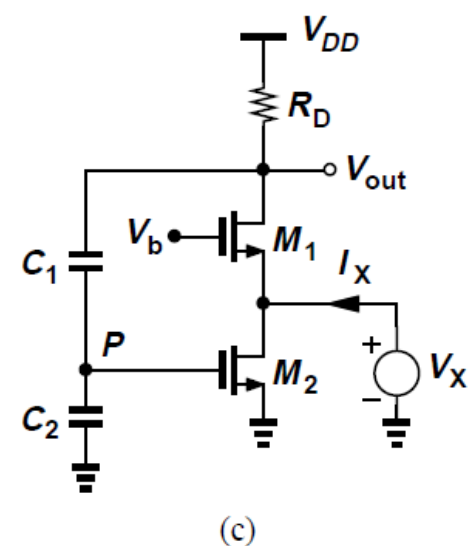
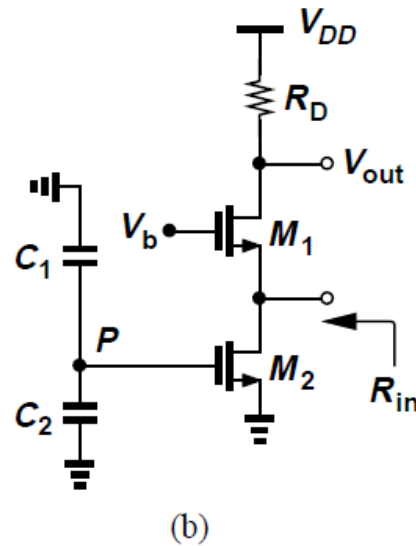
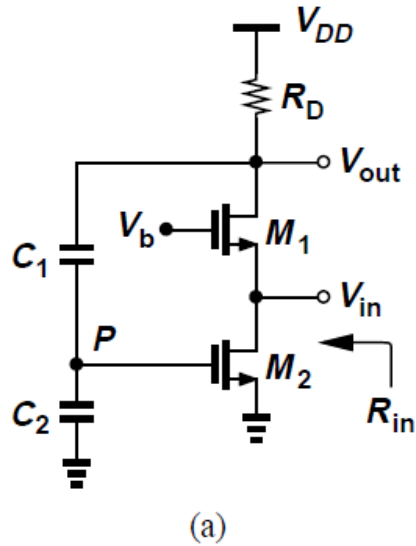
- Folytatva az impedanciára:

$$R_{in,closed} = V_X / I_X$$

$$= \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}} \frac{1}{1 + g_{m2} R_D \frac{C_1}{C_1 + C_2}}$$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

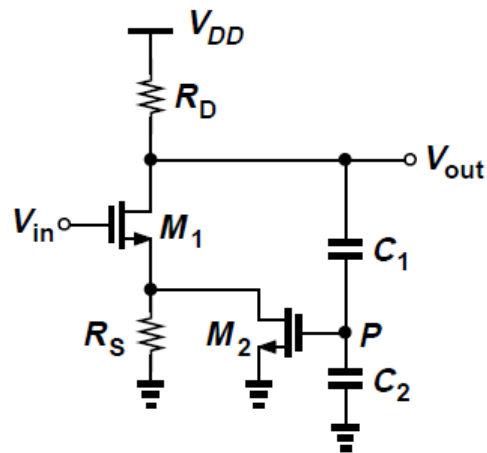
- Impedanciák megváltozása: Bemeneti impedancia



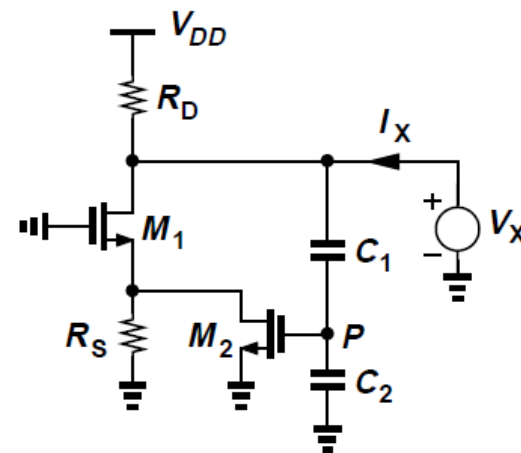
- A visszacsatolás csökkenti a bemeneti impedanciát $1 + g_{m2}R_D C_1 / (C_1 + C_2)$ -vel
- Belátható, hogy $g_{m2}R_D C_1 / (C_1 + C_2)$ a hurokerősítés

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Impedanciák megváltozása: Kimeneti impedancia



(a)



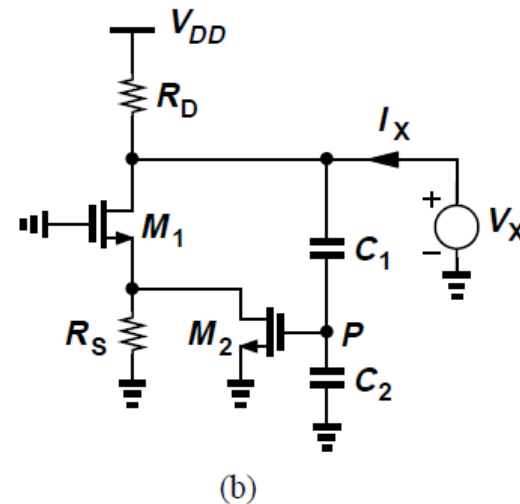
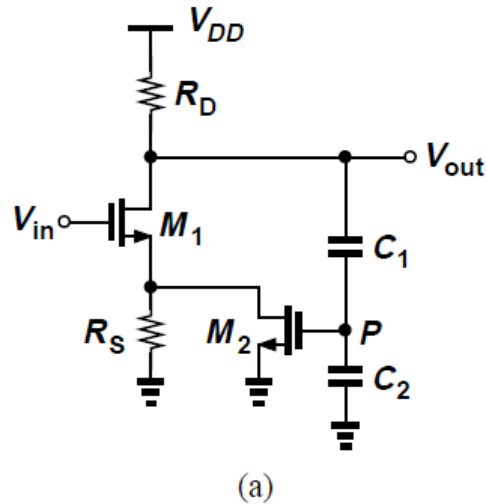
(b)

- Az (a) ábrán M_1 , R_S és R_D egy közös source fokozatot alkot és C_1 , C_2 és M_2 a kimeneti feszültséget érzékeli amivel egy $[C_1/(C_1 + C_2)]V_{out}g_{m2}$ nagyságú áramot csatol vissza M_1 source-ára.
- A kimeneti impedancia alacsony frekvencián való kiszámításához vegyük a bemenetet zérusnak (b ábra), így:

$$I_{D1} = V_X \frac{C_1}{C_1 + C_2} g_{m2} \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{g_{m1} + g_{mb1}}}$$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Impedanciák megváltozása: Kimeneti impedancia



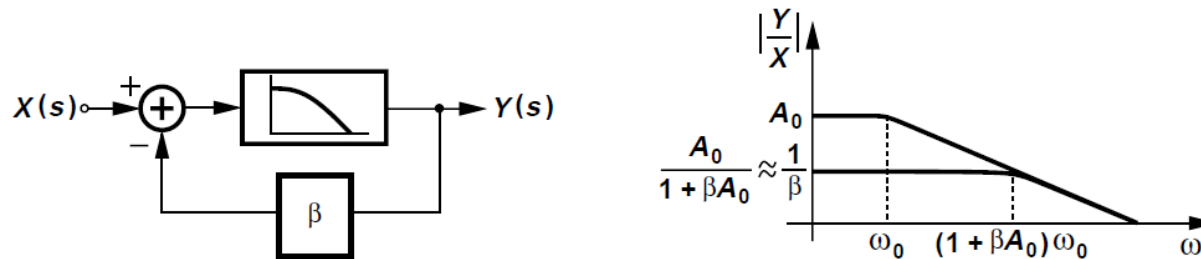
- Mivel $I_X = V_X / R_D + I_{D1}$, ezért:

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_D}{1 + \frac{g_{m2} R_S (g_{m1} + g_{mb1}) R_D}{(g_{m1} + g_{mb1}) R_S + 1} \frac{C_1}{C_1 + C_2}}$$

- A fenti eredmény azt mutatja, hogy a visszacsatolás csökkenti a kimeneti impedanciát
- Belátható, hogy a nevező $1 +$ a hurokerősítés

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Sávszélesség változása:



- Tegyük fel, hogy az előrecsatoló ágban lévő erősítőnek egy pólusa van

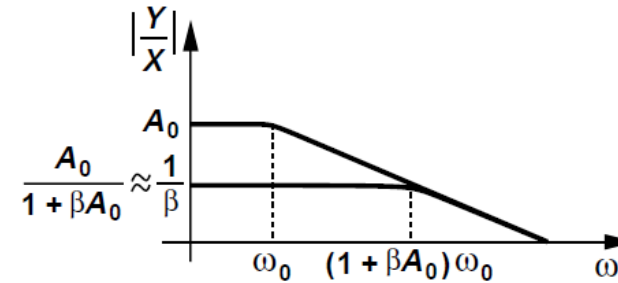
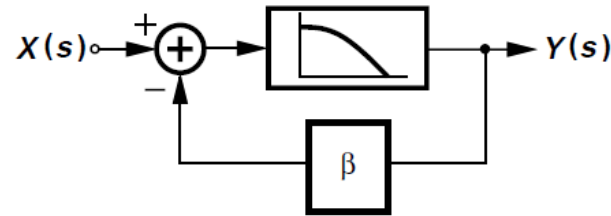
$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

- A_0 az alacsonyfrekvenciás erősítés, ω_0 pedig a 3 dB-es töréspont
- A zárthurkú rendszer átviteli függvénye:

$$\frac{Y}{X}(s) = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}}{1 + \beta \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0 + \frac{s}{\omega_0}} = \frac{\frac{A_0}{1 + \beta A_0}}{1 + \frac{s}{(1 + \beta A_0)\omega_0}}$$

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Sávszélesség változása:

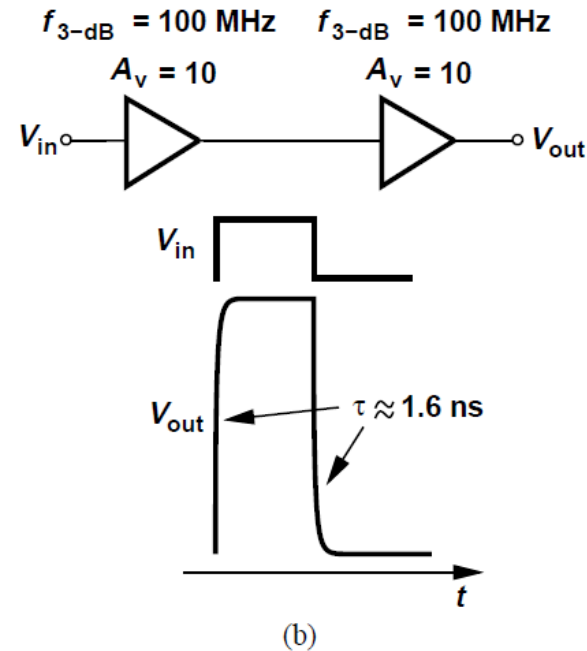
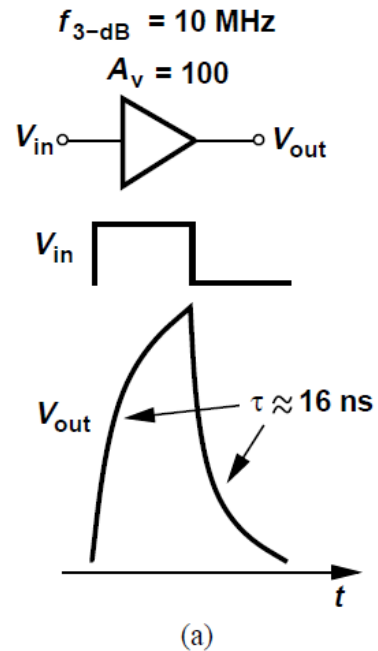


- A zárthurkú erősítés alacsony frekvenciákon $1 + \beta A_0$ -val csökken, a 3 dB-es töréspont is ugyanígy változik, ezáltal a pólus $(1 + \beta A_0)\omega_0$ -ra kerül
- Ha A_0 elég nagy, a zárthurkú erősítés nagyjából $1/\beta$ még A_0 lényeges megváltozása esetén is
- Nagyfrekvencián A lecsökken, így βA közel egységnyi lesz, a zárthurkú erősítés pedig $1/\beta$ alá csökken

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Sávszélesség változása:
- Egypólusú rendszer erősítés-sávszélesség szorzata ($A_0\omega_0$) nem változik meg a visszacsatolással

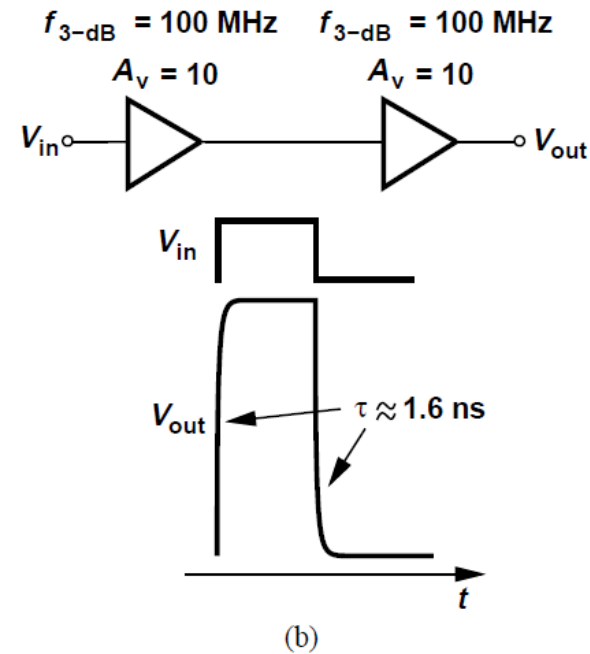
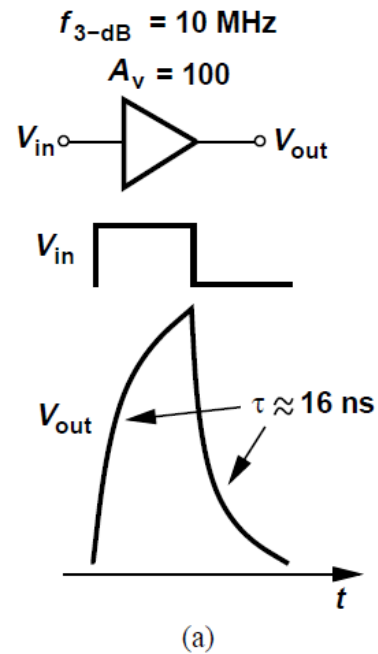
$$1/(2\pi f_{3\text{-dB}}) \approx 16 \text{ ns}$$



- Egy egypólusú, 100-as nyílthurkú erősítéssel és 10 MHz-es 3 dB-es törésponti frekvenciával rendelkező erősítő egy 20 MHz-es négyszögjelre hosszú fel- és lefutási idővel fog csak tudni válaszolni [(a) ábra]

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

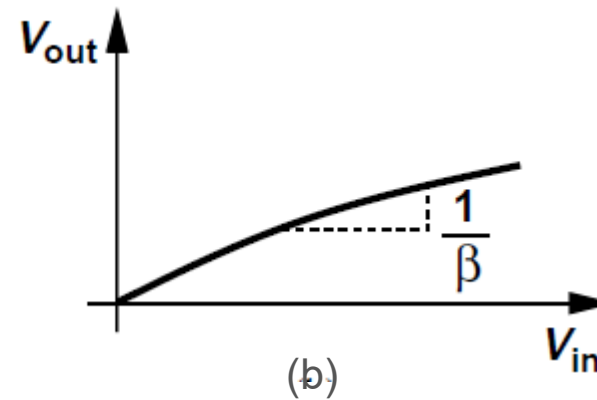
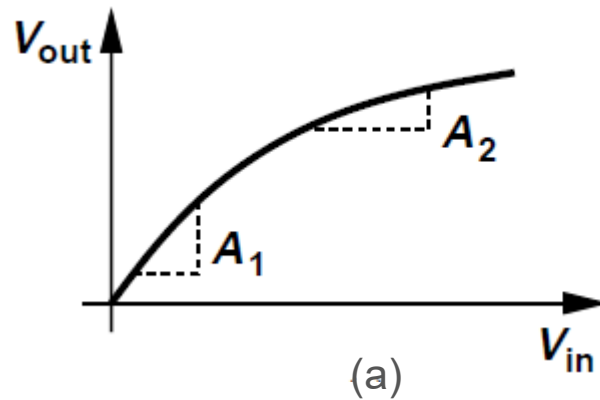
- Sávszélesség változása:



- Csatlózzuk az előbbi erősítőt oly módon, hogy az erősítése 10-szeres, a sávszélessége pedig 100 MHz legyen
- Két ilyen erősítő kaszkádja sokkal gyorsabb választ fog produkálni azonos eredő erősítés mellett [(b) ábra], kétszeres fogyasztás árán

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

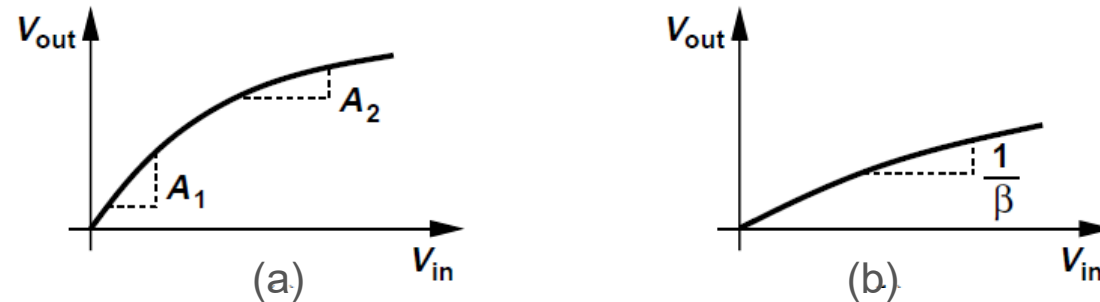
- Nemlinearitás csökkenése:
- Analóg áramkörökben a visszacsatolás csökkenti a nemlinearitásokat



- Egy nemlineáris karakterisztika eltér egy egyenestől, azaz a meredeksége (kisjelű erősítése) változó [(a) ábra]
- Egy zárt hurokban működő erősítő nagyobb linearitással, kisebb erősítés változásokkal rendelkezik változó [(b) ábra]

Visszacsatolt rendszerek jellemzői

- Nemlinearitás csökkenése:



- Az (a) ábrán, a nyílthurkú erősítések aránya az 1-es és 2-es régiók között

$$r_{open} = \frac{A_2}{A_1}$$

- Legyen $A_2 = A_1 - \Delta A$, ezután felírhatjuk, hogy:

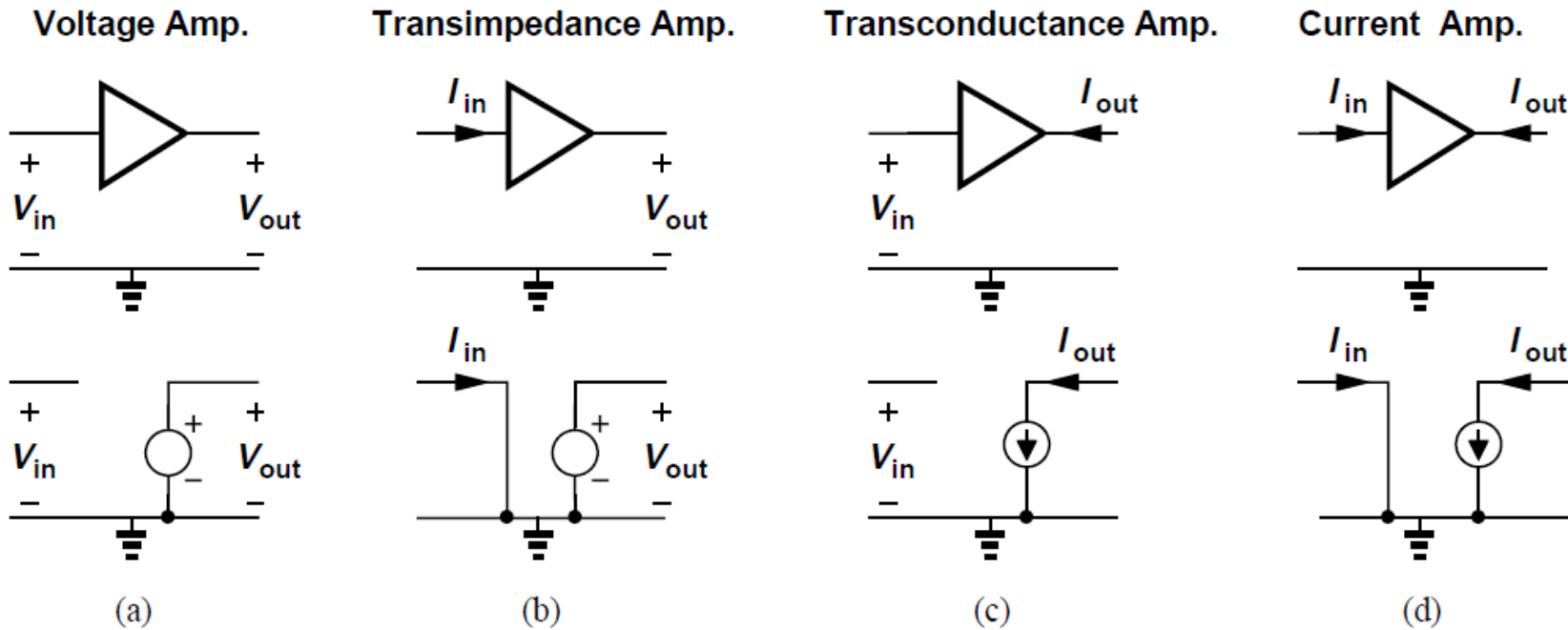
$$r_{open} = 1 - \frac{\Delta A}{A_1}$$

- A negatívan visszacsatolt erősítő esetén [(b) ábra] a zárthurkú erősítések aránya jóval közelebb van 1-hez, ha a hurokerősítés, $1 + \beta A_2$, nagy:

$$r_{closed} = \frac{\frac{A_2}{1 + \beta A_2}}{\frac{A_1}{1 + \beta A_1}} \approx 1 - \frac{\Delta A}{1 + \beta A_2} \frac{1}{A_1}$$

Erősítők típusai

- Négy erősítőtípust lehet megkülönböztetni attól függően, hogy a ki- és bemeneti mennyiség áram vagy feszültség

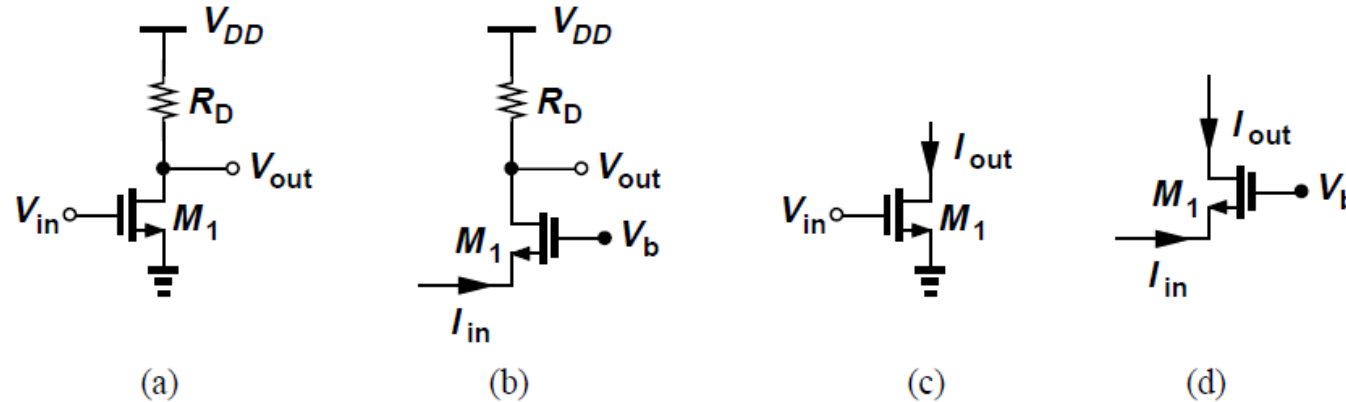


- Az (a) – (d) ábrák az egyes erősítő típusokat mutatják a hozzájuk tartozó ideális helyettesítő képpel

Erősítők típusai

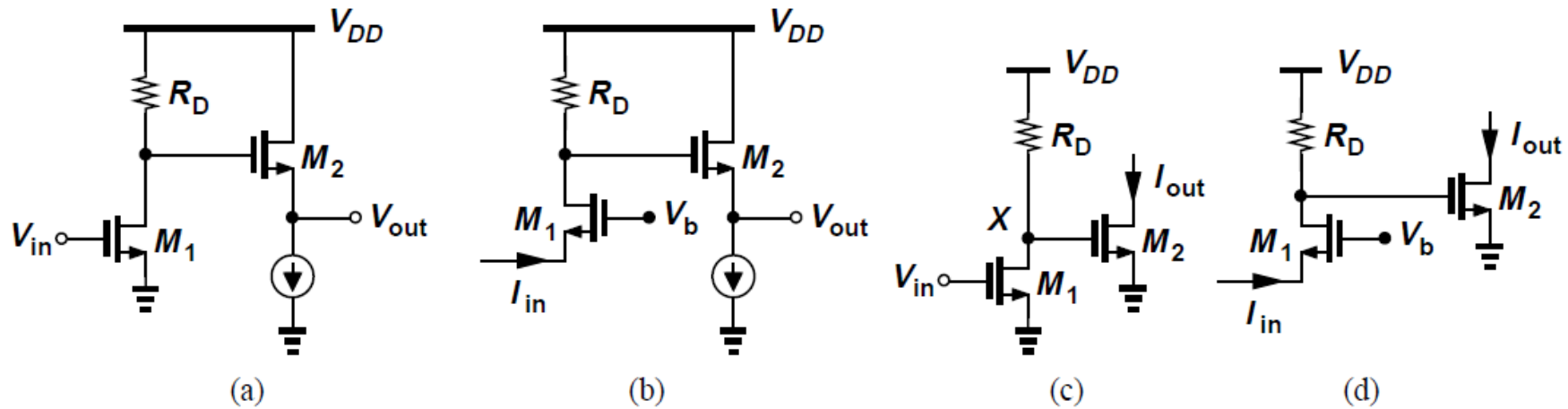
- A négy típus meglehetősen eltérő tulajdonságokkal rendelkezik
- A feszültséget érzékelő áramkörök nagy bemeneti impedanciával kell, hogy rendelkezzenek, áram érzékeléséhez (méréséhez) viszont alacsony bemeneti impedancia szükséges
- Feszültséget előállító áramköröknek kis kimeneti impedanciát kell mutatniuk, míg áramkimenet esetén nagy kimeneti impedancia szükséges
- A transzimpedancia-erősítés dimenziója ellenállás, míg a transzkonduktancia-erősítő átvitele vezetés (konduktancia) dimenziójú
- Fontos a megfelelő előjelkonvenciók követése, figyelembe kell venni a transzkonduktancia- és transzimpedancia-erősítők ki-és bemeneti áramirányait

Erősítők típusai



- Az (a) ábrán a közös source fokozat feszültséget érzékel, és feszültséget generál
- A (b) ábrán a közös gate fokozat transzimpedancia-erősítőként szolgál, a bemeneti áramot a drain-jén feszültséggé konvertálva
- A (c) ábrán a közös source tranzisztor transzkonduktancia-erősítőként működik (V/I konverter), kimeneti áramot generálva egy bemeneti feszültségből
- A (d) ábrán látható közös gate eszköz áramot érzékel és áramot is juttat a kimenetére

Erősítők típusai

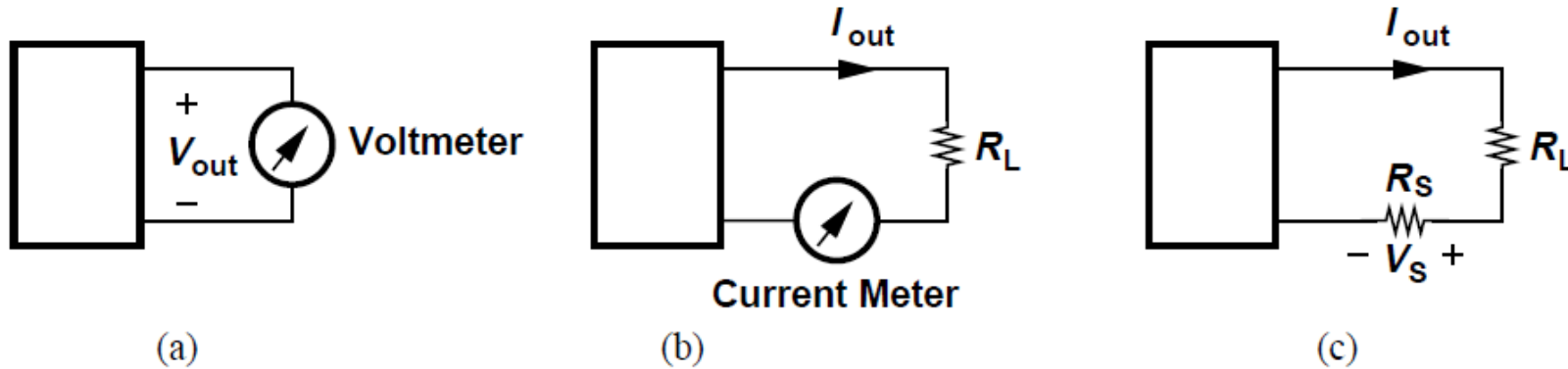


- Az (a) – (d) ábrákon korábban látott erősítőkhez további fokozatok kapcsolódnak, melyek megváltoztatják a kimeneti impedanciát, vagy növelik az eredő erősítést

Visszacsatolás típusai

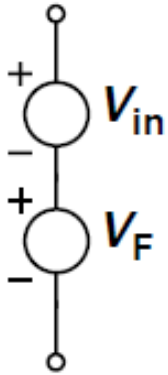
- Egy áramkör visszacsatolásához szükséges a kimeneti jelet érzékelni, és annak egy részét a bemeneti összegző pontra visszajuttatni
- A visszacsatolás négy típusa (kimeneten mért mennyiség – bemenetre visszajuttatott mennyiség):
 - Feszültség – feszültség
 - Feszültség – áram
 - Áram – áram
 - Áram – feszültség

A kimeneti jel érzékelése

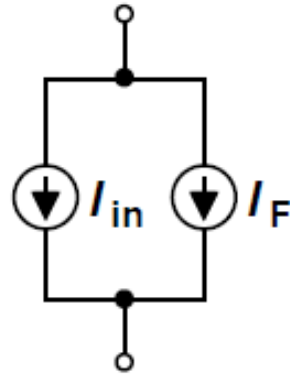


- Feszültség mérése a kimenettel párhuzamosan történik [(a) ábra], ideálisan zérus terheléssel – végtelen ellenállással, (párhuzamos v. sönt visszacsatolás)
- Áram érzékelése a kimeneti mennyiség megváltoztatása nélkül a kimenettel sorban lehetséges [(b) ábra], ideálisan nulla ellenállással (soros visszacsatolás)
- Gyakorlatban az árammérőt egy kis értékű ellenállással helyettesítjük [(c) ábra], és az ezen eső feszültség fog szolgálni mért mennyiségként

A kimenettel arányos jel visszacsatolása a bemenetre



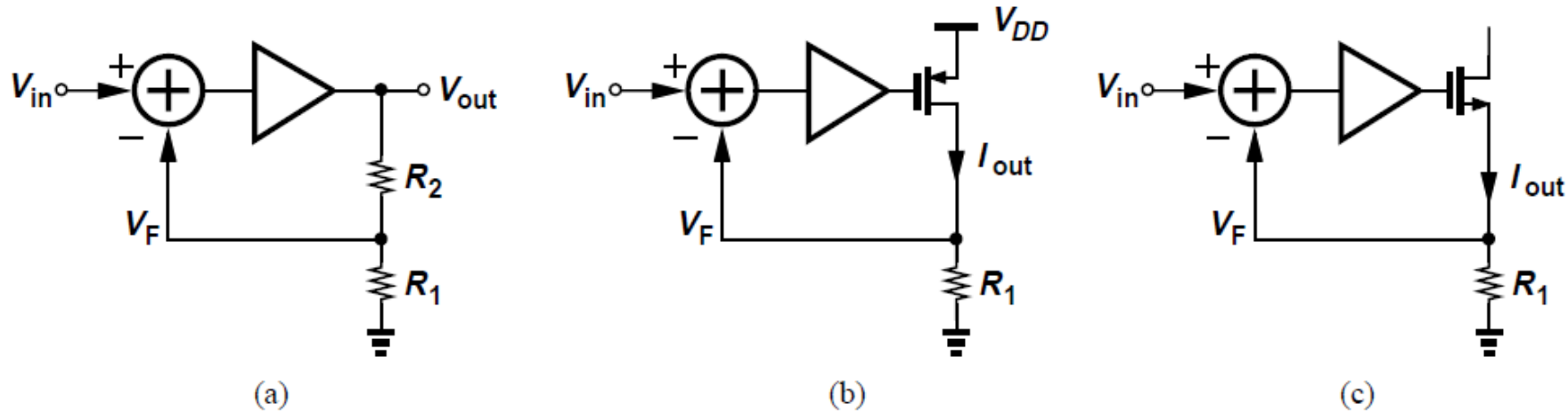
(a)



(b)

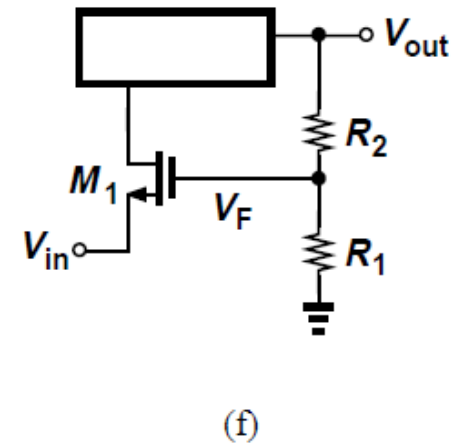
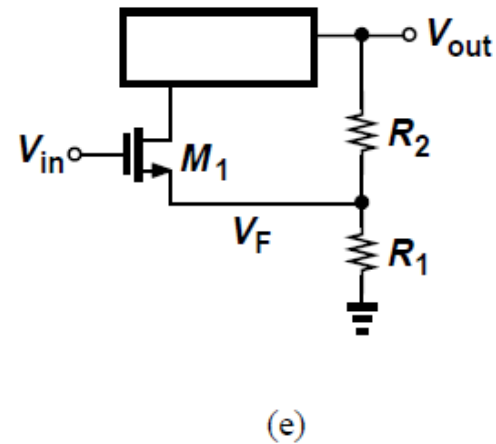
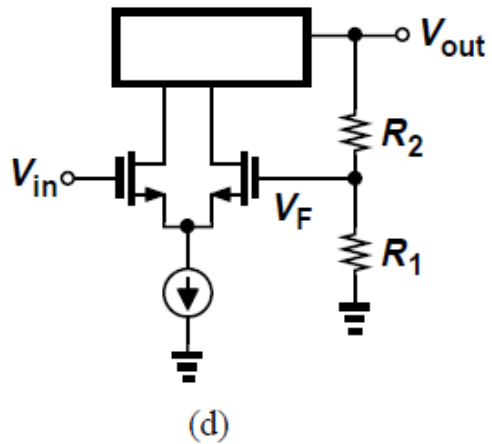
- A visszacsatolt jel összegzése a bemeneti jellel feszültségként vagy áramként is lehetséges
- A feszültséget sorban [(a) ábra], az áramokat párhuzamosan [(b) ábra] adjuk a össze

Kimeneti jel érzékelése



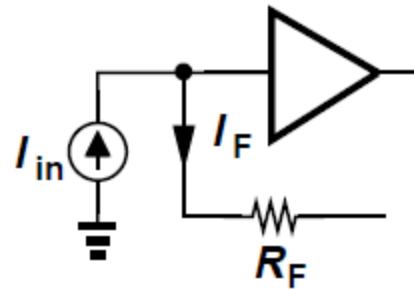
- Kimeneti feszültség mérése lehetséges egy rezisztív vagy kapacitív osztóval a kimenettel párhuzamosan [(a) ábra]
- Kimeneti áram mérése lehetséges egy kis értékű soros ellenállással [(b) és (c) ábrák]

Visszacsatolt jel és bemeneti jel összegzése

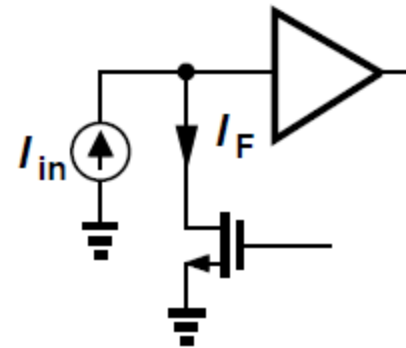


- Két feszültség kivonására alkalmas lehet egy differenciálpár [(d) ábra]
- Egyetlen tranzisztor is alkalmas lehet feszültségek kivonására [(e) és (f) ábrák], hiszen az I_{D1} áram ($V_{in} - V_F$) függvénye

Visszacsatolt jel és bemeneti jel összegzése



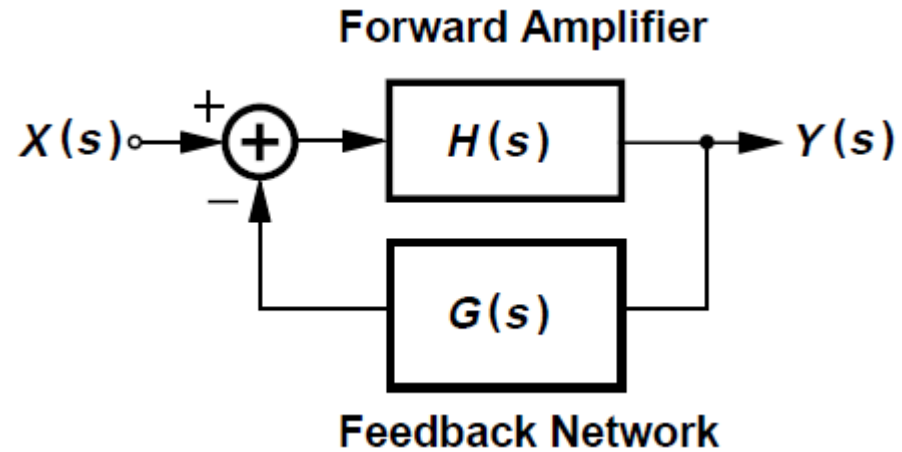
(g)



(h)

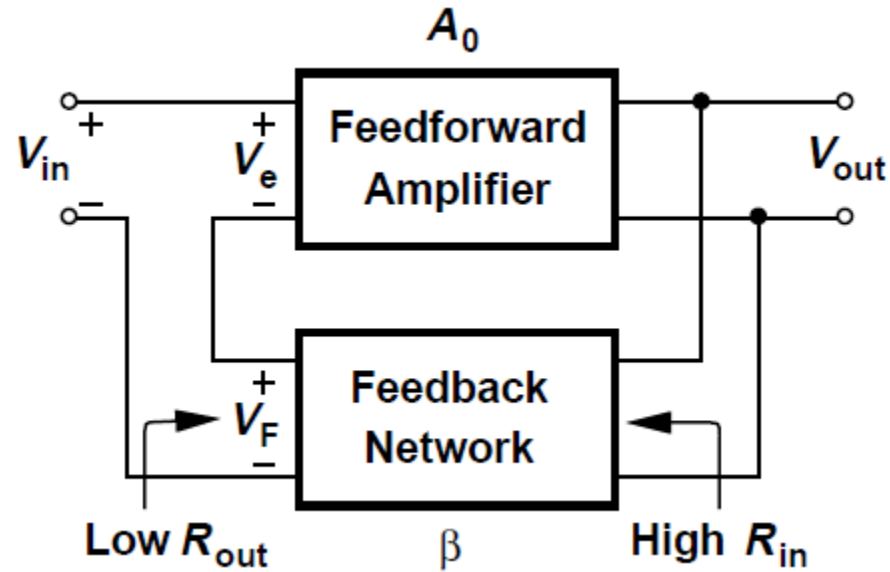
- Áramok kivonása lehetséges a (g) és (h) ábrákon látható módon
- Feszültségek kivonásához a bemeneti jelet és a visszacsatolt jelet két különböző pontra kell kötni
- Áramok kivonásához a két jelet azonos csomóponttra kell juttatni

Visszacsatolási topológiák



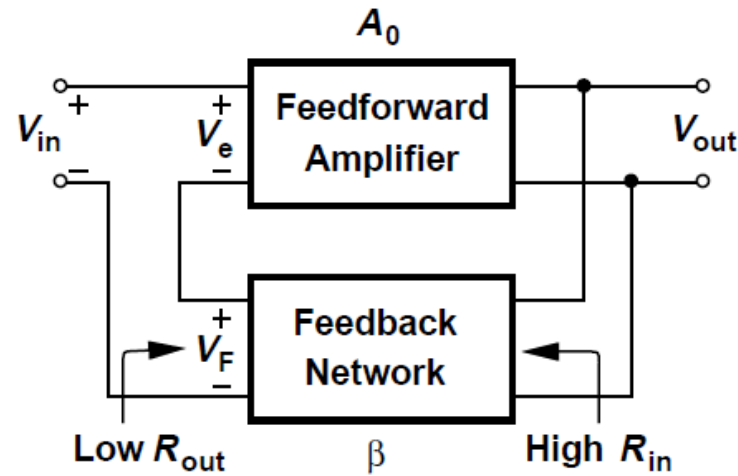
- A fenti ábrán X és Y áram vagy feszültség is lehet
- A fő erősítő az „előrecsatoló” erősítő, ami köré a visszacsatolást elhelyezzük
- Négy alapvető topológia lehetséges attól függően, hogy a négy alapvető erősítő közül melyiket használjuk negatívan visszacsatolva

Feszültség-feszültség visszacsatolás



- Ez a topológia a kimeneti feszültséget méri és azzal arányos feszültség jelet juttat vissza a bemenetre
- A visszacsatoló hálózat a kimenettel párhuzamosan, a bemenettel sorosan kapcsolódik
- Így ebben az esetben az ideális visszacsatoló hálózat végtelen bemenő impedanciával (ideális voltmérő) és zérus kimenő impedanciával (ideális feszültségforrás) rendelkezik

Feszültség-feszültség visszacsatolás

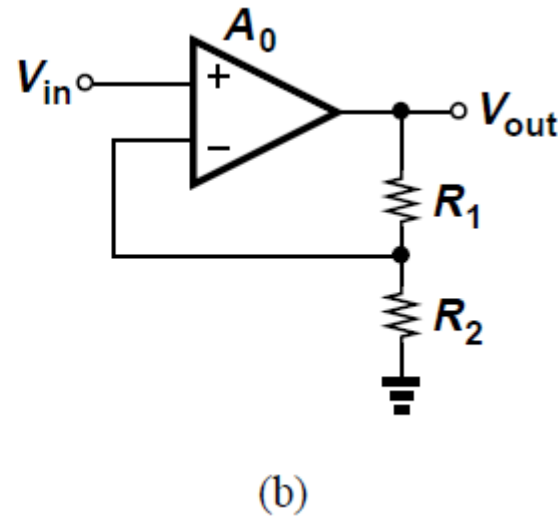
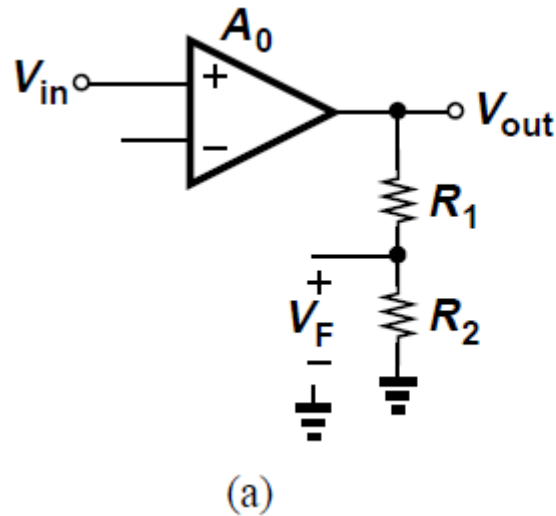


- Ezt a típust soros feszültségvisszacsatolásnak is hívjuk (az ilyen típusú elnevezésekben az első tag a bemenetre, a második tag a kimenetre vonatkozik)
- Mivel: $V_F = \beta V_{out}$, $V_e = V_{in} - V_F$, $V_{out} = A_0(V_{in} - \beta V_{out})$, ezért:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0}$$

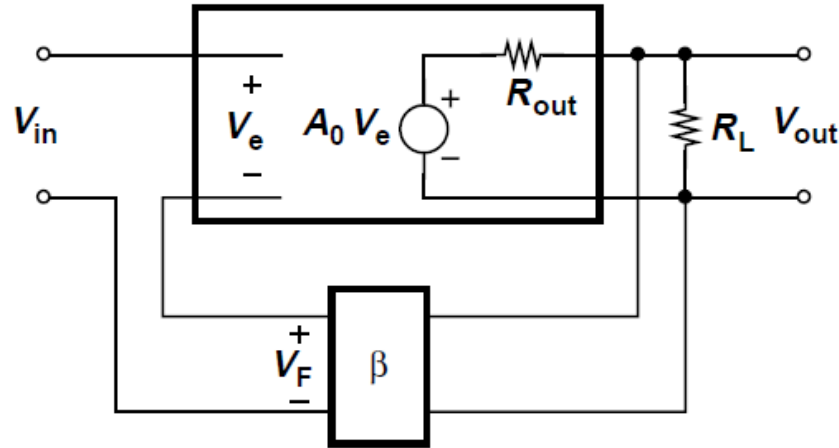
- βA_0 a hurokerősítés, a teljes erősítés lecsökkent $(1 + \beta A_0)$ -val

Feszültség-feszültség visszacsatolás



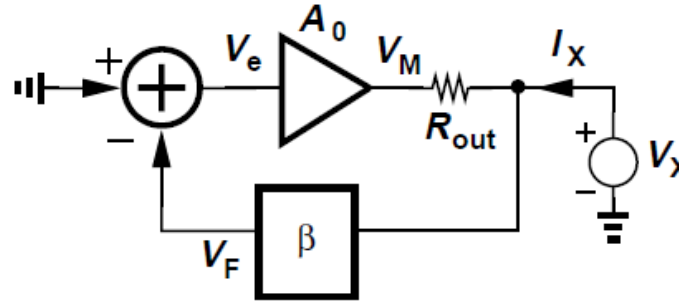
- A feszültség-feszültség visszacsatolás példa: egy differenciális feszültség erősítő single-ended kimenettel szolgálhat előrecsatoló erősítőként, egy ellenállásosztó pedig visszacsatoló hálózatként [(a) ábra]
- A mért feszültség (V_F) sorosan kapcsolódik a bemenetre, hogy a két feszültség különbségképzése létrejöjjön.

Feszültség-feszültség visszacsatolás: Kimeneti ellenállás változtása



- Ha a kimenetet egy R_L ellenállással terheljük (nyílt hurokban), a kimenet lecsökken a $R_L/(R_L+R_{out})$ -arányának megfelelően
- Zárt hurokban V_{out} megmarad V_{in} egy állandó replikájának R_L értékétől függetlenül egészen addig ameddig a hurokerősítés sokkal nagyobb, mint egységnyi.
- A visszacsatolt áramkör kimeneti feszültsége így stabil a kimeneti terhelés esetleges változásai ellenére, feszültségforrásként viselkedik, alacsony kimeneti impedanciával rendelkezik

Feszültség-feszültség visszacsatolás: Kimeneti ellenállás változtása

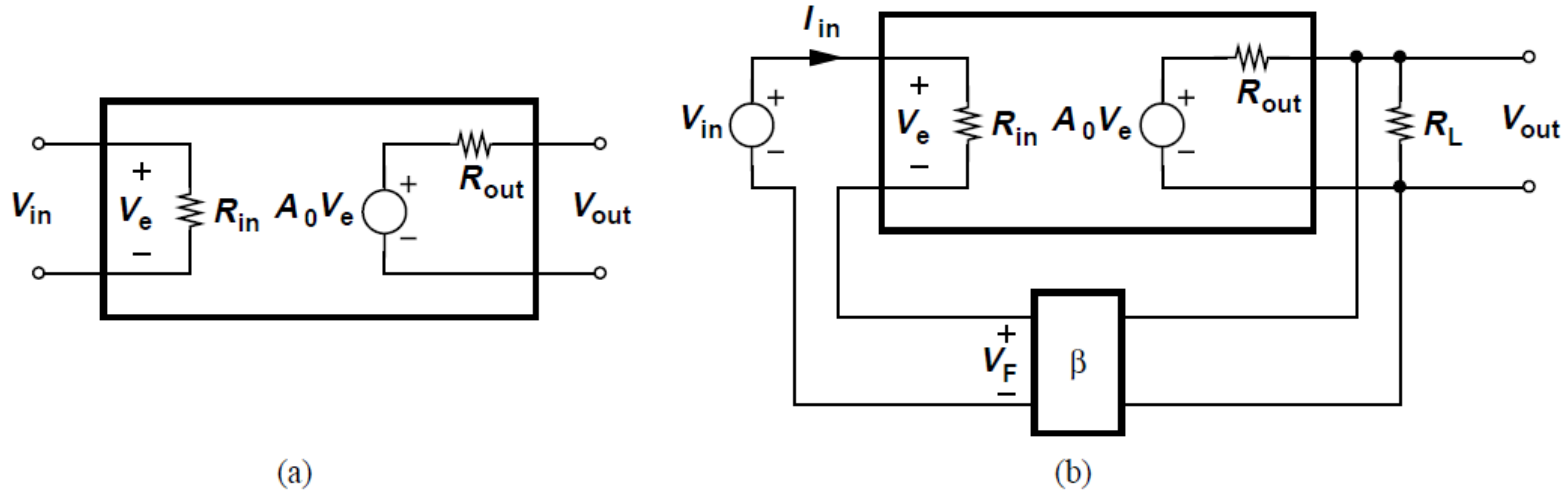


- A fenti modellben R_{out} az előrecsatoló erősítő kimeneti impedanciáját jelöli
- A bemeneti jelet zérusnak választva és feszültséget adva a kimenetre a következőt írhatjuk fel:
 $V_F = \beta V_X$, $V_e = -\beta V_X$, $V_M = -\beta A_0 V_X$, így pedig:
 $I_X = [V_X - (-\beta A_0 V_X)]/R_{out}$ (ha a visszacsatoló hálózatba folyó áramot elhanyagoljuk)
- Ebből következően:

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{out}}{1 + \beta A_0}$$

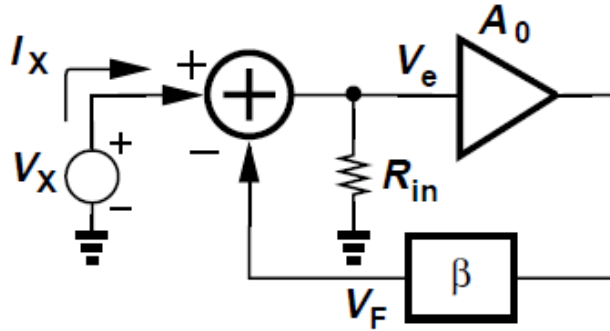
- A kimeneti impedancia és az erősítés ugyanolyan mértékben változott

Feszültség-feszültség visszacsatolás: Bementi ellenállás változtása



- A feszültség-feszültség visszacsatolás a bemeneti impedanciát is megváltoztatja
- Az (a) ábrán (nyílt hurok) az előrecsatoló erősítő bemeneti impedanciáján (R_{in}) esik a teljesen bemeneti feszültség (V_{in}), míg a (b) ábrán (zárt hurokban) csak annak egy része
- A bemeneti áram (I_{in}) kevesebb visszacsatolt esetben a nyílthurkú rendszerhez képest, ezt a bemeneti impedancia növekedéseként értelmezhetjük

Feszültség-feszültség visszacsatolás: Bementi ellenállás

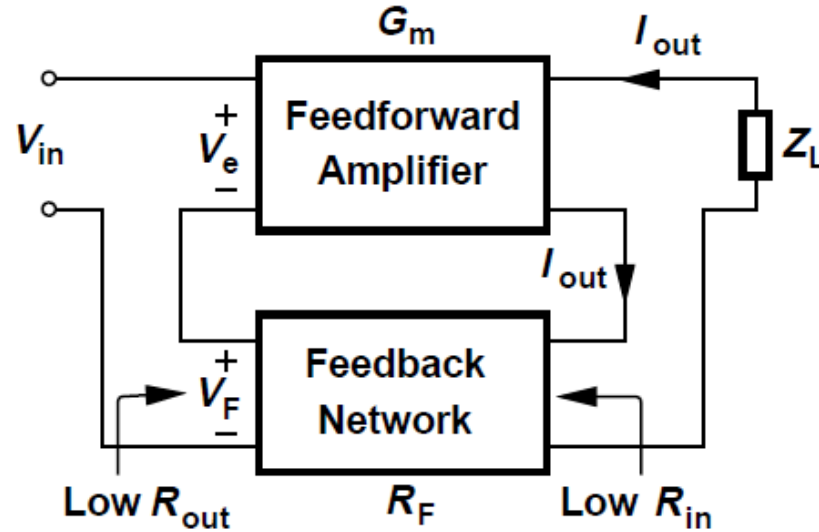


- A fenti modellben, $V_e = I_X R_{in}$ and $V_F = \beta A_0 I_X R_{in}$
- Ezek alapján: $V_e = V_X - V_F = V_X - \beta A_0 I_X R_{in}$
- Amiből $I_X R_{in} = V_X - \beta A_0 I_X R_{in}$, így:

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + \beta A_0)$$

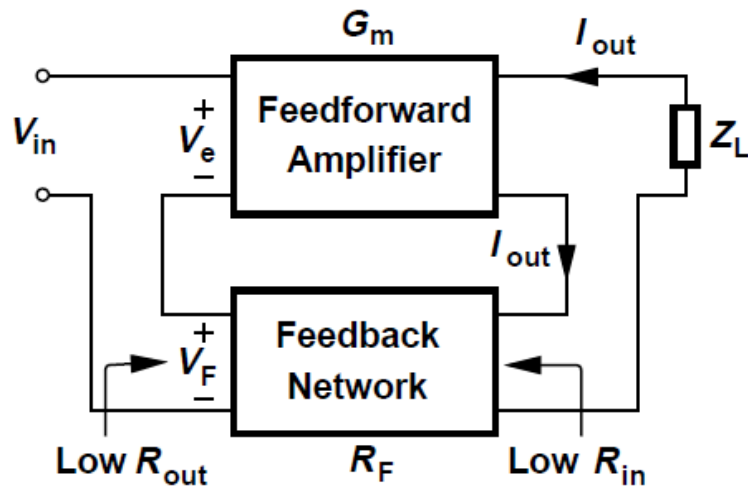
- A bemeneti impedancia $(1 + \beta A_0)$ -szorosára nőtt, amivel az áramkör jobban közelíti az ideális feszültségerősítőt
- A feszültség-feszültség visszacsatolás csökkenti a kimeneti impedanciát és növeli a bemeneti impedanciát, hasznos buffer fokozatoknál

Áram-feszültség visszacsatolás



- Ebben az esetben a kimeneti áramot mérjük, és egy azzal arányos feszültség jelet csatolunk vissza a bemenetre
- Az áram mérése egy kis értékű, a kimenettel sorba kötött ellenálláson történik
- Mivel a visszacsatolási tényező (β) dimenziója ellenállás, ezért R_F -fel jelöljük

Áram-feszültség visszacsatolás

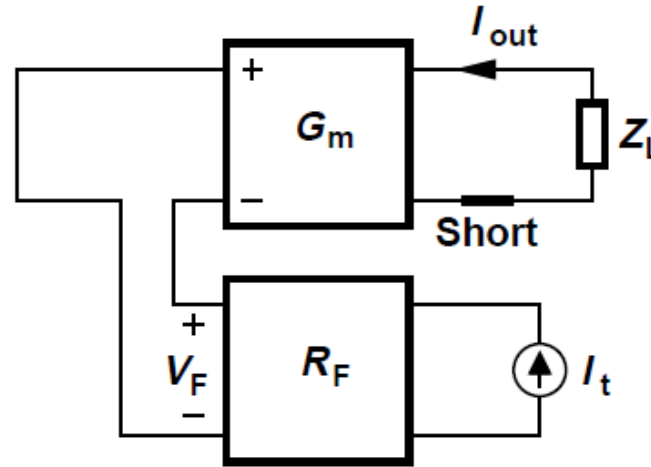


- Egy G_m fokozatot egy véges impedanciával kell lezárni ahhoz, hogy a kimeneti áramot biztosítani tudja
- Ha $Z_L = \infty$ lenne, az ideális G_m fokozat végtelen kimeneti feszültséggel rendelkezne
- Felírhatjuk, hogy: $V_F = R_F I_{out}$, $V_e = V_{in} - R_F I_{out}$ és így: $I_{out} = G_m (V_{in} - R_F I_{out})$
- A fentiek alapján:

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{G_m}{1 + G_m R_F}$$

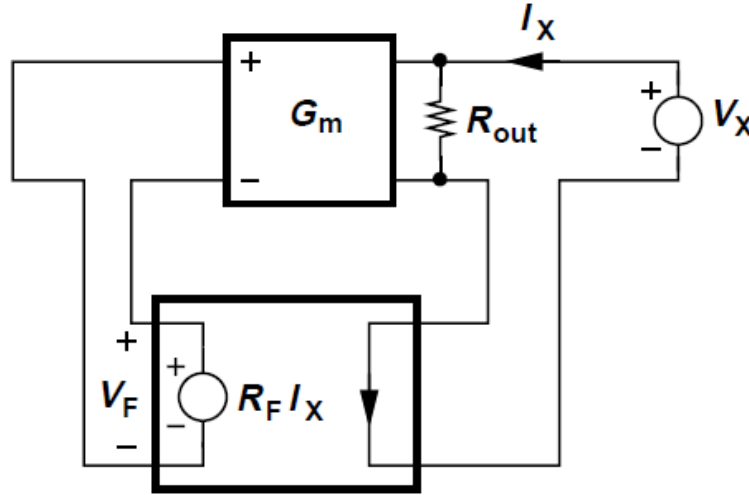
- Az ideális visszacsatoló hálózat ebben az esetben zérus bemenő és kimenő impedanciával rendelkezik

Áram-feszültség visszacsatolás: Hurokerősítés



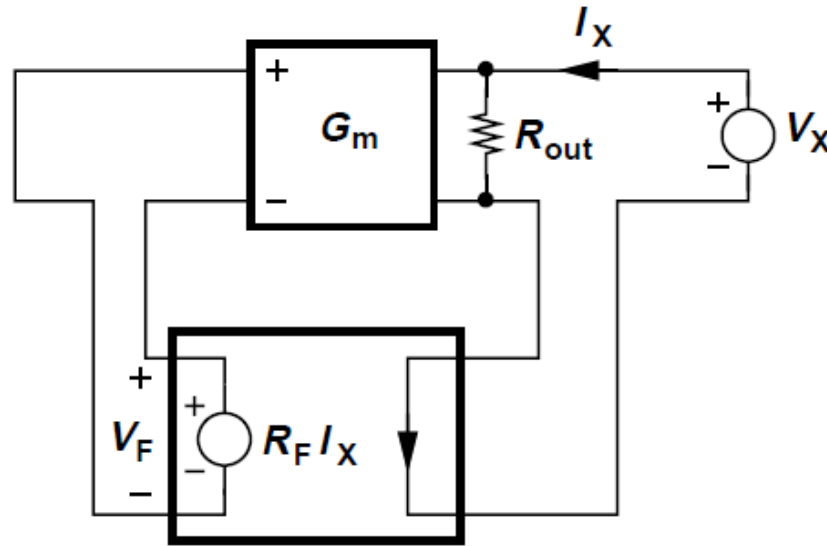
- A hurokerősítés számításához a bemenetre 0 feszültséget adunk, a hurkot pedig felbontjuk úgy, hogy a visszacsatoló hálózatot lekötjük a kimenetről és rövidzárral helyettesítjük (mintha ideális lenne a visszacsatoló hálózat)
- Az I_t teszt jelet a rendszerbe csatolva $V_F = R_F I_t$, ebből $I_{out} = -G_m R_F I_t$
- Így a hurokerősítés $G_m R_F$ és az erősítő transzkonduktanciája $1 + G_m R_F$ értékkel redukálódik ha visszacsatoljuk.

Áram-feszültség visszacsatolás: kimeneti ellenállás



- A kimeneti áram mérés növeli a kimeneti impedanciát
- A rendszer a terheléstől függetlenül ugyanazt az áramot juttatja a kimenetre, megközelítve egy ideális áramforrást, melynek végtelen a kimeneti impedanciája
- A fenti ábrán R_{out} reprezentálja az előrecsatoló a erősítő véges kimenő impedanciáját
- A visszacsatoló hálózat egy I_X -szel arányos V_F feszültséget produkál, azaz: $V_F = R_F I_X$

Áram-feszültség visszacsatolás: kimeneti ellenállás

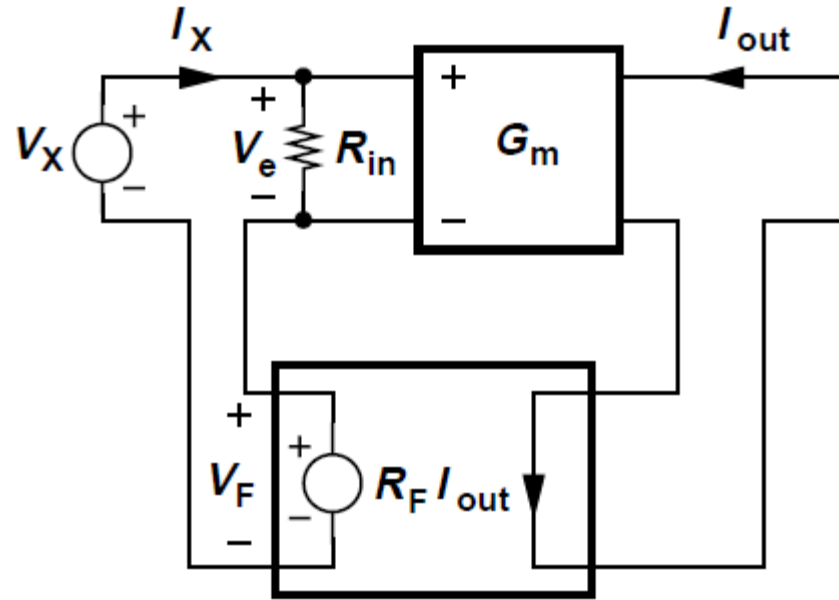


- G_m által generált áram: $R_F I_X G_m$
- Ennek eredményeképp, $-R_F I_X G_m = I_X - V_X / R_{out}$, amiből

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{out}(1 + G_m R_F)$$

- A kimentei impedancia így megnövekedett $(1 + G_m R_F)$ -szeresére

Áram-feszültség visszacsatolás: bemeneti impedancia



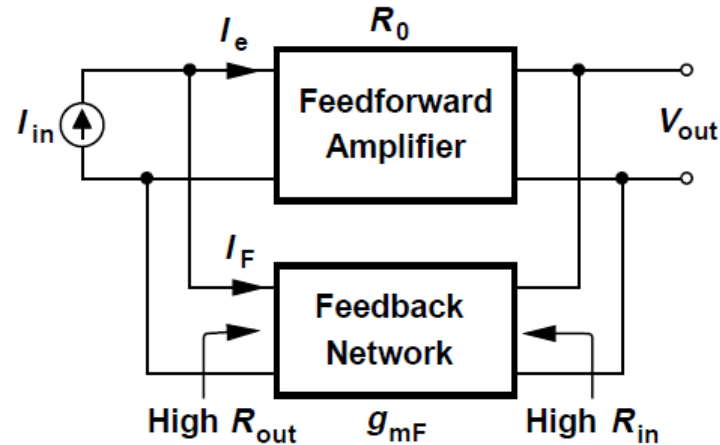
- Az áram-feszültség visszacsatolás megnöveli a bemeneti impedanciát (1+hurokerősítés) mértékben
- Ahogy a fenti ábrán látható, $I_X R_{in} G_m = I_{out}$

- Továbbá $V_e = V_X - G_m R_F I_X R_{in}$, így:

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{in}(1 + G_m R_F)$$

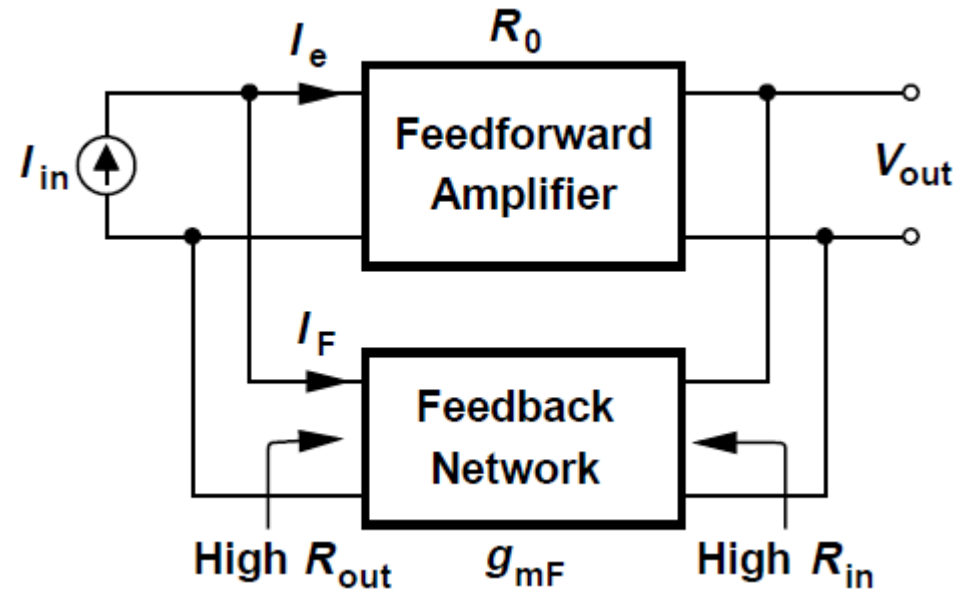
- Az áram-feszültség visszacsatolás mint a bemeneti, mind a kimeneti impedanciát növel, az előrecsatoló transzkonduktanciát pedig csökkenti

Feszültség-áram visszacsatolás



- Ebben az esetben a kimeneten feszültséget mérünk, és egy ezzel arányos áramot juttatunk vissza a bemeneti összegző pontra
- Az előrecsatoló ágban egy transzimpedancia erősítő dolgozik R_0 erősítéssel, a visszacsatolási tényező pedig vezetés jellegű mennyiség, g_{mF}
- A visszacsatoló hálózat ideális esetben végtelen bemenő és kimenő impedanciával rendelkezik
- Párhuzamos feszültségvisszacsatolásnak is nevezzük

Feszültség-áram visszacsatolás

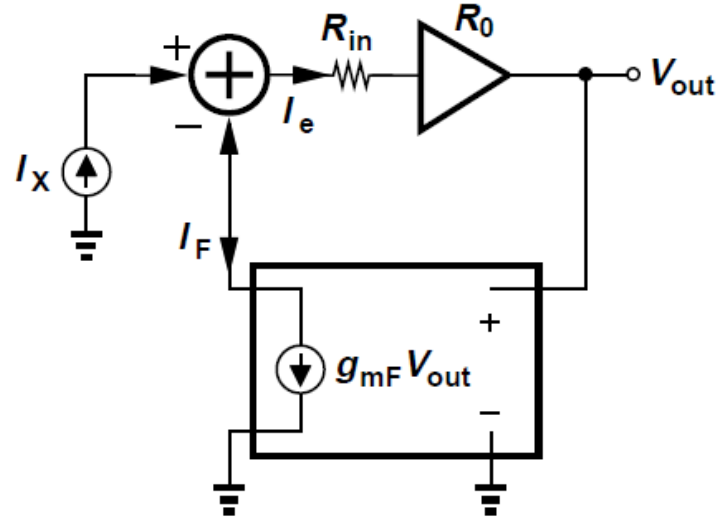


- Mivel $I_F = g_{mF} V_{out}$ és $I_e = I_{in} - I_F$, így $V_{out} = R_0 I_e = R_0 (I_{in} - g_{mF} V_{out})$
- Ez alapján:

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{R_0}{1 + g_{mF} R_0}$$

- A visszacsatolás ezen típusa csökkenti a transzimpedanciát $(1 + \text{hurokerősítés})$ mértékben

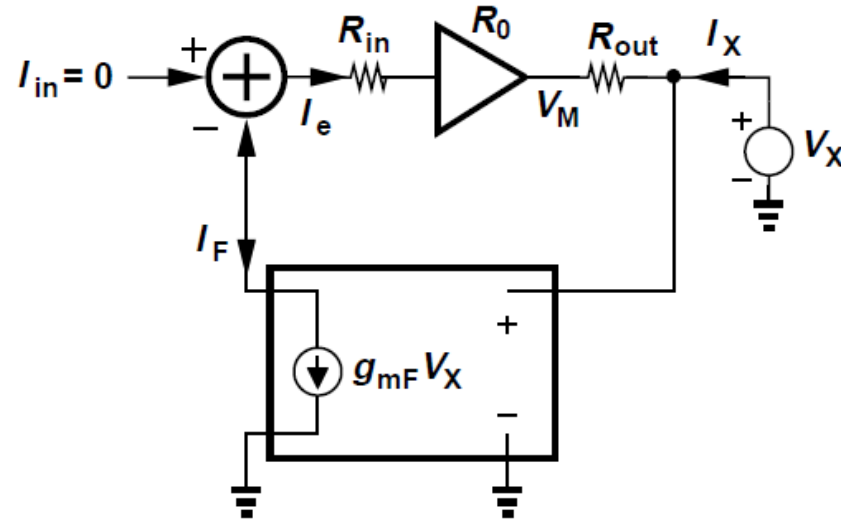
Feszültség-áram visszacsatolás: bemeneti impedancia



- A feszültség-áram visszacsatolás csökkenti a bemeneti impedanciát
- Az R_0 transzimpedancia bemeneti ellenállása (R_{in}) a bemenettel sorosan jelenik meg
- Felírható, hogy $I_F = I_X - V_X/R_{in}$ és $(V_X/R_{in})R_0g_{mF} = I_F$
- Ezért,

$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{in}}{1 + g_{mF} R_0}$$

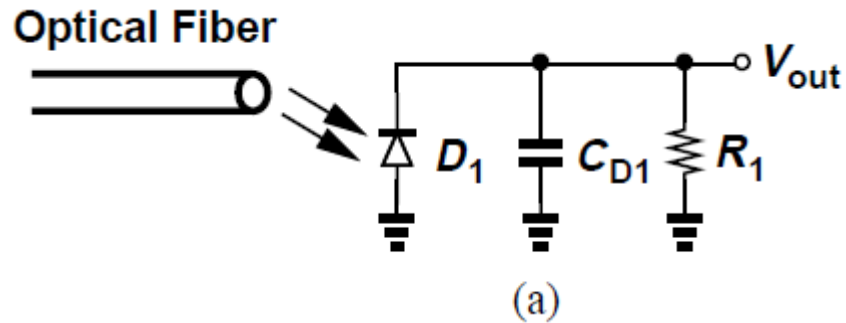
Feszültség-áram visszacsatolás: kimeneti impedancia



- A feszültség-áram visszacsatolás a kimeneti impedanciát is csökkenti
- Az ábra alapján $I_F = V_X g_{mF}$, $I_e = -I_F$, és $V_M = -R_0 g_{mF} V_X$
- A visszacsatoló hálózat bemeneti áramát elhanyagolva: $I_X = (V_X - V_M)/R_{out} = (V_X + g_{mF} R_0 V_X)/R_{out}$
- Ezért:

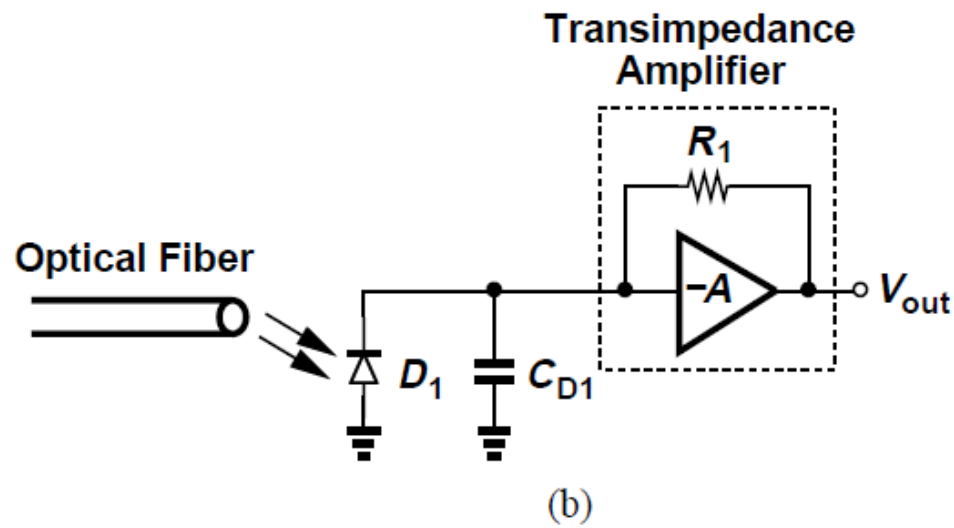
$$\frac{V_X}{I_X} = \frac{R_{out}}{1 + g_{mF} R_0}$$

Feszültség-áram visszacsatolás: Alkalmazások



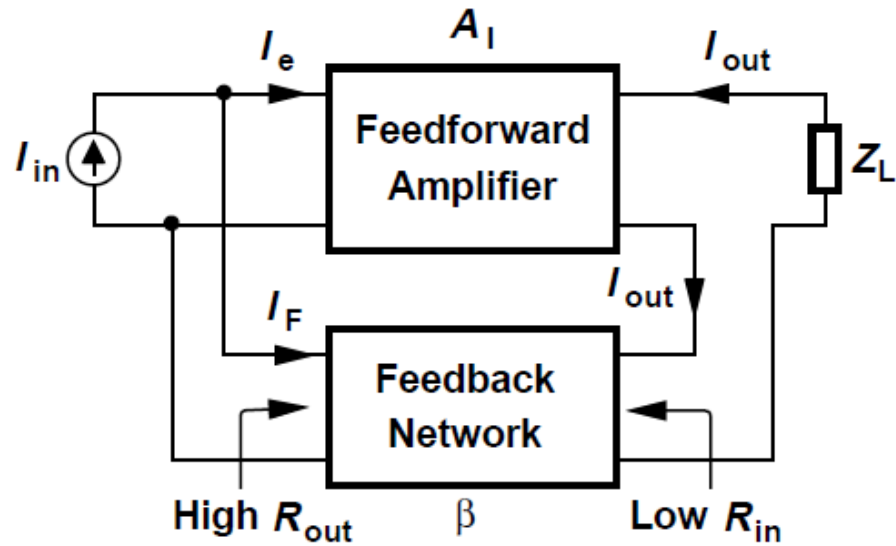
- Optikai szálak vevőerősítőiként alacsony bemenő impedanciájú erősítőket használnak, ahol a szálból jövő fényjelet egy záróirányban előfeszített fotodióda alakítja árammá
- Ezt az áramot feszültséggé alakítjuk, amelyet aztán a következő fokozatok dolgoznak fel
- Az (a) ábra egy ilyen átalakítást mutat ellenállással, ahol a dióda nagy C_{D1} átmeneti kapacitása miatt az átalakításnak sávszélesség csökkenés az ára

Feszültség-áram visszacsatolás: Alkalmazások



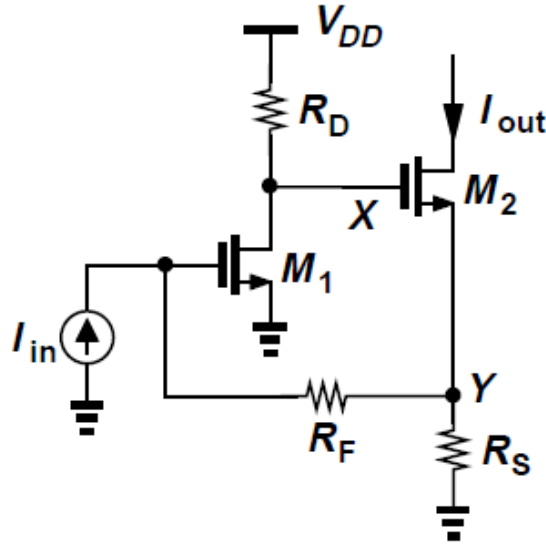
- Az előzőnél egy jobb megoldás a (b) ábrán látható visszacsatolt rendszer használata, ahol az erősítő és az R_1 visszacsatoló ellenállás alkot egy transzimpedancia erősítőt (transimpedance amplifier – TIA)
- A bemeneti impedancia $R_1/(1+A)$, a kimeneti feszültség pedig nagyjából $-R_1 I_{D1}$
- A sávszélesség megnő $1/(2\pi R_1 C_{D1})$ -ről $(1+A)/(2\pi R_1 C_{D1})$, ha az erősítő maga kellő sávszélességgel rendelkezik

Áram-áram visszacsatolás



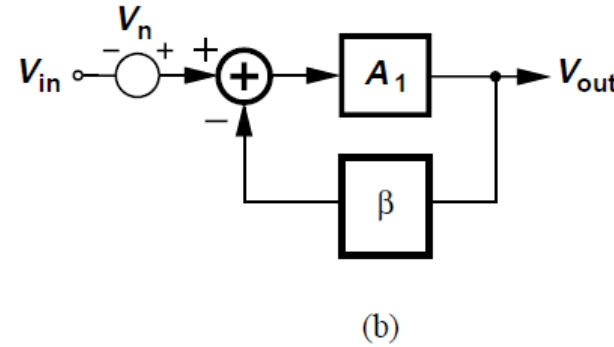
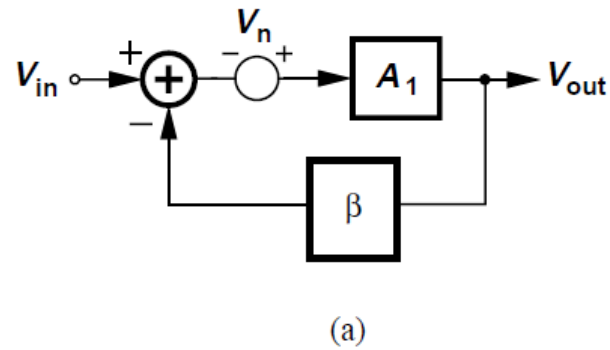
- Az előrecsatoló erősítőt egy A_I áramerősítéssel jellemezzük, a visszacsatoló hálózatot pedig a β áramaránnyal
- Belátható, hogy zárthurkú áramerősítés $A_I/(1+\beta A_I)$, a bemenő impedancia leosztódik $1+\beta A_I$ -val, a kimeneti impedancia pedig felszorzódik $1+\beta A_I$ -val

Áram-áram visszacsatolás: példa



- A fenti ábra egy példát mutat az áram-áram visszacsatolásra
- Mivel M_2 drain és source áramai alacsony frekvencián megegyeznek, az R_S ellenállás hozzáadásával mérhető a kimeneti áram
- Az R_F ellenállás érzékeli az (R_S -en eső) kimeneti feszültséget, és áram jelet juttat a bemenetre

A visszacsatolás hatása a zajra

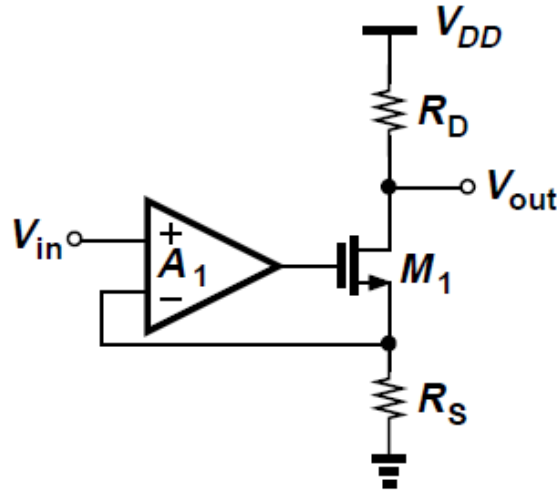


- A visszacsatolásnak nincs hatása a zajra:
- Az (a) ábrán lévő, A_1 nyílthurkú erősítéssel rendelkező erősítőt egy bemenetére vonatkoztatott zajfeszültséggel jellemezzük, a visszacsatoló hálózatot zajtalannak tételezzük fel
- Mivel $(V_{in} - \beta V_{out} + V_n)A_1 = V_{out}$, ezért

$$V_{out} = (V_{in} + V_n) \frac{A_1}{1 + \beta A_1}$$

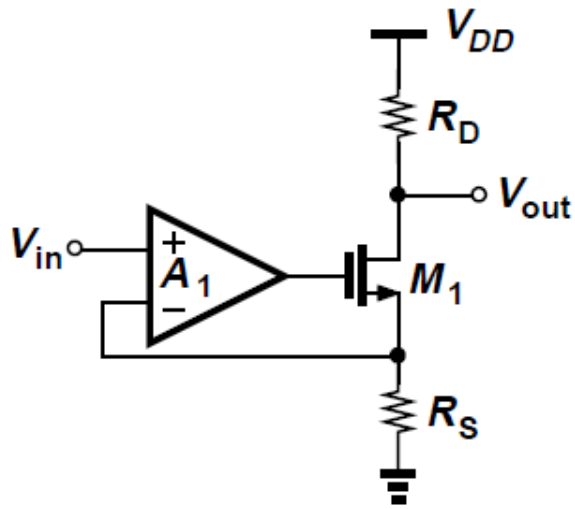
- Az áramkört a (b) ábrán látható alakba átalakítva a bemenetre vonatkoztatott feszültség továbbra is V_n

A visszacsatolás hatása a zajra



- Az áramkör kimenetének tekintett mennyiség nem mindig azonos azzal, melyet a visszacsatoló hálózat mér
- A fenti áramkör kimenete az M_1 tranzisztor drain-je, míg a visszacsatoló hálózatban mért jel az M_1 source-ának potenciálja
- Itt a zárthurkú rendszer bemenetre vonatkoztatott zaja nem egyezik meg a nyílthurkú rendszerével, még akkor sem, ha a visszacsatoló hálózat zajmentes

A visszacsatolás hatása a zajra



- Vegyük figyelembe R_D zaját, $V_{n,RD}$ -t
- Az áramkör zárthurkú feszültségerősítése

$$-A_1 g_m R_D / [1 + (1 + A_1) g_m R_S]$$

- ha $\lambda = \gamma = 0$
- A bemenetre vonatkoztatott zajfeszültség R_D -ből adódóan:

$$|V_{n,in,closed}| = \frac{|V_{n,RD}|}{A_1 R_D} \left[\frac{1}{g_m} + (1 + A_1) R_S \right]$$

- A nyílthurkú rendszer bemenetre vonatkoztatott zaja:

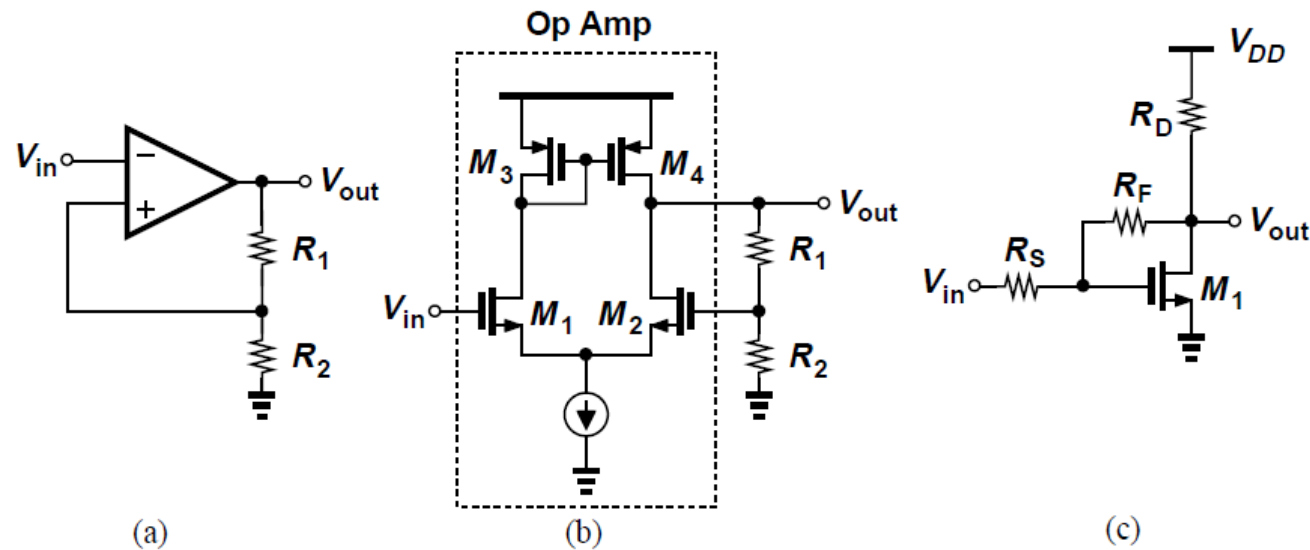
$$|V_{n,in,open}| = \frac{|V_{n,RD}|}{A_1 R_D} \left[\frac{1}{g_m} + R_S \right]$$

- Mivel $A_1 \rightarrow \infty$, $|V_{n,in,closed}| \rightarrow |V_{n,RD}| R_S / R_D$, ahol
 $|V_{n,in,open}| \rightarrow 0$

A visszacsatolt rendszerek analízisének nehézségei:

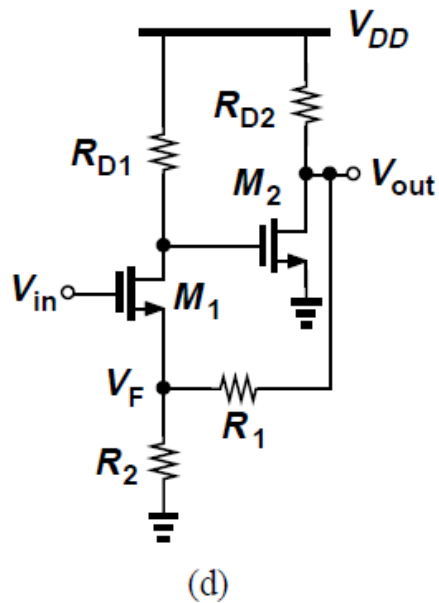
- A következő lépésekkel fogjuk a visszacsatolt rendszereket vizsgálni:
 - Felszakítjuk a hurkot, hogy kiszámítsuk a nyílthurkú erősítést, és a ki- és bemeneti impedanciákat
 - Meghatározzuk a hurokerősítést, βA_0 -t, és így a zárthurkú paramétereket a nyílthurkú megfelelőiből
 - A hurokerősítés alapján vizsgáljuk a rendszer további jellemzőit, mint pl. stabilitás
- A fenti módszer bizonyos egyszerűsítésekkel dolgozik, melyek nem minden áramkörre alkalmazhatóak
- Öt probléma merül fel a visszacsatolt rendszerek ilyen módon végzett analízisében, ezeket vizsgáljuk meg a következőkben

A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (1)



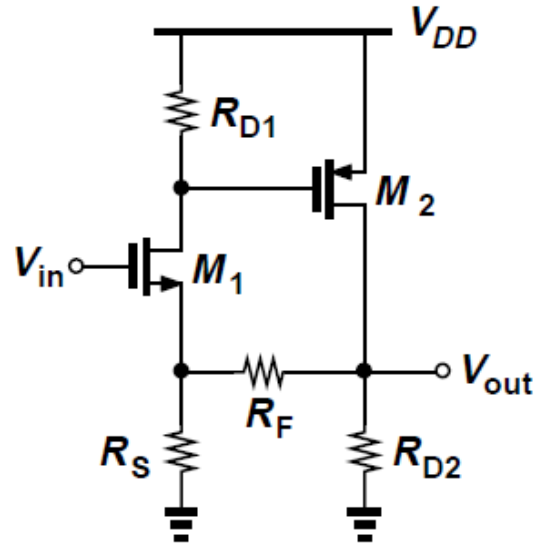
- Az (a) ábrán látható erősítő, és annak egy egyszerű megvalósítása (b ábra) esetén a visszacsatoló ágat alkotó R_1 és R_2 nem elhanyagolható áramot húzhat a kimenetről, ezzel csökkentve a nyílthurkú erősítést
- A (c) ábrán a közös source fokozat nyílthurkú erősítése leesik, ha R_F nem elegendően nagy
- A fenti esetekben a visszacsatoló hálózat „beterheli” a kimenetet, mivel annak bemeneti impedanciája nem ideális

A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (1)



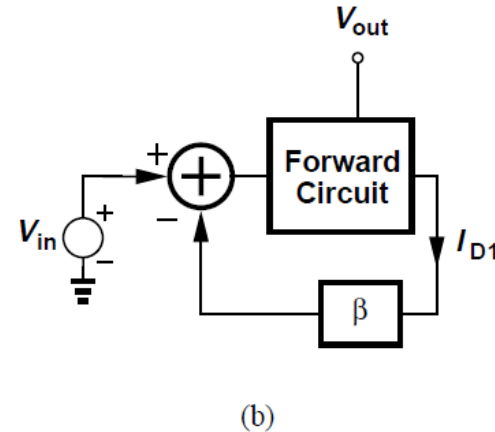
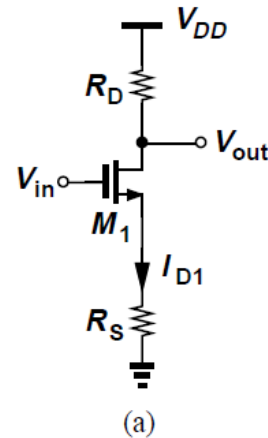
- A (d) ábrán R_1 és R_2 méri a kimeneti feszültséget (V_{out}), és visszajuttat egy feszültség jelet M_1 source-ra
- Mivel a visszacsatoló hálózat kimeneti impedanciája nem biztos, hogy elegendően alacsony, ezért feltételezhetjük, hogy M_1 degenerált lesz, akár olyan mértékben, hogy az befolyásolja a nyílthurkú erősítést
- A fenti egy példa a kimeneti betherelésének a nemideális kimeneti impedanciájú visszacsatoló hálózat által

A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (2)



- Néhány áramkört nem lehet egyértelműen szétválasztani visszacsatoló hálózatra és előrecsatoló erősítőre
- A fenti kétfokozatú hálózatban nem tiszta, hogy R_{D2} az előrecsatoló vagy a visszacsatoló ág része
- Az előbbi választása mellett érv: M_2 -nek valamilyen terhelésre van szüksége ahhoz, hogy feszültségerősítőként működjön (bár ez továbbra is csak önkényes választás)

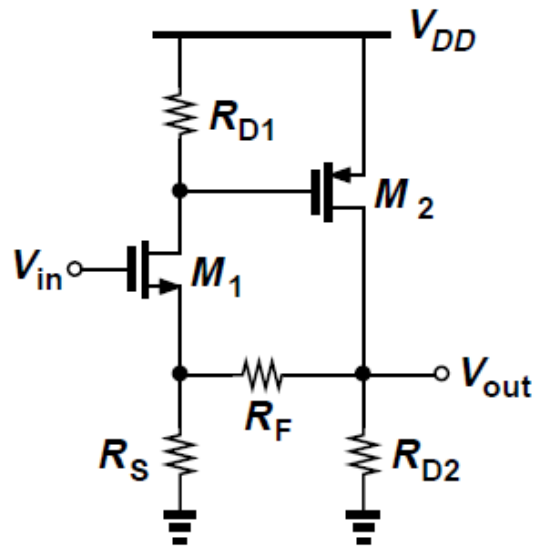
A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (3)



- Néhány áramkörök nem illeszthető be a négy alapvető visszacsatoló topológia közé
- Egy egyszerű degenerált közös source fokozat nem tartalmaz visszacsatolást: a source ellenállás méri a drain áramot, feszültséggé alakítja, és az eredményt kivonja a bemenet jelből (a ábra)
- Elsőre nem egyértelmű, melyik topológia reprezentálja ezt az elrendezést, mivel a mért mennyiség (I_{D1}) különbözik a kimeneti mennyiségtől (V_{out} , b ábra)

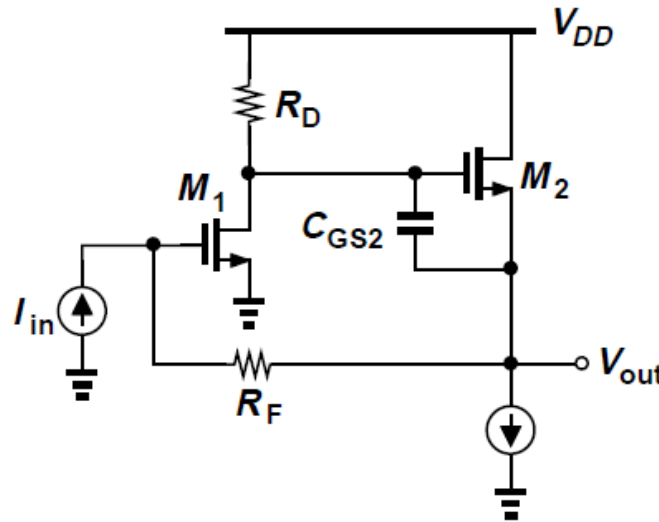
A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (4)

- Az általános megfontolásaink a visszacsatolt rendszerekre egyirányú fokozatokat feltételeztek (vagyis a jelterjedés egyirányú a visszacsatoló hurokban)
- A gyakorlatban a hurok két irányú áramköröket is tartalmazhat, megengedve a bemeneti jelnek a kimenetre a visszacsatoló hálózaton keresztül való terjedését
- Az alábbi áramkörben a bemeneti jel R_F -en keresztül tudja befolyásolni a kimenetet (V_{out}) valamint C_{GD2} -n keresztül nagyfrekvencián.



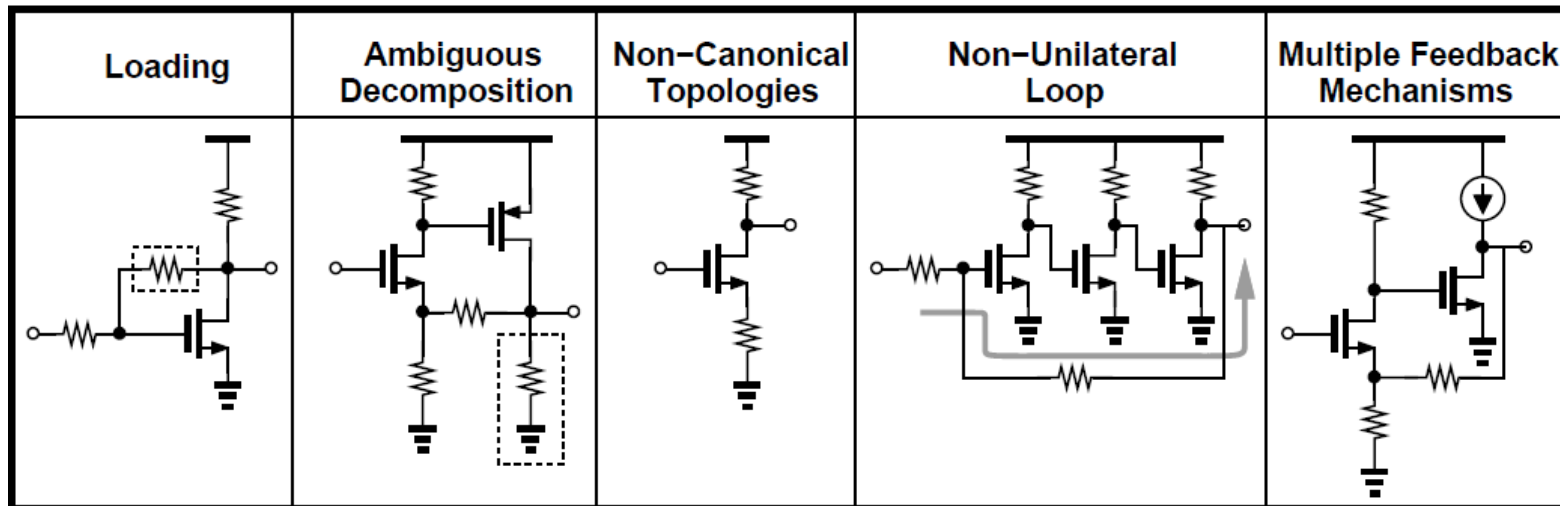
A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: (5)

- Néhány áramkör több visszacsatoló ágat is tartalmazhat (“multiloop circuits”)
- Az alábbi topológiában például R_F és C_{GS2} is egy-egy visszacsatoló ágat képez (előbbi a teljes áramkör, utóbbi M_2 körül)
- Továbbá a source követő önmaga degenerált, és ezzel visszacsatolást tartalmaz
- A fentiek alapján nem világos, hogy kell a hurkot felbontani, és mi a „hurokerősítés” pontos jelentése ebben az esetben



A visszacsatolás vizsgálatának nehézségei: összefoglalás

- Az ismertetett öt problémát, melyek felmerülhetnek a visszacsatoló hálózatok analízisének, alább foglaltuk össze:



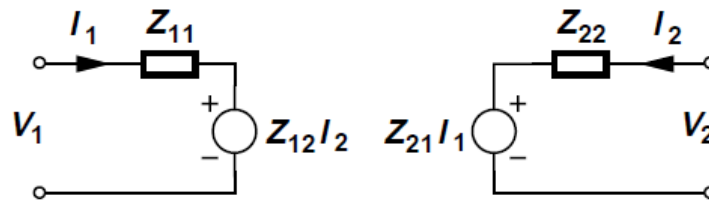
Módszerek visszacsatolt hálózatok analízisére

- Három módszert mutatunk be visszacsatolt rendszerek vizsgálatához:
 - Kétkapu-módszer
 - Bode-módszer
 - Middlebrook-módszer

Two-Port Method	Bode's Method	Middlebrook's Method
• Computes open-loop and closed-loop quantities and the loop gain. • Includes loading effects. • Neglects feedforward through feedback network. • Can be applied recursively to multiple feedback mechanisms. • Does not apply to noncanonical topologies.	• Computes closed-loop quantities without breaking the loop. • Applies to any topology . • Provides loop gain only if one feedback mechanism is present .	• Computes closed-loop quantities without breaking the loop. • Applies to any topology . • Provides loop gain only if local and global loops are distinguishable. • Reveals effect of reverse loop gain in nonunilateral loops.

Kétkapuk áttekintése

- Egy lineáris (és időinvariáns) kétkaput a négy kétkapu-modell bármelyikével reprezentálhatunk
- Az impedancia-modell egy kimeneti és egy bementi impedanciából áll, és az ezekkel sorba kapcsolt áram vezérelt feszültségforrásokból



(a)

- Az impedancia-modellt az alábbi két egyenlettel írhatjuk le:

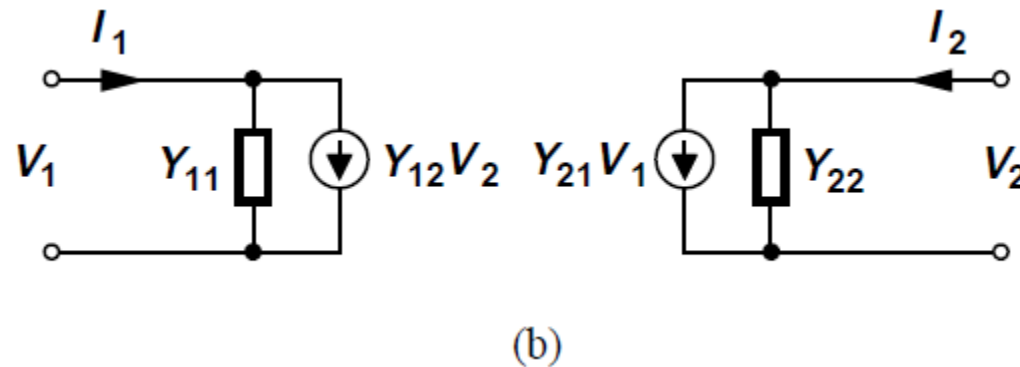
$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

- Mindegyik paraméter impedancia dimenziójú, és a bemenet/kimeneten lévő szakadás mellett mérhető meg: pl. $Z_{11} = V_1/I_1$ ha $I_2 = 0$

Kétkapuk áttekintése

- Az admittancia modell kimeneti és bemeneti admittanciákból, és az ezekkel párhuzamosan kapcsolódó feszültség vezérelt áramforrásokból áll



- Az admittancia modellt a következőképp írhatjuk le:

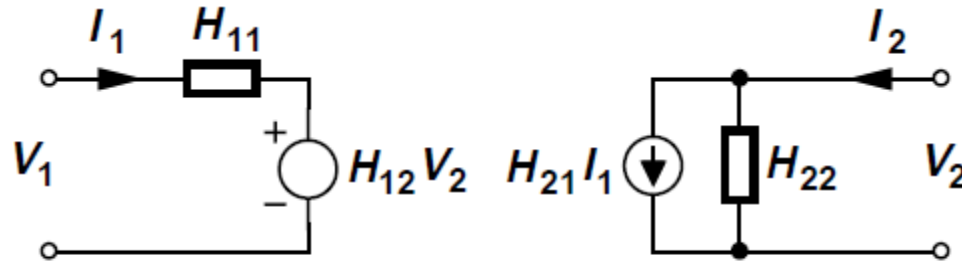
$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2$$

- Az admittancia paramétereket az egyik oldal rövidre zárásával mérhetjük, pl. $Y_{11} = I_1/V_1$ ha $V_2 = 0$

Kétkapuk áttekintése

- A hibrid modell impedanciák és admittanciák, valamint feszültség- és áramforrások kombinációját tartalmazza



(c)

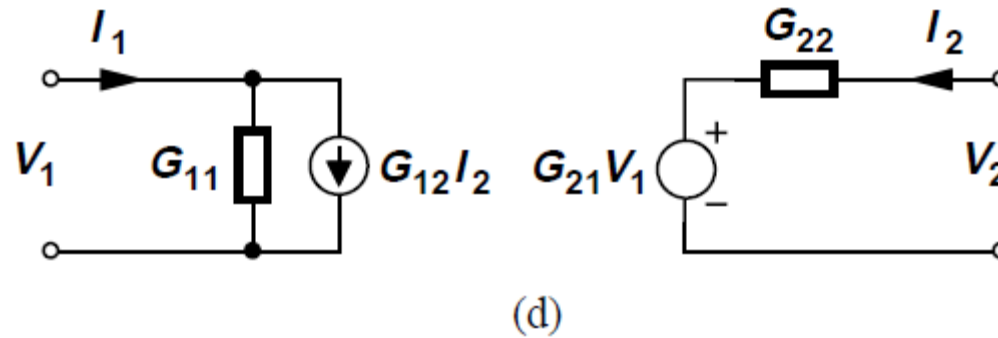
- A hibrid modellt leíró egyenletek:

$$V_1 = H_{11}I_1 + H_{12}V_2$$

$$I_2 = H_{21}I_1 + H_{22}V_2$$

Kétkapuk áttekintése

- Az inverz-hibrid modell is impedanciák és admittanciák, valamint feszültség- és áramforrások kombinációját tartalmazza



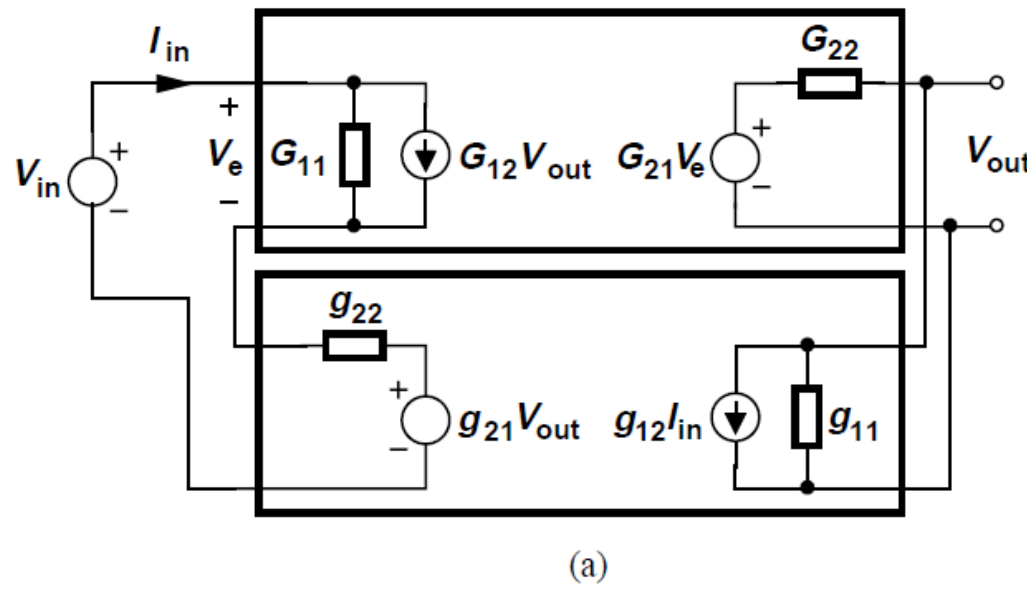
- Az inverz-hibrid modell egyenletei:

$$I_1 = G_{11}V_1 + G_{12}I_2$$

$$V_2 = G_{21}V_1 + G_{22}I_2$$

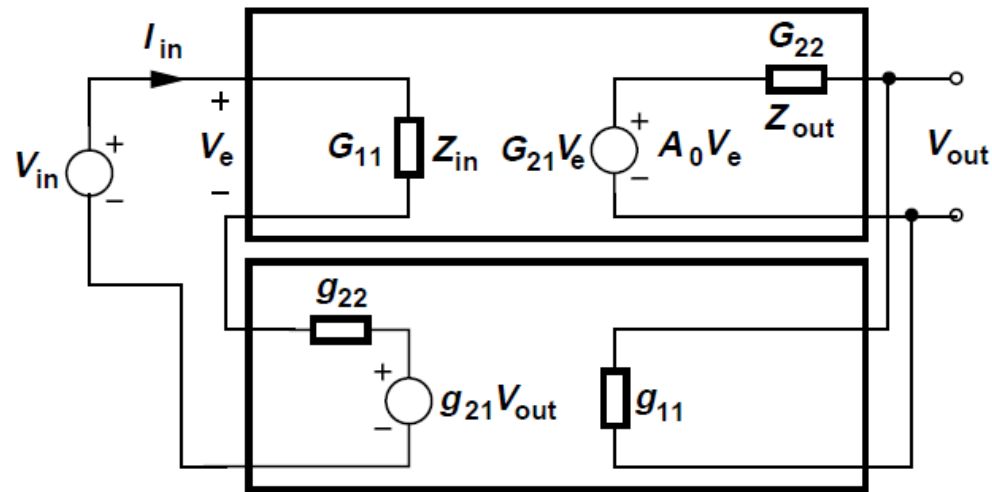
Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra

- Az impedancia és a hibrid modellek nem alkalmasak feszültség-erősítők leírására, ha a bementi áram nagyon kicsi, mint például egy egyszerű közös source fokozatban, így ehhez az inverz-hibrid modellt választjuk
- Az (a) ábra a teljes helyettesítő képet mutatja, az előrecsatoló elemeket nagy, a visszacsatoló hálózat elmeit kis kezdőbetűvel



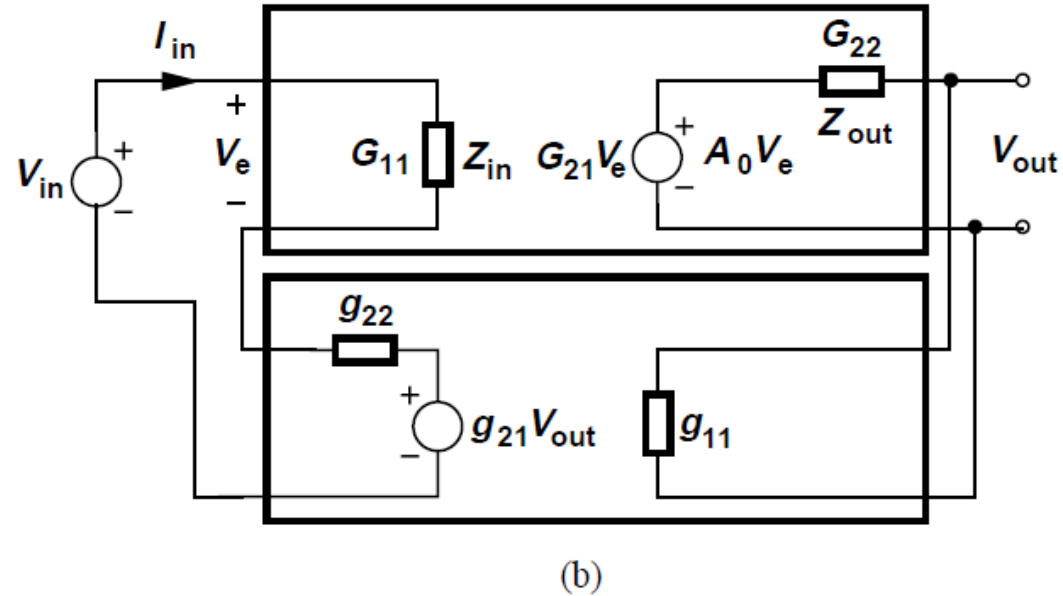
Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra

- Az analízist két mennyiség elhagyásával egyszerűsíthetjük:
- Az erősítő belső visszacsatolása, $G_{12}V_{out}$
- A bemeneti jel visszacsatoló hálózaton keresztüli terjedése, $g_{12}I_{in}$
- A hurkot így egyirányúvá tettük
- A (b) ábra mutatja az így egyszerűsített áramkör, a szokásos jelölésekkel



(b)

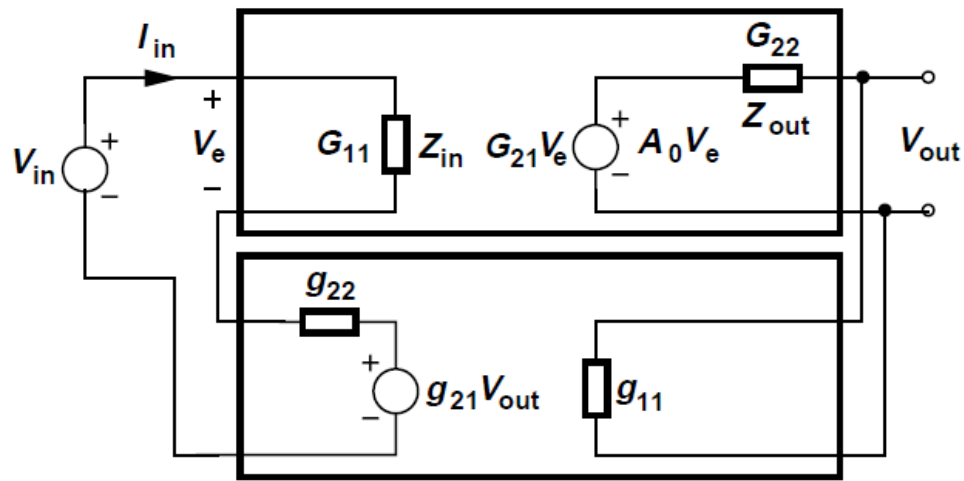
Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra



- A zárthurkú erősítés közvetlenül számítható, ha észrevesszük hogy g_{11} egy admittancia, g_{22} pedig egy impedancia, majd felírjuk a Kirchhoff feszültségtörvényt a bemeneti hálózatra, az áramtörvényt pedig a kimentő pontra:

$$V_{in} = V_e + g_{22} \frac{V_e}{Z_{in}} + g_{21} V_{out}$$
$$g_{11} V_{out} + \frac{V_{out} - A_0 V_e}{Z_{out}} = 0$$

Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra



(b)

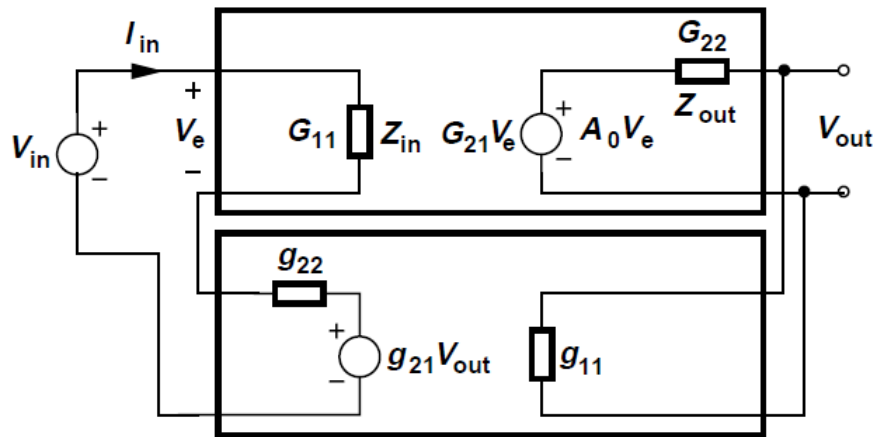
- Kiejtve V_e -t:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out}) + g_{21}A_0}$$

- Írjuk fel mindezt $A_{v,open}/(1 + \beta A_{v,open})$ formában:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}}{1 + g_{21} \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}}$$

Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra



(b)

- Így felírhatjuk, hogy:

$$A_{v,open} = \frac{A_0}{(1 + \frac{g_{22}}{Z_{in}})(1 + g_{11}Z_{out})}$$

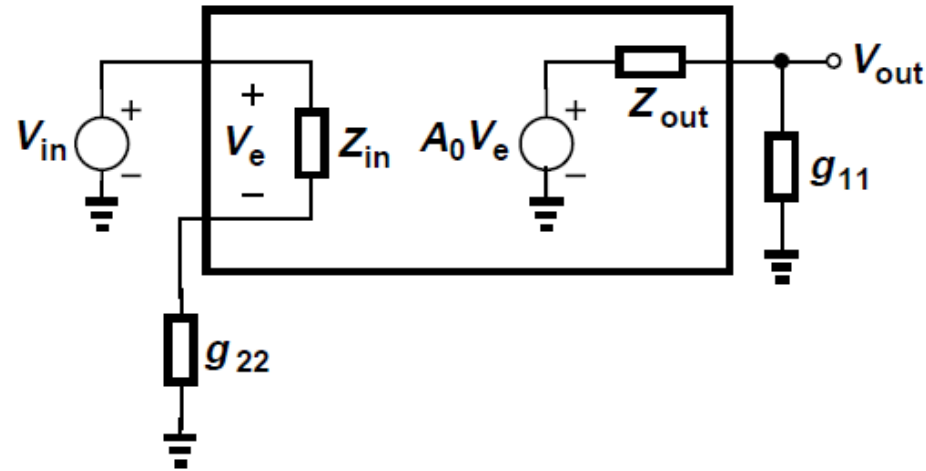
$$\beta = g_{21}$$

- Az ekvivalens nyílthurkú erősítés tartalmazza A_0 -t, vagyis az eredeti erősítő feszültségerősítését (mielőtt az „beépült” volna a hurokerősítésbe)
- Az erősítést két tényező csökkent, $1 + g_{22}/Z_{in}$ és

$$1 + g_{11}Z_{out}$$

Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra

- A terheléssel ellátott előrecsatoló erősítőt látjuk alább, elhagyva a $G_{12}V_{out}$ és $g_{12}I_{in}$ generátorokat



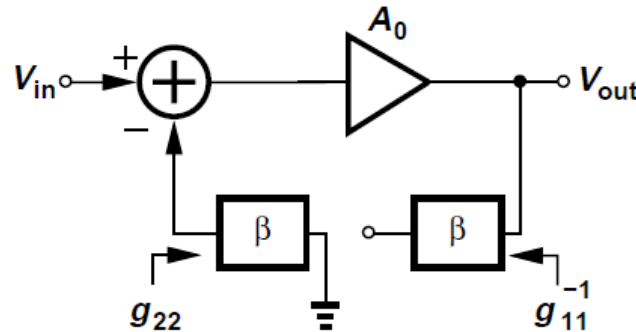
- Így egy gyors, intuitív képet kapunk az áramkörről, mely a közvetlen analízissal nem volna lehetséges
- A visszacsatoló hálózat véges kimeneti és bemeneti impedanciái csökkentik a kimeneti feszültséget, illetve az erősítő bemenetén mérhető feszültséget

Terhelés hatása feszültség-feszültség visszacsatolásra

- g_{11} -et g_{22} -t a következőképp számíthatjuk:

$$g_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{I_2=0}$$
$$g_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{V_1=0}$$

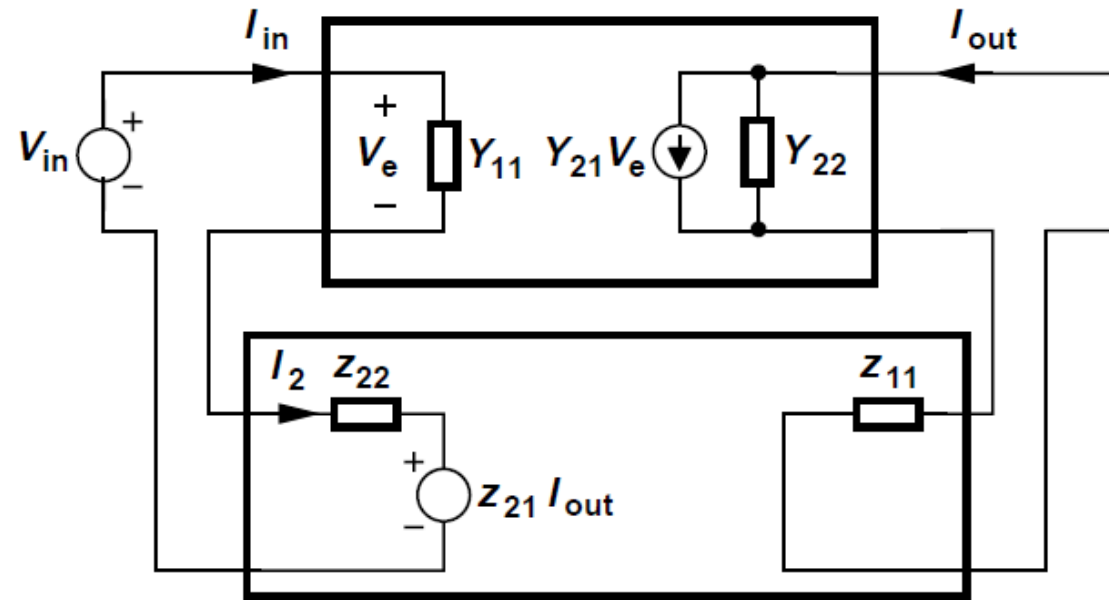
- Ahogy fent látszik, g_{11} -et a visszacsatoló hálózat kimenetét szakadásban hagyva, míg g_{22} -t a visszacsatoló hálózat bemenetének rövidre zárása esetén kapjuk meg



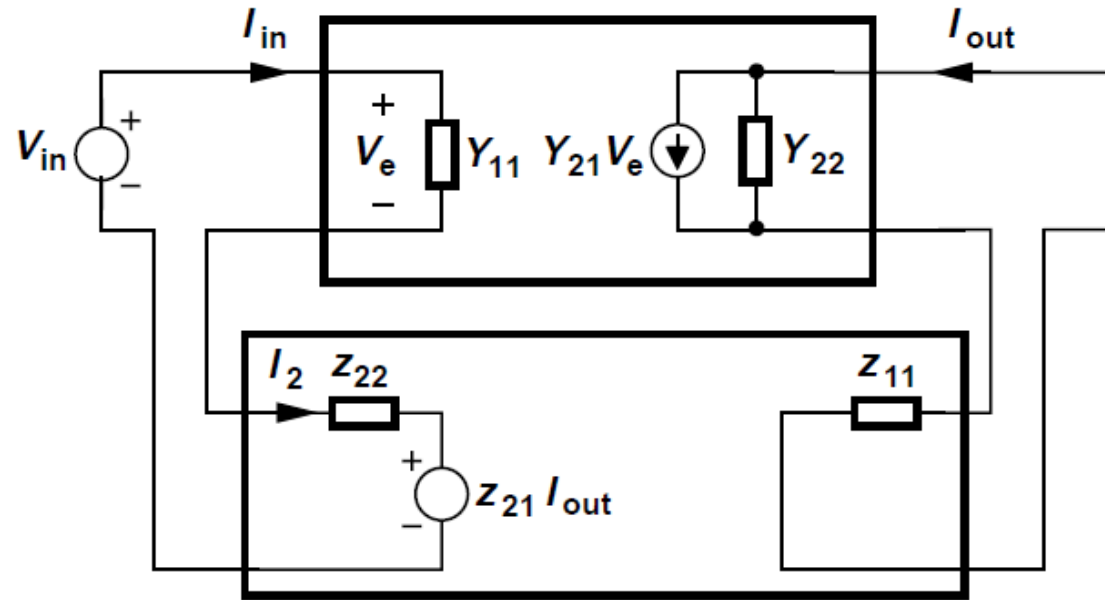
- A hurokerősítés egyszerűen a nyílthurkú erősítés g_{21} -gyel szorozva
- A nyílthurkú bemeneti és kimeneti impedanciák $1 + g_{21}A_{v,open}$ tényezővel változnak meg

Terhelés hatása áram-feszültség visszacsatolásra

- Ebben az esetben a visszacsatoló hálózat sorosan jelenik meg a kimenettel, hiszen a kimeneti áramot kell mérni
- Az előrecsatoló erősítőt admittancia, a visszacsatoló hálózatot impedancia modellel helyettesítjük, elhanyagolva a $Y_{12}V_{out}$ és $z_{12}I_{in}$ generátorokat



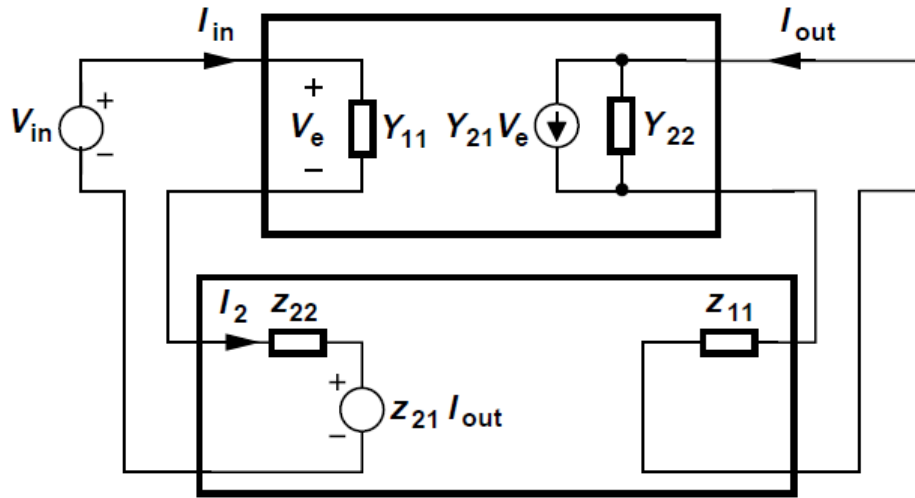
Terhelés hatása áram-feszültség visszacsatolásra



- A terhelés melletti zárthurkú erősítés (I_{out}/V_{in}) és a nyílthurkú paraméterek számításához vegyük észre, hogy $I_{in} = Y_{11} V_e$ és $I_2 = I_{in}$ majd írjunk fel két huroktörvényt:

$$V_{in} = V_e + Y_{11} V_e z_{22} + z_{21} I_{out}$$
$$-I_{out} z_{11} = \frac{I_{out} - Y_{21} V_e}{Y_{22}}$$

Terhelés hatása áram-feszültség visszacsatolásra



- Kiejtve V_e -t:

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{Y_{21}}{(1 + z_{22}Y_{11})(1 + z_{11}Y_{22})}}{1 + z_{21}\frac{Y_{21}}{(1 + z_{22}Y_{11})(1 + z_{11}Y_{22})}}$$

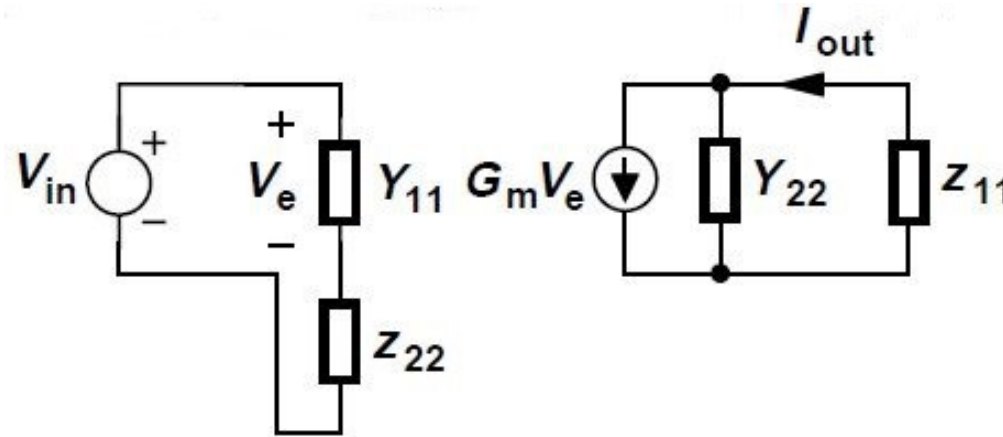
- A terhelés melletti nyílthurkú erősítés és a visszacsatolási tényező:

$$G_{m,open} = \frac{Y_{21}}{(1 + z_{22}Y_{11})(1 + z_{11}Y_{22})}$$

$$\beta = z_{21}$$

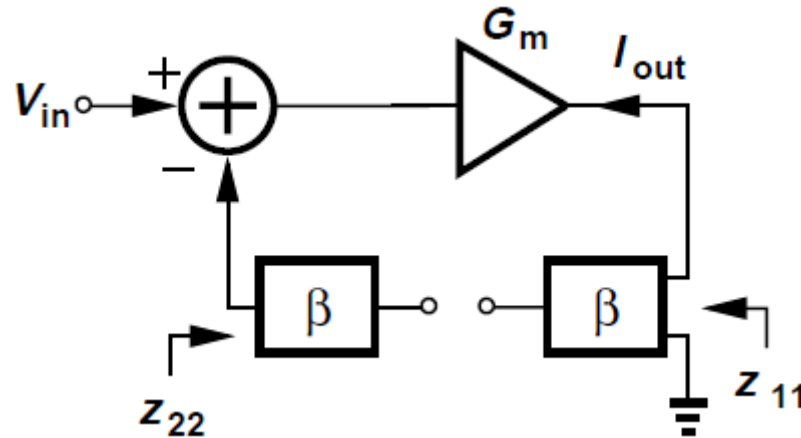
Terhelés hatása áram-feszültség visszacsatolásra

- Y_{21} , az eredeti erősítő transzkonduktanciája $(1 + z_{22}Y_{11})^{-1}$ és $(1 + z_{11}Y_{22})^{-1}$ tagokkal osztódik le, melyek a bemeneti feszültségosztónak, és a kimeneti áramosztónak felelnek meg
- A terheléssel rendelkező nyílthurkú erősítőt a következőképp modellezhetjük:



Terhelés hatása áram-feszültség visszacsatolásra

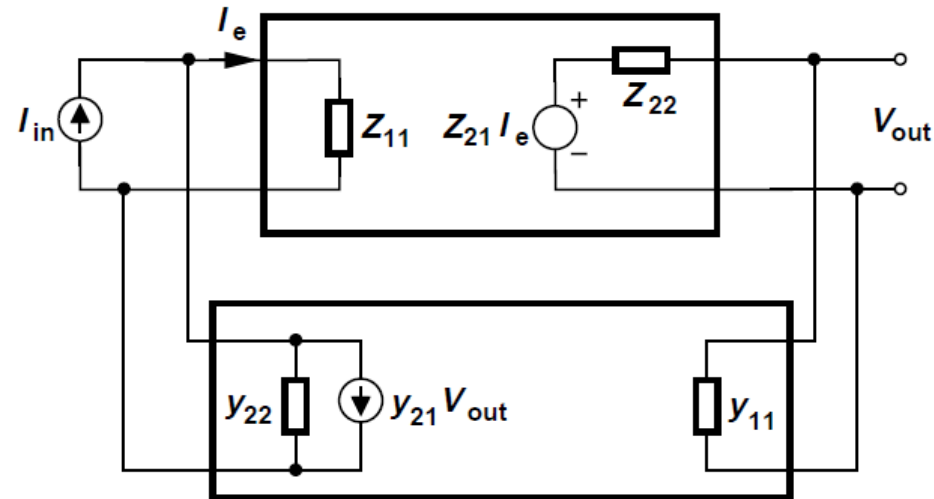
- Mivel $z_{22} = V_2/I_2$, ha $I_1 = 0$ és $z_{11} = V_1/I_1$, ha $I_2 = 0$, az alábbi sematikus ábra megmutatja a visszacsatoló hurok felbontásának helyes módját



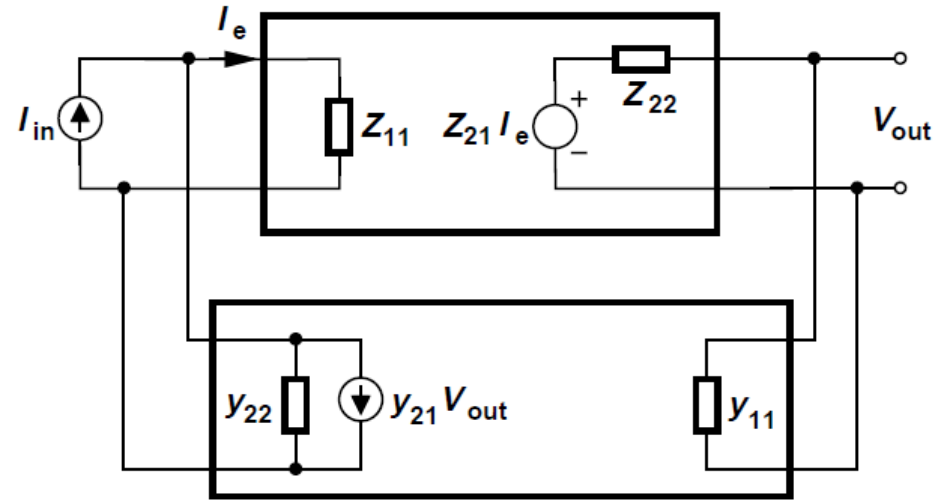
- A hurokerősítés $z_{21}G_{m,open}$

Terhelés hatása feszültség-áram visszacsatolásra

- Ebben az esetben az előrecsatoló (transzimpedancia) erősítő egy kimeneti feszültséget generál a bemeneti áramból, ezért impedancia modellel helyettesíthetjük
- A visszacsatoló hálózat admittanciaként modellezhető, hiszen a kimeneti feszültséget méri, és egy ezzel arányos áramot juttat vissza a bemenetre
- Az alábbi helyettesítőkép elhanyagolja Z_{12} és y_{12} hatásait



Terhelés hatása feszültség-áram visszacsatolásra



- Kiszámítjuk a zárthurkú erősítést (V_{out}/I_{in}) az alábbi két egyenletből:

$$I_{in} = I_e + I_e Z_{11} y_{22} + y_{21} V_{out}$$

$$y_{11} V_{out} + \frac{V_{out} - Z_{21} I_e}{Z_{22}} = 0$$

- Kiejtve I_e -t:

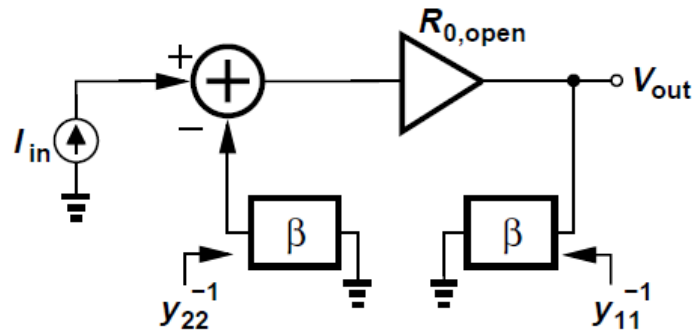
$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{Z_{21}}{(1 + y_{22} Z_{11})(1 + y_{11} Z_{22})}}{1 + y_{21} \frac{Z_{21}}{(1 + y_{22} Z_{11})(1 + y_{11} Z_{22})}}$$

Terhelés hatása feszültség-áram visszacsatolásra

- Így az ekvivalens nyílthurkú erősítés és a visszacsatolási tényező:

$$R_{0,open} = \frac{Z_{21}}{(1 + y_{22}Z_{11})(1 + y_{11}Z_{22})}$$
$$\beta = y_{21}$$

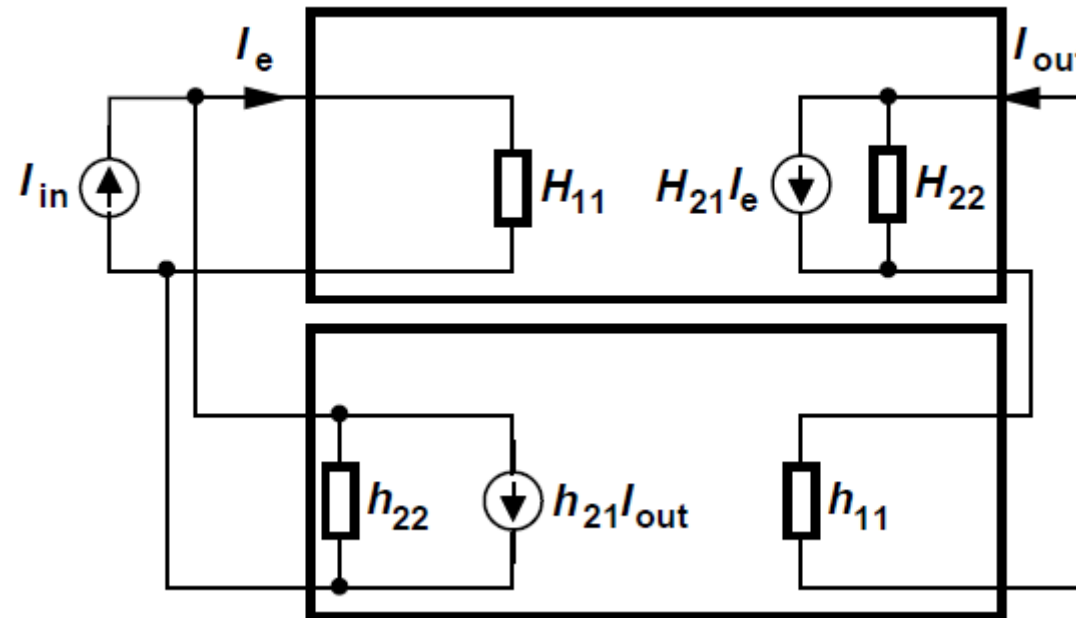
- Ha számításba vesszük a nyílthurkú erősítést ($R_{0,open}$) csökkentő tényezőket, mint a bemeneti áramosztást és kimeneti feszültségosztást, a következő modellhez jutunk:



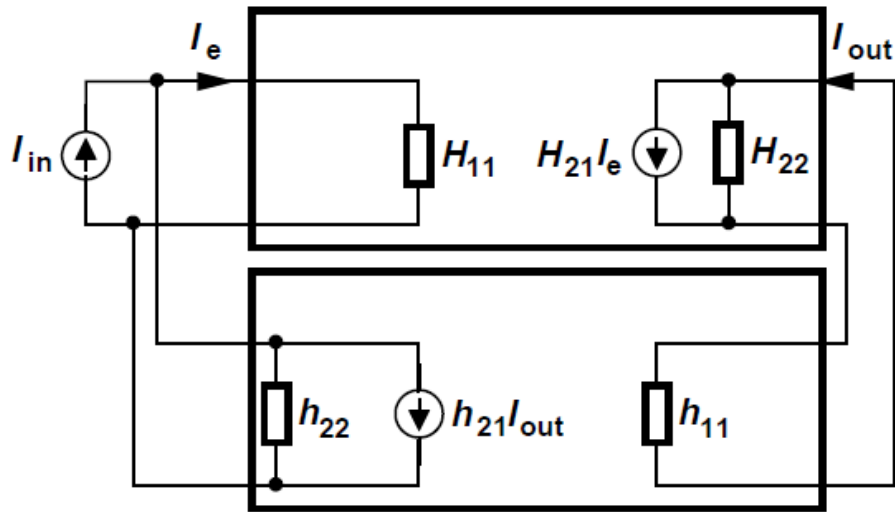
- A hurokerősítés: $y_{21}R_{0,open}$

Terhelés hatása áram-áram visszacsatolásra

- Az előrecsatoló erősítő ebben az esetben egy kimeneti áramot állít elő válaszként a bemeneti áramra, ezért hibrid modellel helyettesíthetjük, ugyanígy a visszacsatoló hálózatot
- A helyettesítő kép a H_{12} és h_{12} generátorok nélkül:



Terhelés hatása áram-áram visszacsatolásra



- Felírható, hogy:

$$I_{in} = I_e H_{11} h_{22} + h_{21} I_{out} + I_e$$

$$I_{out} = -I_{out} h_{11} H_{22} + H_{21} I_e$$

- Kiejtve I_e -t megkapjuk a zárthurkú erősítést (I_{out}/I_{in})

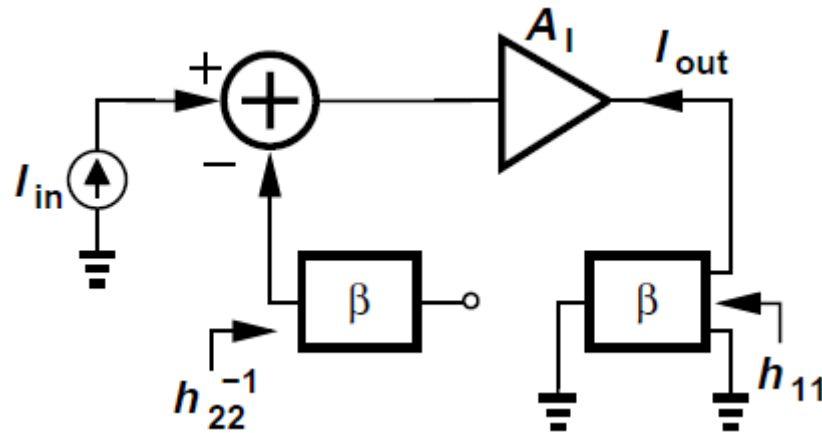
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{H_{21}}{(1 + h_{22} H_{11})(1 + h_{11} H_{22})}}{1 + h_{21} \frac{H_{21}}{(1 + h_{22} H_{11})(1 + h_{11} H_{22})}}$$

Terhelés hatása áram-áram visszacsatolásra

- Ahogy a korábbi topológiákban is, definiáljuk az ekvivalens nyílthurkú (áram)erősítést, és a visszacsatolási tényezőt:

$$A_{I,open} = \frac{H_{21}}{(1 + h_{22}H_{11})(1 + h_{11}H_{22})}$$
$$\beta = h_{21}$$

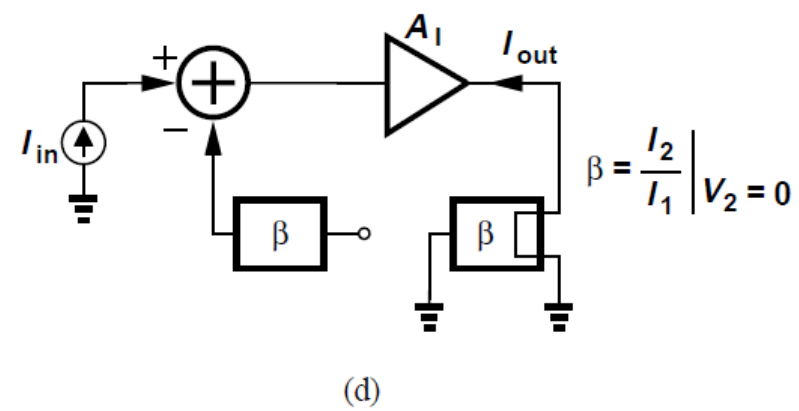
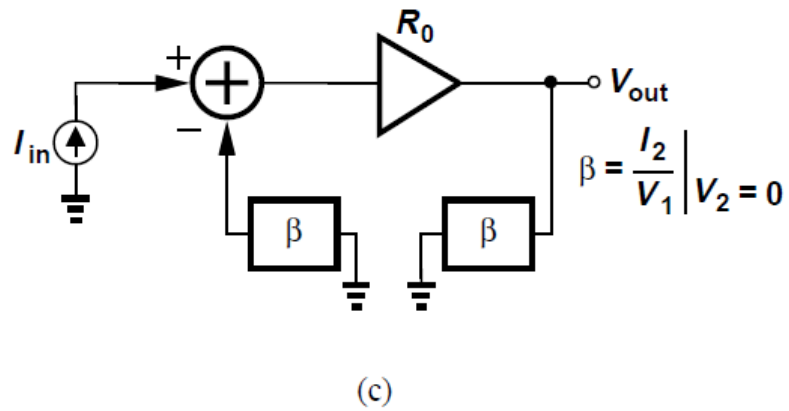
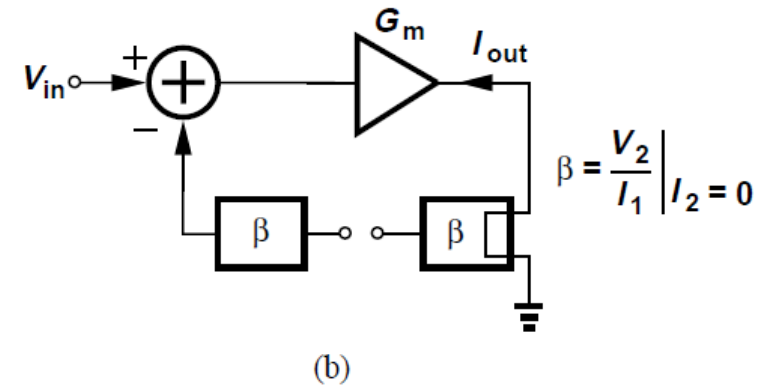
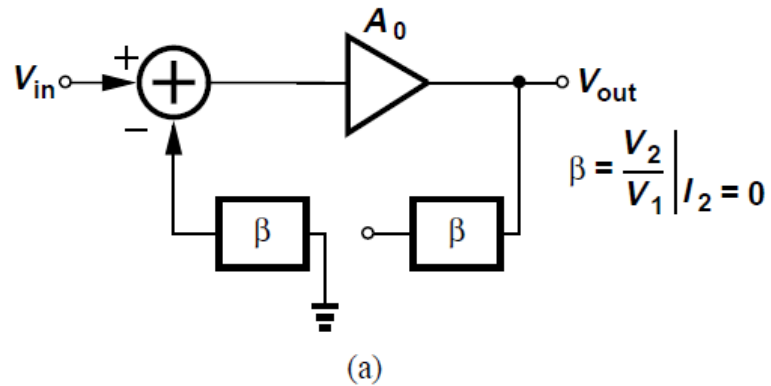
- A felnyitott hurok modellje:



- A hurokerősítés: $h_{21}A_{I,open}$

Terhelés hatásainak összefoglalása

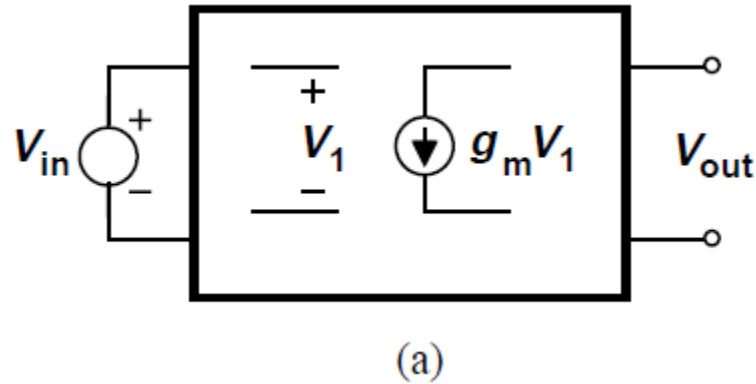
- Az (a) – (d) ábrák foglalják össze a terhelés hatását a visszacsatoló hálózatok négy alaptípusánál:



Terhelés hatásainak összefoglalása

- A terhelés hatásának vizsgálatát három lépésben tesszük meg:
 1. Felbontjuk a hurkot megfelelő terheléssel, és kiszámítjuk a nyílthurkú erősítést (A_{OL}), valamint a nyílthurkú bementi és kimeneti impedanciákat
 2. Meghatározzuk a visszacsatolási tényezőt (β), és ezzel a hurokerősítést (βA_{OL})
 3. Kiszámítjuk a zárthurkú erősítést, és a $(1+\beta A_{OL})$ -lel skálázott kimeneti és bemeneti impedanciákat
- A β -t leíró egyenletekben az ,1' és ,2' indexek rendre a visszacsatoló hálózat bementére ill. kimenetére vonatkoznak

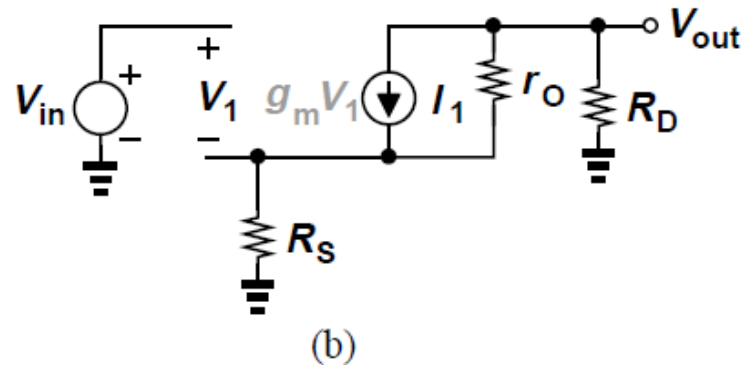
Visszacsatolások Bode-analízise: általános megfigyelések



- Vegyük az (a) ábrán látható általános képet, mely egy tranzisztort modellez egy ideális formában
- A korábbi analízis alapján V_{out} kifejezhető, mint $A_v V_{in}$ vagy $H(s)V_{in}$
- Ha a vezérelt áramforrást I_1 -gyel jelöljük, és nem tesszük meg a $I_1 = g_m V_1$ helyettesítést, akkor V_{out} kifejezhető, mint V_{in} és I_1 függvénye:

$$V_{out} = AV_{in} + BI_1$$

Visszacsatolások Bode-analízise: általános megfigyelések



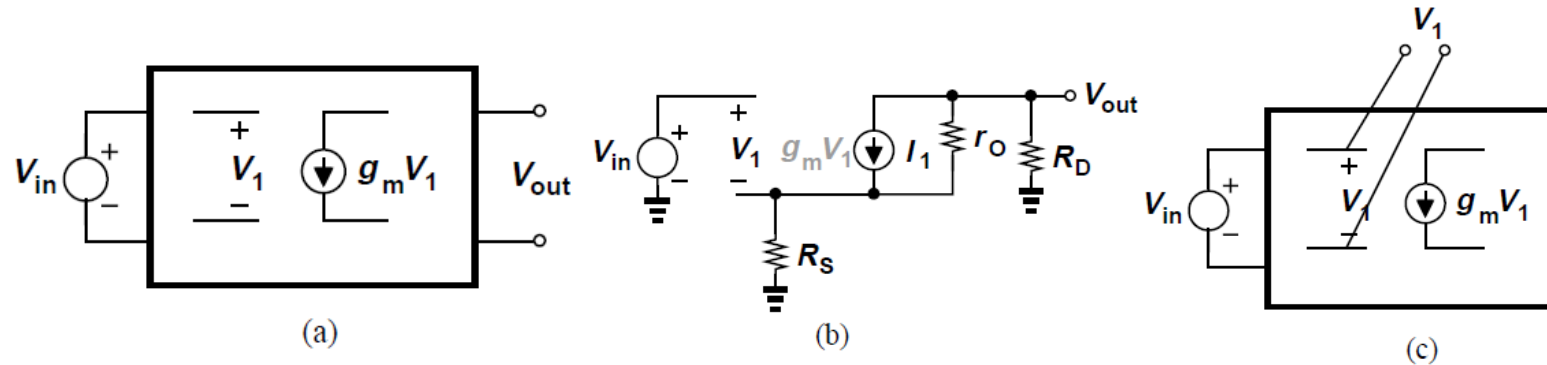
- Példaként vegyünk egy degenerált CS fokozatot (b ábra): felismerhető, hogy az R_D -n felfelé folyó áram (és R_S -en lefelé folyó) $-V_{out}/R_D$, azaz a feszültség, mely r_O -n esik: $(-V_{out}/R_D - I_1)r_O$
- A kimeneti hálózatra felírt huroktörvényből:

$$V_{out} = \left(-\frac{V_{out}}{R_D} - I_1 \right) r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S$$

$$V_{out} = \frac{-r_O}{1 + \frac{r_O + R_S}{R_D}} I_1$$

- Ebben az esetben $A = 0$ és $B = -r_O R_D / (R_D + r_O + R_S)$

Visszacsatolások Bode-analízise: általános megfigyelések



- Ezután nézzük V_1 -et mint kérdéses kimeneti mennyiséget, azaz írjuk fel V_1 -et V_{in} függvényeként $A_v V_{in}$ vagy $H(s)V_{in}$ formában
- Vegyük úgy, hogy V_1 a kimenet, mint a (c) ábrán
- Hasonlóképp, átmenetileg nem vesszük figyelembe, hogy $I_1 = g_m V_1$, V_1 felírható, mint:

$$V_1 = C V_{in} + D I_1$$

- Huroktörvényt felírva kimenetre kapjuk, hogy:

$$V_1 = V_{in} - \frac{r_O R_S}{R_D + r_O + R_S} I_1$$

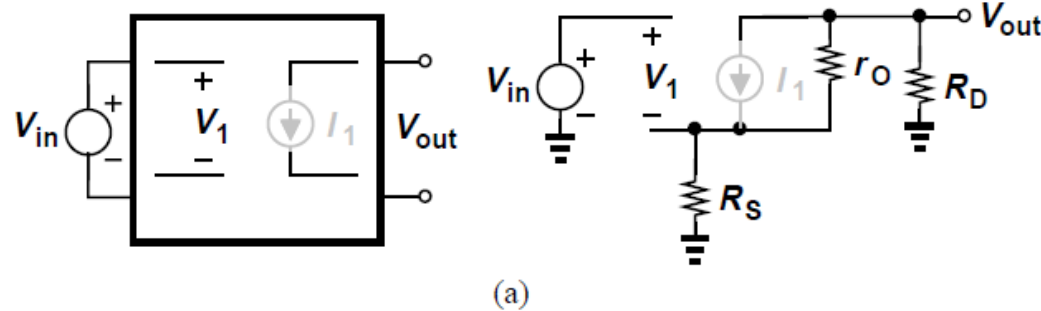
- Így $C = 1$ és $D = -r_O R_S / (R_D + r_O + R_S)$

Az együtthatók értelmezése

- A számítása:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ with } I_1 = 0.$$

- A fokozat feszültségerősítése, ha a vezérelt forrás áramát és g_m -et is zérusnak választjuk
- V_{out} ebben az esetben a bemeneti jel visszacsatoló hálózaton keresztül való előrecsatolódásaként értelmezhető (hiszen az egyébként előrecsatoló elem, az ideális tranzisztor nincs jelen)



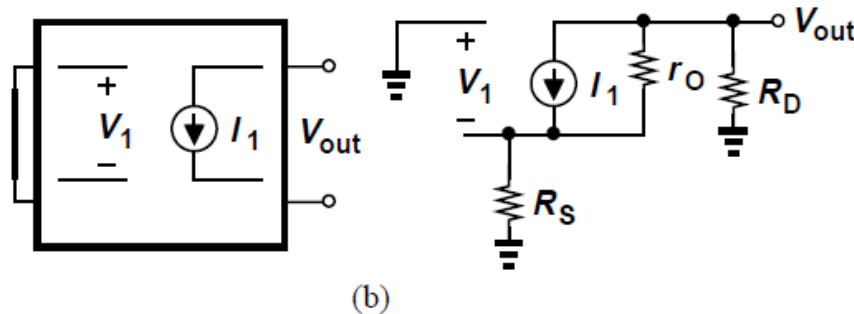
- A CS példában $V_{out} = 0$ ha $I_1 = 0$ mivel nem folyik ebben az esetben áram az R_S , r_O , és R_D ellenállásokon, azaz $A = 0$

Az együtthatók értelmezése

- B együtthatóra:

$$B = \frac{V_{out}}{I_1} \text{ with } V_{in} = 0$$

- Zérus bementi feszültség mellett kiszámítjuk I_1 hatására létrejövő kimeneti feszültséget (V_{out}) [(b) ábra], feltéve hogy I_1 független forrás



- A közös source példa esetében:

$$\left(-\frac{V_{out}}{R_D} - I_1\right) r_O - \frac{V_{out}}{R_D} R_S = V_{out} \qquad V_{out} = \frac{-r_O R_D}{R_D + r_O + R_S} I_1$$

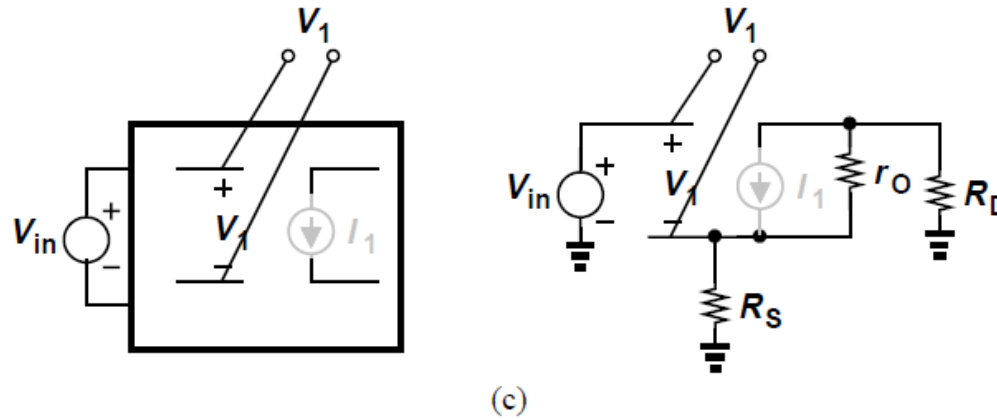
- Így, $B = -r_O R_D / (R_D + r_O + R_S)$

Az együtthatók értelmezése

- C értelmezése:

$$C = \frac{V_1}{V_{in}} \text{ with } I_1 = 0$$

- Ez az átvitel a bemenetre V_1 -ről, ha tranzisztor g_m -je zérus [(c) ábra]



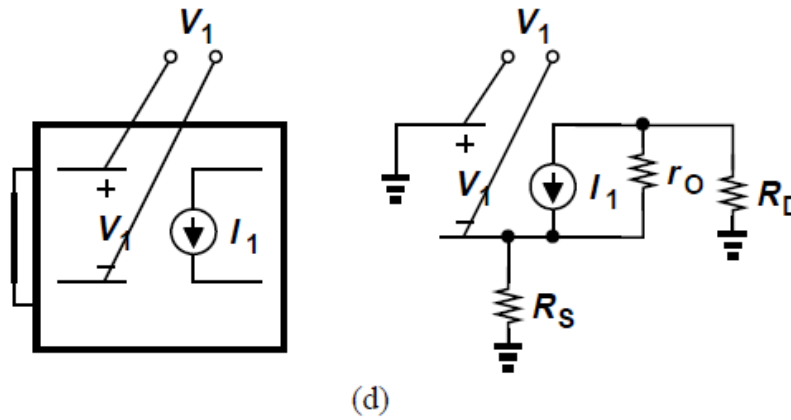
- A CS példában nem folyik áram R_S -en keresztül ilyen feltételek mellett, ezzel pedig $V_1 = V_{in}$ és $C = 1$

Az együtthatók értelmezése

- Végül a D együttható:

$$D = \frac{V_1}{I_1} \text{ with } V_{in} = 0.$$

- Ahogy az a (d) ábrán látható, D jelenti az átvitelt I1-ről V1-re, zérus bemenet mellett

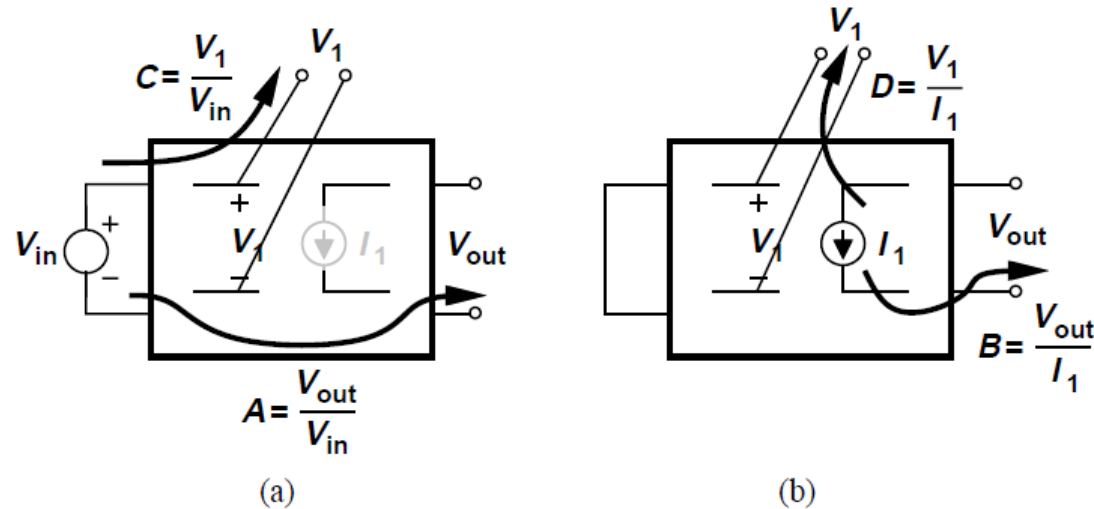


- A közös source fokozat példájában a fenti feltételek mellett:

$$-V_1 - \left(\frac{V_1}{R_S} + I_1 \right) r_O = \frac{V_1}{R_S} R_D \quad V_1 = -\frac{r_O R_S}{R_D + r_O + R_S} I_1$$

- Így: $D = -r_O R_S / (R_D + r_O + R_S)$

Az együtthatók értelmezése: összefoglalás



- Az A-D együtthatók számítását az (a) és (b) ábrák foglalják össze
- A tranzisztort kikapcsoljuk g_m zérussá tételével, hogy megkapjuk az A és C csatolásokat a bemenetről (V_{in}) a kimenetre (V_{out}) ill. V_1 -re
- A bemenetet zérusnak választva kiszámítjuk B-t és D-t, mint az átviteleket (erősítéseket) I_1 -ről V_{out} -ra és V_1 -re
- Az első lépések megadják a választ V_{in} -re ha $g_m = 0$, az utóbbiak pedig I_1 -re, ha $V_{in} = 0$

Bode analízis

- V_{out}/V_{in} az A-D együtthatókban fejezzük ki
- Mivel

$$V_{out} = AV_{in} + BI_1$$

$$V_1 = CV_{in} + DI_1$$

és az a tárgyalt áramkörben, $I_1 = g_m V_1$, ezért

$$V_1 = \frac{C}{1 - g_m D} V_{in}$$

- Így a zárthurkú erősítés:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A + \frac{g_m BC}{1 - g_m D}$$

- Az első tag a bemenet-kimenet átvitel, ha $g_m = 0$
- Másként felírva:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A + g_m (BC - AD)}{1 - g_m D}$$

Bode analízis: megfigyelések

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A + \frac{g_m BC}{1 - g_m D}$$

- Ha $A = 0$, a zárthurkú erősítés $V_{out}/V_{in} = g_m BC/(1 - g_m D)$, ami hasonló a korábban látott $A_0/(1 + \beta A_0)$ kifejezéshez
- $g_m BC$ –t hívjuk nyílthurkú erősítésnek

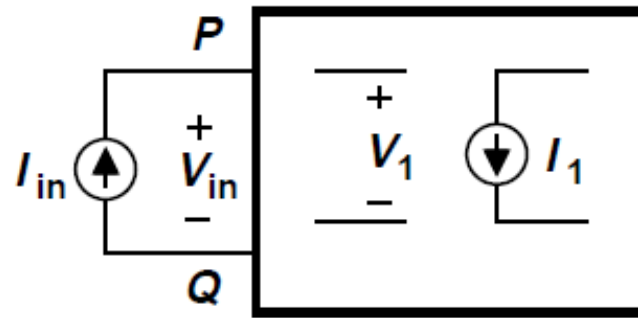
Bode analízis: hurokerősítés és visszatérési faktor

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A + g_m(BC - AD)}{1 - g_mD}$$

- A zárthurkú erősítés fenti alakját értelmezhető úgy, hogy: $1 - g_mD = 1 + (\text{hurokerősítés})$, azaz $(\text{hurokerősítés}) = -g_mD$
- Mindkét esetben a bemenetet zérusnak választjuk, felbontjuk a hurkot és egy vezérelt forrást egy nem vezérelttel helyettesítünk, majd kiszámítjuk a visszatérő jel nagyságát
- Bode eredetileg a „visszatérési faktor” (return ratio -RR) fogalmat használta a g_mD szorzatra, mely egy adott vezérelt forráshoz tartozik
- RR úgy viselkedik mint a valós hurokerősítés, még olyan esetekben is, ahol a hurkot nem lehet teljesen felbontani
- RR megegyezik a hurokerősítéssel olyan áramkörökben, ahol csak egy visszacsatoló hurok van, és az átmegy a kérdéses tranzisztoron

Blackman impedancia tétele

- A Blackman tétel megadja áramkör tetszőleges két pontja között látott impedanciát
- Bizonyítása lehetséges Bode módszerével



(a)

- Az (a) ábrán látható általános esetben a P és Q csomópontok közötti impedanciát szeretnénk meghatározni
- Az egyik tranzisztort megjelöltük, mint egy feszültségfüggő áramforrást (I_1)

Blackman impedancia tétele

- Tegyük úgy, mintha I_{in} lenne a bemeneti jel és V_{in} a kimeneti jel, így használhatjuk Bode eredményeit:

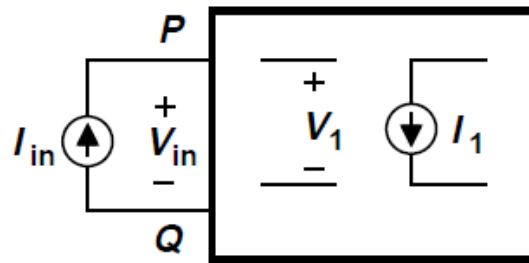
$$V_{in} = AI_{in} + BI_1$$

$$V_1 = CI_{in} + DI_1$$

- Ebből következik, hogy

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = A + \frac{g_m BC}{1 - g_m D}$$

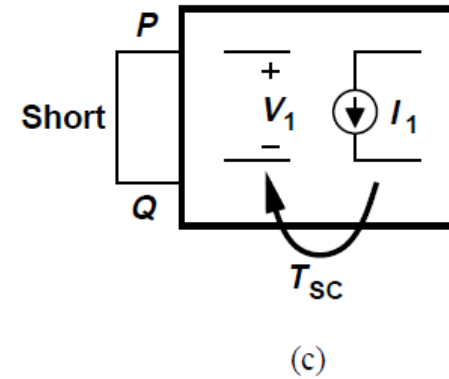
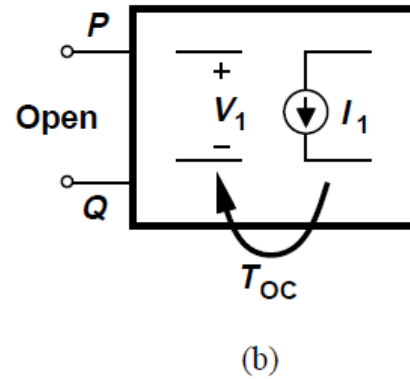
- ahol g_m az (a) ábrán modellezett tranzisztor transzkonduktanciáját jelöli



(a)

Blackman impedancia tétele

- Felismerhető, hogy $V_1/I_1 = D$ ha $I_{in} = 0$, így $-g_m D$ nevezzük “nyílthurkú erősítésnek” (hiszen a kérdéses két csomópont között szakadás van) és T_{oc} -vel jelöljük [(b) ábra]



- Ha $V_{in} = 0$, akkor $I_{in} = (-B/A)I_1$ és így

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{AD - BC}{A}$$

- A fenti mennyiség és $-g_m$ szorzatát “rövidzárási” hurokerősítésnek hívjuk (mivel $V_{in} = 0$), és T_{sc} -vel jelöljük [(c) ábra]

Blackman impedancia tétele

- T_{oc} és T_{sc} tekinthető úgy, mint I_1 -hez tartozó visszatérési faktorok, két topológia esetén:

$$T_{oc} = -g_m \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_{in}=0}$$

$$T_{sc} = -g_m \frac{V_1}{I_1} \Big|_{V_{in}=0}$$

- A harmadik lépésben T_{oc} és T_{sc} segítségével átírjuk a korábbi összefüggéseket:

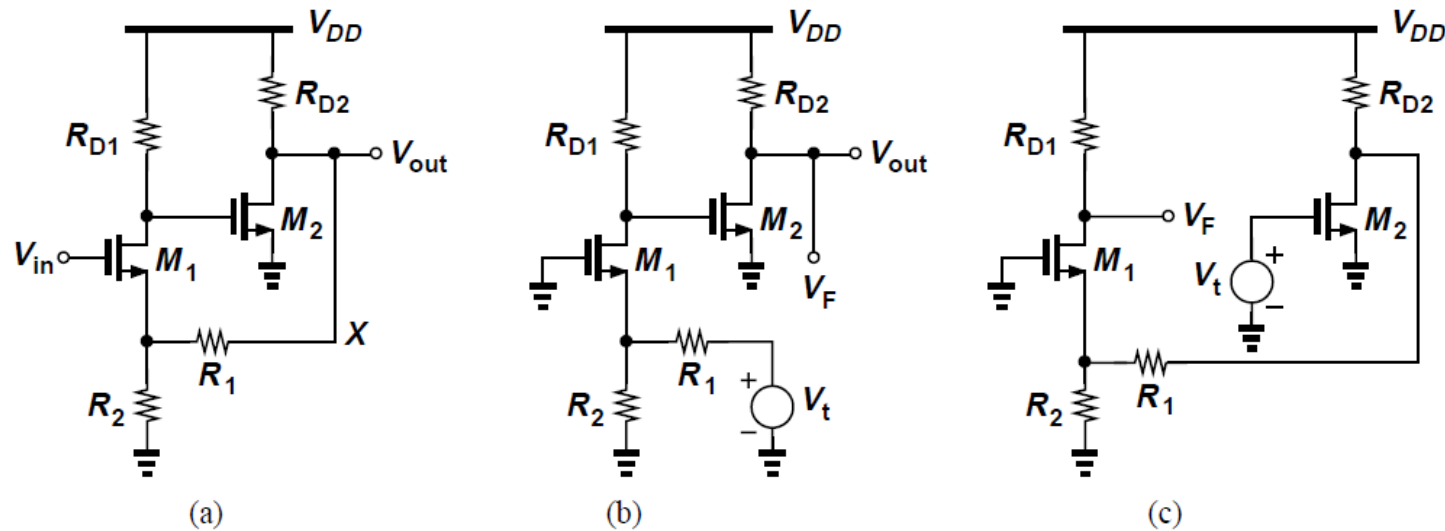
$$\begin{aligned} Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} &= \frac{A - g_m(BC - AD)}{1 - g_m D} \\ &= A \frac{1 + T_{sc}}{1 + T_{oc}}. \end{aligned}$$

- A tekinthető úgy, mint a “nyílthurkú” impedancia a visszacsatoló hurokban lévő tranzisztor nélkül
- Továbbá, ha $|T_{sc}| \ll 1$ akkor $Z_{in} \approx A/(1 + T_{oc})$ és ha $|T_{oc}| \ll 1$ akkor $Z_{in} \approx A(1 + T_{sc})$
- A zárthurkú impedanciát nem tudjuk úgy kifejezni, mint Z_{in} és $(1 + \text{hurokerősítés})$ kifejezések szorzatát vagy hányadosát

A hurokerősítés számításának nehézségei

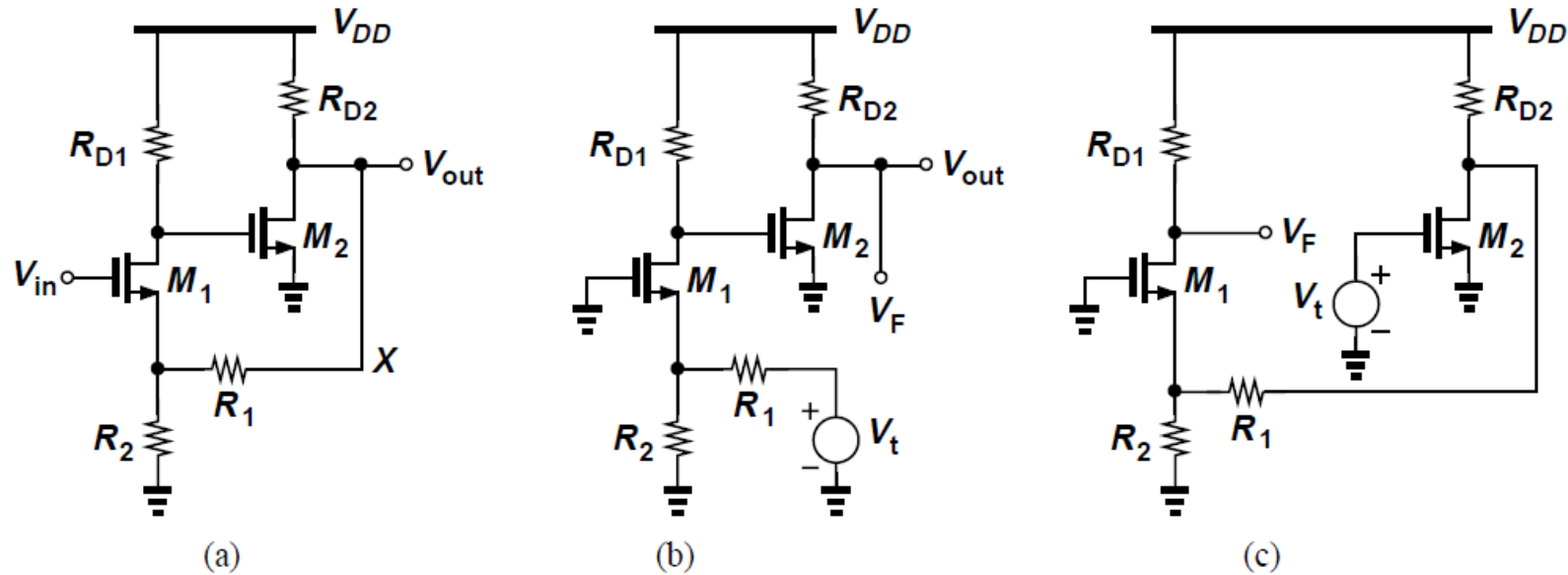
- A hurokerősítés az egyik leglényegesebb mennyiség a visszacsatolt rendszerek leírásánál
- Ha a hurok pólusait és zérusait kérdésesek, akkor a hurokerősítés vizsgálatával (ebben az esetben „hurokátvitel” - $T(s)$) kaphatunk ezekről, és így a rendszer stabilitásáról információt
- A hurokerősítés számításának módja:
 - Bontsuk fel a hurkot egy pontban, adjuk be a teszt jelet, kövessük végig (a megfelelő irányban) hogyan terjed a hurokban, és számítsuk ki a visszatérő jel értékét
- A fenti módszer két kérdést vet fel:
 1. Felbontható-e a hurok tetszőleges helyen?
 2. A tesztjel áram vagy feszültség legyen?
- A fenti tesztben a rendszer valós kimenete és bemenete „eltűnik”

A hurokerősítés számításának nehézségei



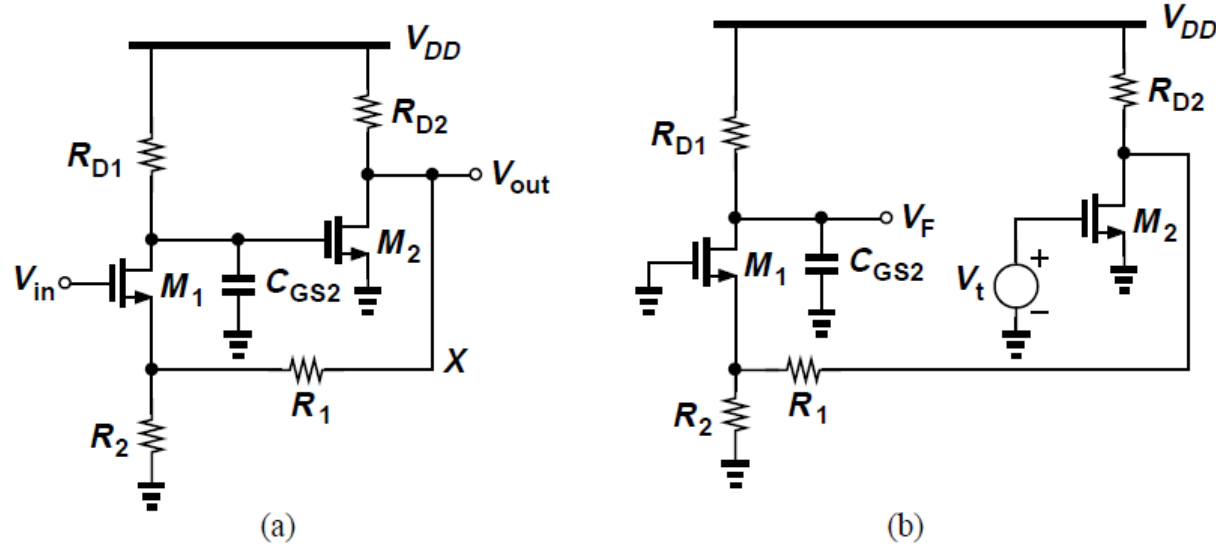
- A kétfokozatú erősítőben (a) ábra az R_1 - R_2 osztó méri a kimenetet, és annak egy hányadosát visszajuttatja M_1 source-ára
- A (b) ábrán láthatóan V_{in} -t 0-nak választjuk, X-nél felbontjuk a hurkot, és egy teszt jelet juttatunk R_1 jobb oldalán lévő csomópontához, majd mérjük a kialakuló V_F feszültséget
- Az R_1 ellenállás az (a) ábrán AC áramot húz R_{D2} -ről, de a (b) ábrán már nem
- A CS fokozat erősítése megváltozott

A hurokerősítés számításának nehézségei



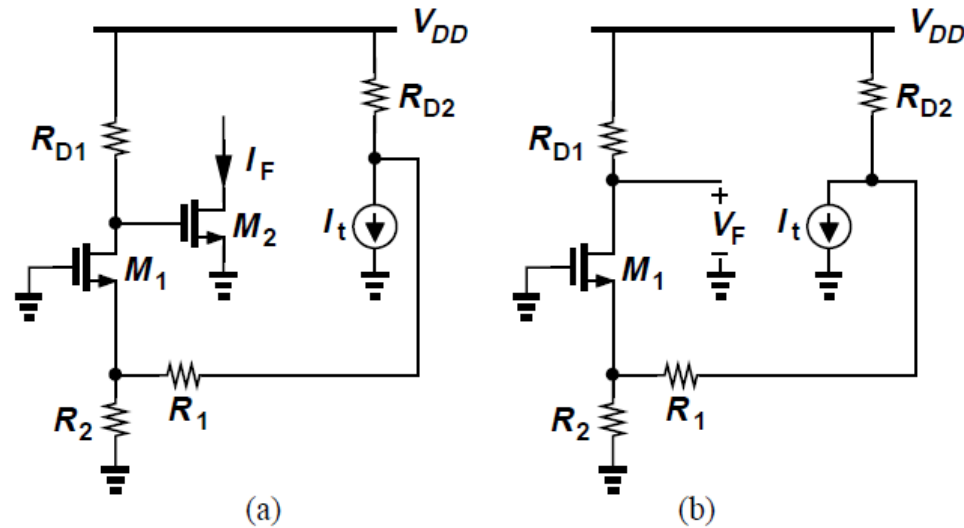
- Ebben az esetben a legjobb választás, ha a hurkot a MOSFET gate-jénél bontjuk fel
- A hurok felbontható a (c) ábrán látható módon, M_2 gate-jénél, mellyel az első fokozat alacsonyfrekvenciás erősítése nem változik meg

A hurokerősítés számításának nehézségei



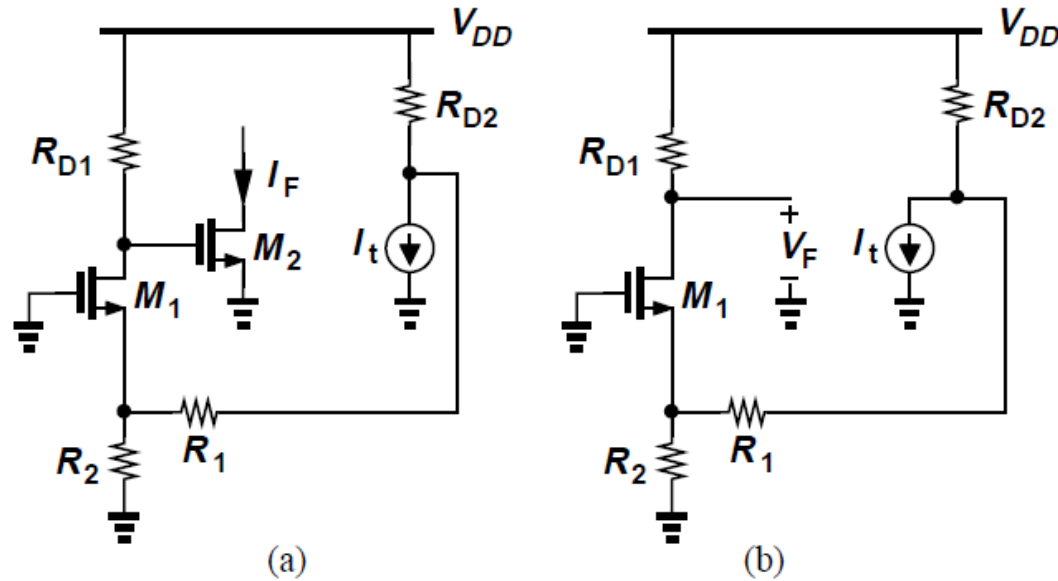
- Hogy figyelembe vegyük az M_2 tranzisztor C_{GS2} -ét [(a) ábra], a hurkot C_{GS2} után bontjuk fel [(b) ábra] hogy az M_1 által látott terhelés ne változzon meg
- Mindig lehetséges a hurkot egy MOSFET gate-jénél felbontani
- Hogy a visszacsatolás negatív maradjon, a tesztjelnek legalább egy gate-en keresztül kell mennie, hiszem csak a közös source topológia invertál

A hurokerősítés számításának nehézségei



- Használhatunk tesztjelként feszültség helyett áramot?
- Felbonthatjuk a hurkot M_2 drain-jénél, és injektálhatunk egy I_t tesztáramot, majd mérhetjük az M_2 által visszatérített áramot [(a) ábra]
- Ha M_2 drain-je AC földre van kötve, ezen a csomóponton nincs olyan feszültség, mint zárthurkú esetben, amikor r_{o2} -t is figyelembe vesszük
- Általánosságban: nem tudunk úgy áramot injektálni tesztjelként, hogy ne változtassuk meg az áramkör valamely jellemzőjét

A hurokerősítés számításának nehézségei



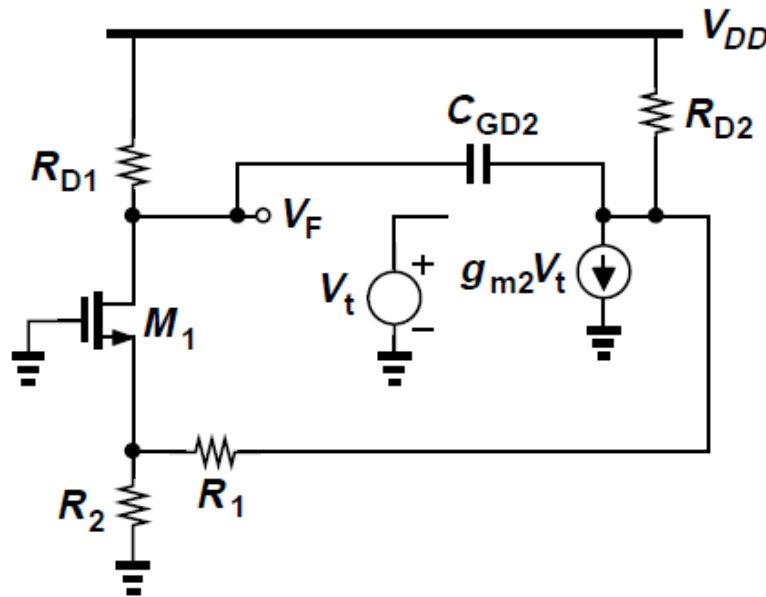
- Mi történik, ha M_2 vezérelt áramforrását egy független I_t áramforrással helyettesítjük, és kiszámítjuk a visszatérő V_{GS} -t, mint V_F -et?
- Mivel az eredeti áramkörben a vezérelt forrást és V_{GS2} -t g_{m2} kapcsolta össze, a hurokerősítés írható, mint $(-V_F/I_t) \times g_{m2}$
- Ez a módszer alkalmazható akkor is, ha M_2 degenerált
- Az eredmény megegyezik az M_2 -höz tartozó visszatérési faktoral

A hurokerősítés számításának nehézségei

- Összefoglalásképp, a hurok felbontásának „legjobb” helye:
 - MOSFET gate-source-a ha feszültséget kívánunk használni tesztjelként
 - MOSFET vezérelt áramforrása, ha áramot akarunk tesztjelként injektálni (feltéve hogy a visszatérő mennyiség a MOSFET V_{GS} -e)
- A két módszer összefügg, mivel csak egy g_m szorzóban különböznek egymástól

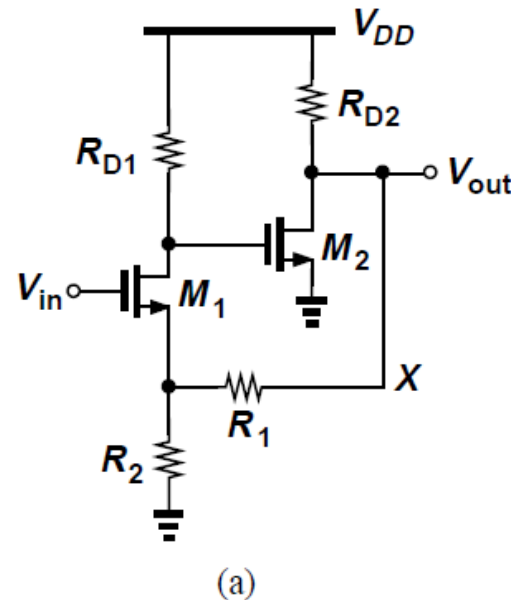
A hurokerősítés számításának nehézségei

- Ha az előző áramkörhöz hozzáadjuk C_{GD2} -t, és egy tesztáramot vagy feszültséget injektálunk, C_{GD2} nem tesz lehetővé a hurok korrekt felbontását
- Ahogy alább látszik, bár a gate-source feszültséget a független V_t forrás határozza meg, de C_{GD2} egy „lokális” visszacsatolást hoz létre M_2 drain-jéről annak gate-jére, felvetve a kérdést, hogy meghatározható-e a hurokerősítés mindegyik visszacsatoló hurok kiiktatásával

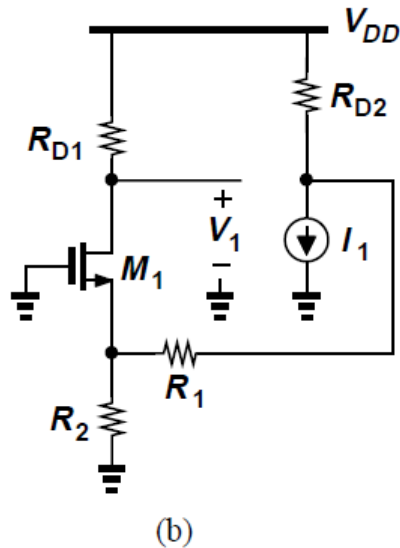
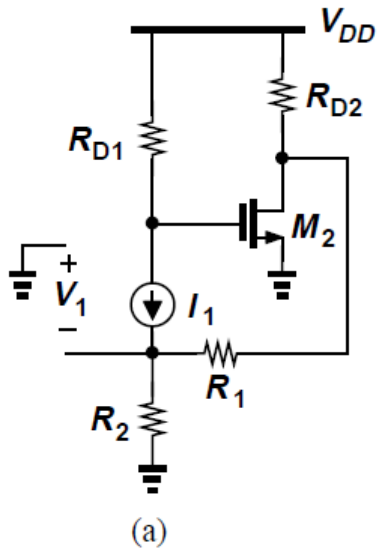


A visszatérési faktor problémái

- A valamely vezérelt forráshoz tartozó visszatérési faktort tekinthetjük úgy, mint hurokerősítést
- A több visszacsatoló hurkot tartalmazó áramkörökben különböző visszatérési faktort fogunk kapni az egyes forrásokhoz
- Az (a) ábrán látható áramkörben R_1 és R_2 „globális” és „lokális” visszacsatolást is létrehoz (M_1 degenerálásával)



A visszatérési faktor problémái



- Az (a) és (b) ábrákon látható helyettesítőképekkel megmutatható, hogy az M_1 és M_2 -höz tartozó visszatérési faktorok:

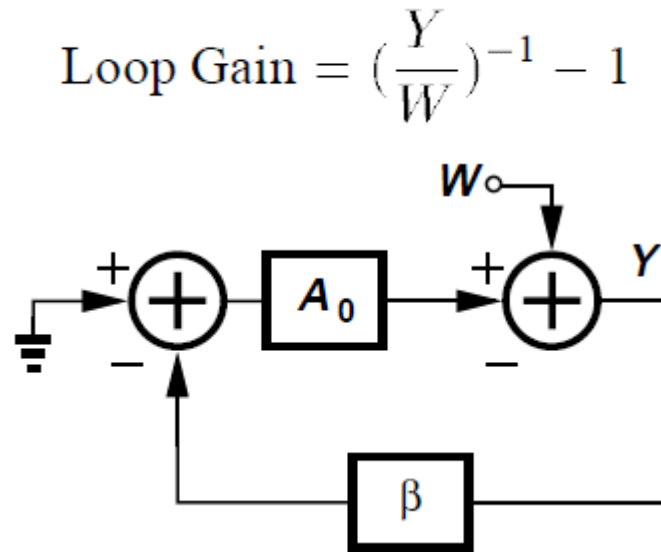
$$\text{Return Ratio}|_{M1} = \frac{g_{m1}R_2(R_1 + R_{D2} + g_{m2}R_{D2}R_{D1})}{R_1 + R_2 + R_{D2}}$$

$$\text{Return Ratio}|_{M2} = \frac{g_{m1}g_{m2}R_2R_{D1}R_{D2}}{(1 + g_{m1}R_2)(R_1 + R_{D2}) + R_2}$$

- A kapott eredmények különböznek, mivel M_1 eltávolításával mindkét visszacsatolás eltűnik, míg M_2 eltávolításával M_1 továbbra is degenerált

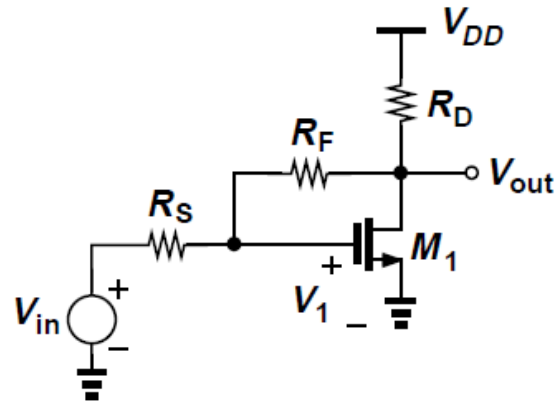
A visszatérési faktor problémái

- Egy másik megoldás a hurokerősítés számítására, ha injektálunk egy teszt jelet a hurok felszakítása nélkül, mint az alább látható, kiszámítjuk a $Y/W = 1/(1 + \beta A_0)$ mennyiséget, így:

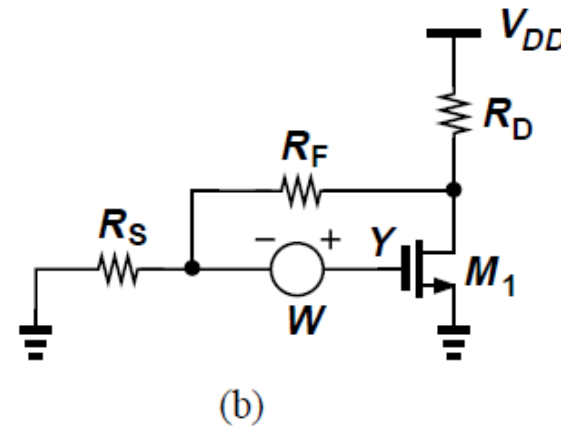
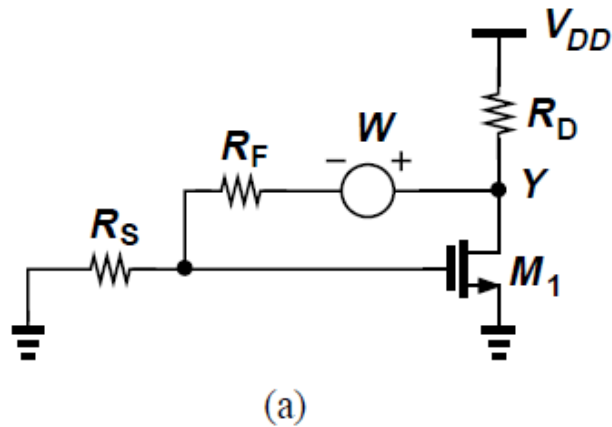


- Ez a módszer egy egyirányú hurkot feltételez, így különböző hurokerősítéseket ad meg különböző injektálási pontokhoz, ha a hurok nem egyirányú

A visszatérési faktor problémái



- A fenti áramkört vizsgálhatjuk az (a) és a (b) ábra szerint is, más értékeket kapva $(Y/W)^{-1} - 1$ -re



Bode módszerének alternatív értelmezései

- Aszimptotikus erősítési forma:
- Bode eredményeiből, $V_{out}/V_{in} = A + g_m BC / (1 - g_m D)$ és $V_{out}/V_{in} = A$ if $g_m = 0$ (a vezérelt forrást deaktiválva) és $V_{out}/V_{in} = A - BC/D$ if $g_m \rightarrow \infty$ (a vezérelt forrás “nagyon erős”)
- V_{out}/V_{in} fenti értékeit H_0 és H_∞ formában jelöljük, $-g_m D$ pedig T -ként
- H_0 tekinthető a direkt előrecsatolásnak, H_∞ pedig az “ideális erősítésnek”, azaz mintha a vezérelt forrás tetszőlegesen „erős” volna (vagy a hurokerősítés végtelen lenne)
- Ebből:

$$\begin{aligned}\frac{V_{out}}{V_{in}} &= H_0 + \frac{g_m BC}{1 + T} \\ &= H_0 \frac{1 + T}{1 + T} + \frac{g_m BC}{1 + T} \\ &= \frac{H_0}{1 + T} + \frac{T(H_0 + g_m BC/T)}{1 + T}\end{aligned}$$

Bode módszerének alternatív értelmezései

- Aszimptotikus erősítési forma (folyt):

- Mivel $H_0 + g_m BC/T = A - g_m BC/(g_m D) = A - BC/D = H_\infty$ ezért,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = H_\infty \frac{T}{1 + T} + H_0 \frac{1}{1 + T}$$

- A fentit „aszimptotikus erősítés egyenlet” –nek hívjuk, ez az alakja megmutatja, hogy az erősítés egy ideális értékből, és egy $T/(1 + T)$ tényező szorzatából, valamint a közvetlen előrecsatolás és $1/(1 + T)$ szorzatából áll

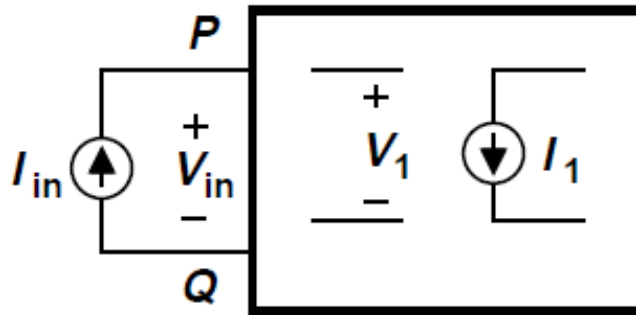
- A számítások leegyszerűsödnek, ha észrevevessük, hogy $V_1 = CV_{in} + DI_1$ and $I_1 = g_m V_1$ alapján

$$V_1 = CV_{in}/(1 - g_m D) \rightarrow 0 \text{ if } g_m \rightarrow \infty \text{ (provided that } V_{in} < \infty \text{)}.$$

- Ez hasonló ahhoz, ahogy egy virtuális földpont kialakul kellően nagy erősítés esetén

Bode módszerének alternatív értelmezései

- Dupla nullázás módszere (Double Null Method):
- Blackman impedancia tételéből észrevehetjük, hogy: [(a) ábra]
 - T_{OC} a visszatérési faktor, ha $I_{in} = 0$, azaz T_{OC} jelöli a visszatérési faktort zérus bemenetre
 - T_{SC} a visszatérési faktor, ha $V_{in} = 0$, azaz ha a kimenetet zérussá tesszük



(a)

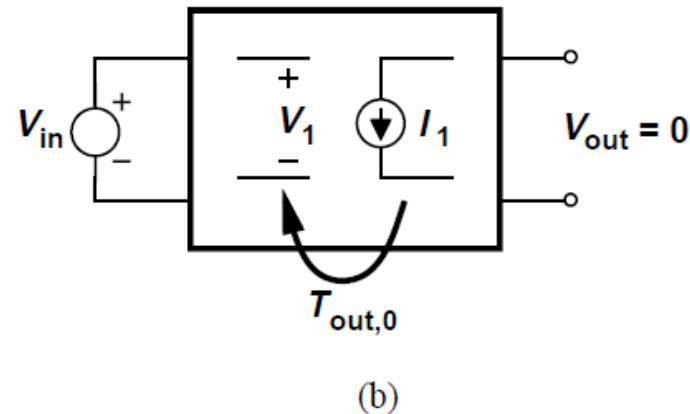
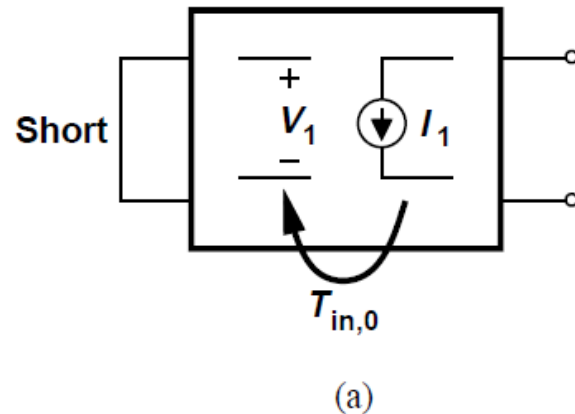
Bode módszerének alternatív értelmezései

- Dupla nullázás módszere (folyt.):

- A jelöléseinket kissé átalakítva kimondhatjuk, hogy egy áramkör átvitele felírható a következőképpen:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A \frac{1 + T_{out,0}}{1 + T_{in,0}}$$

- Ahol $A = V_{out}/V_{in}$, a vezérelt forrást nullázva, valamint ahol $T_{out,0}$ és $T_{in,0}$ jelöli a visszatérési faktorokat $V_{out} = 0$ és $V_{in} = 0$ esetén



Bode módszerének alternatív értelmezései

- Dupla nullázás módszere (bizonyítás):

- Kiindulva a következőkből:

$$V_{out} = AV_{in} + BI_1$$

$$V_1 = CV_{in} + DI_1$$

- Megfigyelhetjük, hogy ha $V_{in} = 0$, then $V_1/I_1 = D$ and hence $T_{in,0} = -g_m D$
- Továbbá, ha $V_{out} = 0$, then $V_{in} = (-B/A)I_1$ and hence $V_1/I_1 = (AD - BC)/A$
i.e., $T_{out,0} = -g_m(AD - BC)/A$

- Ezen eredményeket összefoglalva:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = A \frac{1 + T_{out,0}}{1 + T_{in,0}}$$

- Az A-val való osztás a fenti számításokban feltételezi, hogy $A \neq 0$