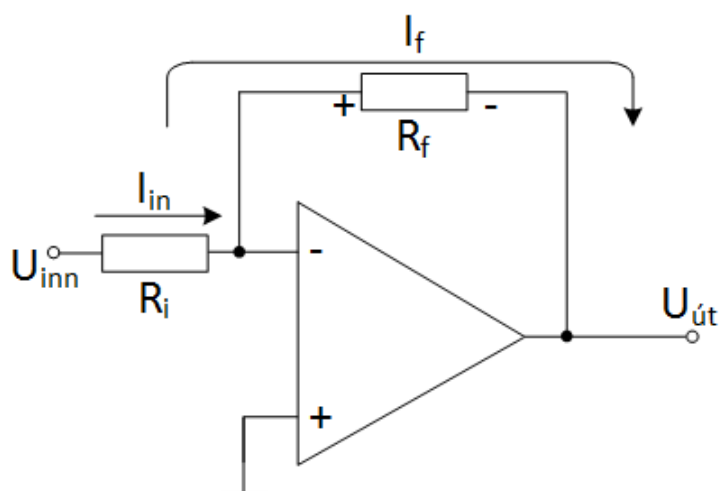


Rafbók



## Rafeindafræði 17. hefti

Aðgerðamagnarar

Sigurður Örn Kristjánsson

Bergsteinn Baldursson

Þetta hefti er án endurgjalds á rafbókinni.

[www.rafbok.is](http://www.rafbok.is)

Allir rafiðnaðarmenn og rafiðnaðarnemar geta fengið aðgang án endurgjalds að rafbókinni.

Heimilt er að afrita textann til fræðslu í skólum sem reknir eru fyrir opinbert fé án leyfis höfundar eða Fræðsluskrifstofu rafiðnaðarins. Hvers konar sala á textanum í heild eða að hluta til er óheimil nema að fengnu leyfi höfundar og Fræðsluskrifstofu rafiðnaðarins.

Höfundar eru Sigurður Örn Kristjánsson og Bergsteinn Baldursson.  
Umbrot í rafbók Báru Halldórsdóttir.

Vinsamlegast sendið leiðréttingar og athugasemdir til höfundar Sigurðar Arnar Kristjánssonar [sigurduorn@gmail.com](mailto:sigurduorn@gmail.com) eða til Báru Halldórsdóttur á netfangið [bara@rafmennt.is](mailto:bara@rafmennt.is)

---

**Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -**

---

**Efnisyfirlit**

1. Kynning á aðgerðamögnurum .....	4
2. Skaut og teiknitákn aðgerðamagnara .....	4
3. Hinn fullkomni aðgerðamagnari.....	5
4. Módel af raunverulegum aðgerðamagnara .....	5
5. Blokkmynd af aðgerðamagnara.....	5
6. Dæmi .....	6
7. Einfasa inngangshamur ( <i>Single-Ended Input</i> ) .....	6
8. Misfasa inngangur ( <i>Differential Input</i> ) .....	7
9. Samfasa inngangur ( <i>Common-Mode Input</i> ) .....	7
10. Deyfingastuðull ( <i>Common-Mode Rejection Ratio</i> ) .....	7
11. <i>Input Offset</i> spenna.....	9
12. Rek inngangs spennu ( <i>InputOffset</i> ) vegna hita .....	9
13. Inngangsstraumar aðgerðamagnara ( <i>Input Bias Current</i> ) .....	9
14. Inngangsmótstaða aðgerðamagnara ( <i>Input Impedance</i> ). .....	10
15. Inngangs „ <i>Offset</i> “ straumur .....	10
16. Útgangsmótstaða aðgerðamagnara ( <i>Output Impedance</i> ).....	12
17. Rishraði ( <i>Slew Rate</i> ).....	12
18. Dæmi .....	13
19. Tíðni svörun ( <i>Frequency Response</i> ).....	13
20. Samanburður á aðgerðamögnurum .....	14
21. Aðrir möguleikar aðgerðamagnara .....	14
22. Dæmi .....	15
23. Neikvæð afturvirkni ( <i>Negative feedback</i> ) .....	15
24. Dæmi .....	16
25. Aðgerðamagnarar með neikvæða afturvirkni.....	17
26. Dæmi .....	19

---

**Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -**

---

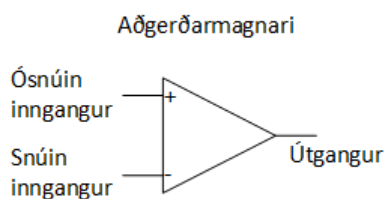
27. Spennufylgja ( <i>Voltage-Follower</i> ).....	20
28. Snúin magnari ( <i>Inverting Amplifier</i> ).....	21
29. Dæmi .....	23
30. Inngangs – og útgangsmótstaða ósnúins aðgerðamagnarans .....	23
31. Dæmi .....	25
32. Inn - og útgangsmótstaða spennufylgju ( <i>Voltage-Follower</i> ) .....	26
33. Dæmi .....	26
34. Inn - og útgangsmótstaða snúins aðgerðamagnara .....	26
35. Dæmi .....	28
36. Spennumögnun er tíðniháð ( <i>Voltage Gain Is Frequency Dependent</i> ) .....	28
37. 3 dB bandbreidd aðgerðamagnara ( <i>Open-Loop Bandwidth</i> ) .....	29

## 1. Kynning á aðgerðamögnurum

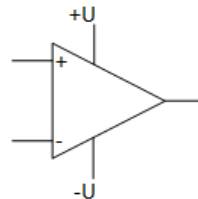
Fyrsta kynslóð aðgerðamagnara voru eingöngu notaðir til að framkvæma útreikninga svo sem samlagningu, frádrátt, diffrun og tegrun. Þessi fyrsta kynslóð voru hannaðir með lömpum sem unnu á háum spennum. Í dag eru aðgerðarmagnarar línulegir íhlutir sem vinna á láspennu og eru mjög ábyggilegir íhlutir.

## 2. Skaut og teiknitákn aðgerðamagnara

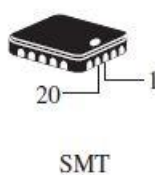
Teiknitákn aðgerðamagnara er sýnt á mynd 1a. Hann hefur tvö inngangsskaut, *inverterandi* (Snúið) (-) og ekki *inverterandi* (Ósnúið) (+) og einn útgang. Einnig hefur aðgerðarmagnari tvo jafnspennuinnganga (-) skaut og (+) skaut eins og mynd 1b sýnir. Oft er þessum skautum sleppt á teikningum þar sem þau eru sjálfgefín. Algeng hús aðgerðamagnara eru sýnd á mynd 1c.



Mynd 1a. Táknmynd.



Mynd 1b. Táknmynd með dc spennu.



Mynd 1c. Algeng hús aðgerðamagnara. Pinni 1 er merktur með punkti á húsinu.

Mynd 1. Tákn og hús aðgerðamagnarar (Op-amp).

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

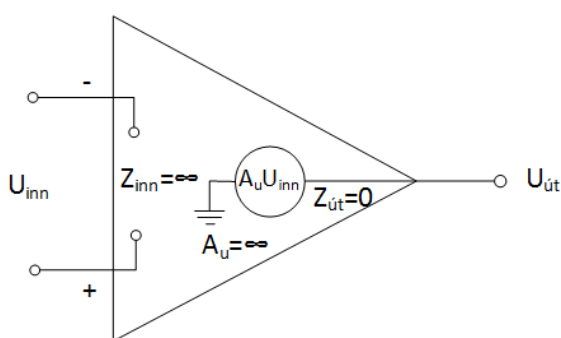
### 3. Hinn fullkomni aðgerðamagnari

Til að skýra út hvað aðgerðamagnari er skoðum við módel fyrir hinn fullkomna aðgerðamagnara.

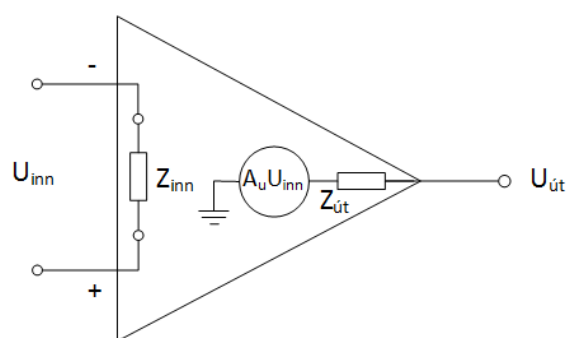
Hann hefur óendanlega spennumögnun og bandbreidd. Hann hefur einnig óendanlegan háa inngangsmótstöðu þannig að hann valdi engu álagi. Hann hefur enga útgangsmótstöðu. Þessi einkenni magnarans eru sýnd á mynd 2a.

Inngangsmerkið  $U_{inn}$  liggur á milli + og – skautanna og útgangsspennan

$U_{út}$  er  $U_{út} = A_u \cdot U_{inn}$



Mynd 2a. Fullkominn aðgerðar magnari.



Mynd 2b. Raunverulegur aðgerðar magnari.

Mynd 2. Grunnmynd aðgerðamagnara (op-amp).

### 4. Módel af raunverulegum aðgerðamagnara

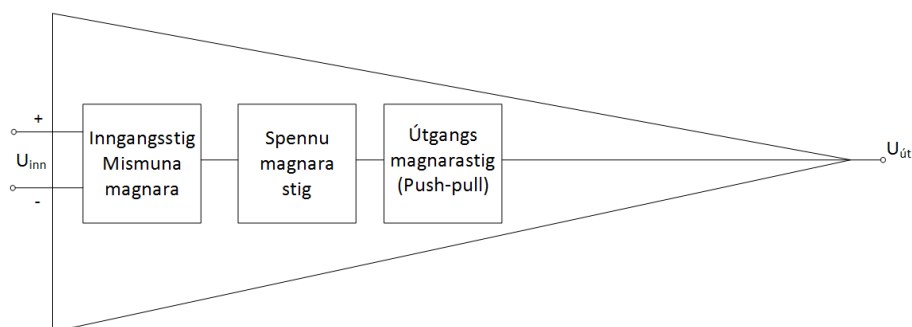
Þó að fastar í nútíma aðgerðarmögnurum nálgist tölugildi sem túlka má sem hinn fullkomni aðgerðamagnari er ekki hægt að búa til hann. Allir hlutir hafa sín takmörk og það hafa aðgerðarmagnarar líka. Aðgerðamagnarar hafa bæði spennu og straumtakmarkanir. Sem dæmi má nefna að  $U_{út(t-t)}$  er alltaf aðeins minni en aflgjafaspennurnar (+) og (-). Einnig er útstraumurinn takmarkaður af afltapi og íhluta spennu- og straumþoli. Einkenni raunverulegs aðgerðamagnara er mjög há mögnun, mjög há inngangsmótstaða og lá útgangsmótstaða. Þetta sést á mynd 2b.

### 5. Blokkmynd af aðgerðamagnara

Aðgerðamagnari er settur saman af þremur gerðum af mögnurum:

mismunamagnarastigi (*differential amplifier*), spennumagnara, og push-pull magnara eins og sést á mynd 3. Mismunamagnarinn er inngangsstig aðgerðamagnarans. Spennumagnarinn er venjulega klassi A tengdur magnari og geta þeir verið fleiri en einn. *Push-pull class* AB magnari er síðan útgangsstigið.

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -



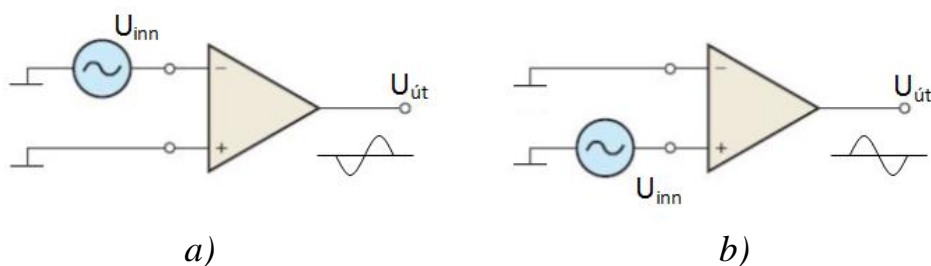
Mynd 3. Grunnmagnarastig aðgerðamagnara.

### 6. Dæmi

1. Nefnið tvær grunntengingar á aðgerðarmögnunum?
2. Skýrið út helstu eiginleika raunverulegs aðgerðarmagnara?
3. Hvað heita magnarastig aðgerðamagnara?

### 7. Einfasa inngangshamur (*Single-Ended Input*)

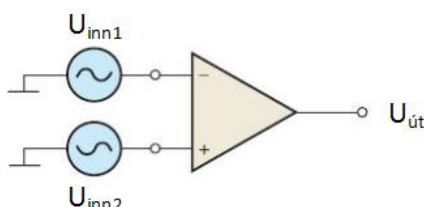
Þegar aðgerðamagnari vinnur í einfasa inngangsham (*single-ended mode*), er annar inngangur magnarans tengdur jörð enn hinn tengdur við ac spennugjafa eins og sýnt er á mynd 4. Þegar inngangsmerki er sett á snúna innskautið (*inverting input*) eins og sýnt er á mynd 4a er því snúið í magnaranum þannig að útgangsmerkið er  $180^\circ$  úr fasa við inngangsmerkið. Þegar inngangsmerkið er sett á ósnúna innskautið (*noninverting input*) og umsnúna innskautið er jarðbundið kemur útgangsmerkið í fasa við inngangsmerkið eins og sést á mynd 4b.



Mynd 4. Einpóla inngangs hamur (*Single-ended input mode*).

### 8. Misfasa inngangur (*Differential Input*)

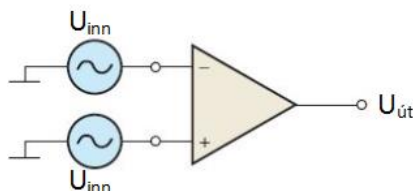
Í mismuna ham eru sett tvö gagnstæð merki inn á inngangana eins og sýnt er á mynd 5. Merkin þurfa ekki að vera í fasa né af sama styrk. Útgangsmerki magnarans verður mismunur inngangsmerkjanna.



Mynd 5. Mismunamagnari (*Differential input mode*).

### 9. Samfasa inngangur (*Common-Mode Input*)

Þegar tvö merki sem eru með sama fasa, tíðni og styrk eru sett samtímis á báða innganga aðgerðamagnara eins og sýnt er á mynd 6 upphefja þau hvort annað og útkoman á útgang magnarans verður 0. Þessi hæfni magnarans til að útiloka, hafna þessu merki, kallast samfasa höfnun (*common mode rejection*). Mikilvægi þessarar getu aðgerðamagnara liggur í því að geta útilokað og eytt óæskilegum merkjum sem koma inn á báða innganga hans svo sem truflunum frá 50 riða spennu.



Mynd 6. Samfasa vinnsla (*Common - mode operation*).

### 10. Deyfingastuðull (*Common-Mode Rejection Ratio*)

Hægt er að setja inngangsmerki á annan eða báða innganga aðgerðamagnara annaðhvort í fasa eða mótfasa. Merkin eru mögnuð upp af aðgerðamagnaranum og skilað út á útgang hans. Óæskileg merki svo sem suð (*noise*) sem fara inn á innganga aðgerðamagnara í fasa er eytt af honum vegna mismunaáhrifa innganga hans og birtast ekki á útgang.

Þegar inngangsmerki er sameiginlegt á báða innganga magnarans er hann í samfasa ham (*common mode*). Mæling á hæfni magnarans til að útiloka, hafna þessu merki er kallað **deyfingastuðull** (*common mode rejection ratio*), **CMRR**. Oftast eru þessi inngangsmerki óæskileg t.d. suð. CMRR sem er 100000 þýðir að



---

**Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -**

---

**misfasamerki** (*differential, d*) sem sett er inn á aðgerðamagnara er magnað 100.000 sinnum meira en t.d. suð sem fer **samfasa** (*common-mode, cm*) inn á magnarann.

CMRR fyrir mismunamagnara er skilgreint sem:

$$CMRR = \frac{A_{u(d)}}{A_{u(cm)}}$$

eða í styrkeiningunni dB

$$CMRR(dB) = 20 \cdot \log \left[ \frac{A_{u(d)}}{A_{u(cm)}} \right] = 20 \cdot \log(CMRR)$$

Í góðum magnara er CMRR á milli 1000 til 10000.

**Spennumögnun aðgerðamagnara án afturvirkni** (*open-loop, A<sub>ol</sub>*) er hlutfall þeirrar spennu sem tekin er frá útgang hans miðað við þá spennu sem sett er á inngang hans þegar engir ytri íhlutir eru notaðir. Þessi mögnun er eingöngu háð hönnun aðgerðamagnarans sjálfs og er gefin upp af framleiðanda og getur orðið allt að 200000 sinnum en frávik eru mikil.

**Sýnidæmi:**

Finnið CMRR í *decibelum* fyrir aðgerðamagnari (*op-amp*) sem er með mögnun án afturvirkni **A<sub>ol</sub>** sem 100000 og samfasa mögnun **A<sub>cm</sub>** (*common-mode gain*) = 0,2?

$$A_{ol} = 100000 \text{ og } A_{cm} = 0,2$$

$$CMRR = \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = \frac{100000}{0,2} = 500000$$

$$CMRR = 20 \cdot \log(500000) = 114dB$$

**Samfasa spennusvið á innganga** (*Common-Mode Input Voltage Range*)

lýsir því hvaða samfasa inngangsspennusvið (sama spenna sett á báða innganga) veldur ekki klippingu eða annarri bjögun á útgangsspennu aðgerðamagnara.

Margir aðgerðamagnarar (*op-amps*) hafa samfasa spennusvið á innganga (*common-mode input voltage ranges*) sem er  $\pm 10$  V þegar notaður er  $\pm 15$  V dc spennugjafi.

### 11. *Input Offset* spenna

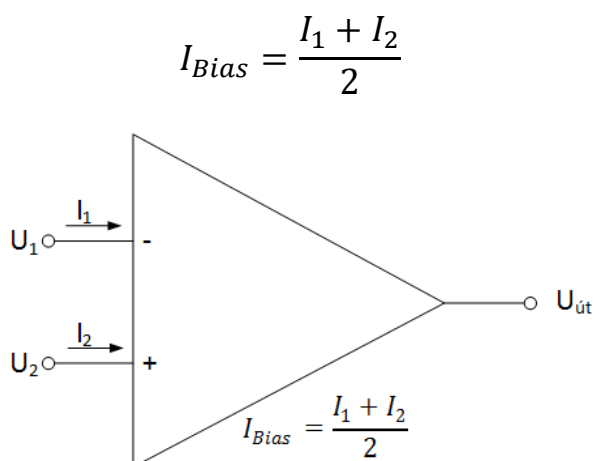
Fullkominn aðgerðarmagnari (*ideal op-amp*) skilar núll spennu á útgang sinn ef sett er núll spenna á inngang(a) hans. Í aðgerðarmagnara (*practical op-amp*) fæst lítil jafnspennuvilla ( $U_{\text{út(villa)}}$ ) á útgang þegar samfasa inngangsmerki er sett á innganga hans. Þetta er vegna ósamhæfðrar base - emitterspennu í mismunasmögnurum, sem er fyrsta stig aðgerðamagnara (*op-amp*). Gefið er upp í upplýsingablöðum aðgerðamagnara spennan  $U_{OS}$  sem sé sú mismunaspenna sem þarf á innganga aðgerðamagnara þannig að útgangsspennan verði núll. Þessi spenna er yfirleitt minni en 2 (mV) fyrir aðgerðamagnara (*practical op-amp*).

### 12. Rek inngangs spennu (*InputOffset*) vegna hita

Stuðull fyrir rek *Input Offset* spennu vegna hita (*input offset voltage drift*) er skyldur spennunni  $U_{OS}$ . Stuðullinn skilgreinir hversu mikið rek er á spennunni  $U_{OS}$  miðað við hitastigsbreytingu um gráðu á *Celsius*. Þetta gildi getur legið frá 5 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) til 50 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

### 13. Inngangsstraumar aðgerðamagnara (*Input Bias Current*)

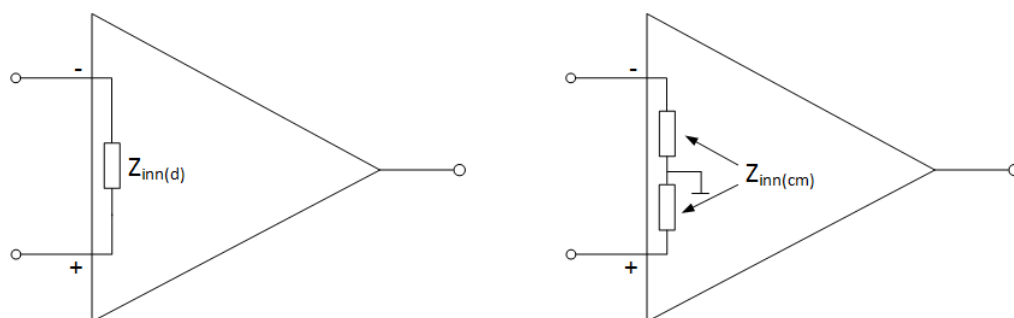
Inngangsstraumar aðgerðamagnara (*Input Bias Current*) er skilgreindur sem meðaltal beggja dc inngangsstrauma aðgerðamagnara, sjá mynd 7, sem þarf til að keyra fyrsta stig aðgerðamagnara óaðfínnanlega.



Mynd 7. Inngangsstraumar aðgerðamagnara (*Input Bias Current*).

### 14. Inngangsmótstaða aðgerðamagnara (*Input Impedance*).

Hægt er að skilgreina inngangsmótstöðu  $Z_{in}$  aðgerðamagna á tvenna vegu. Annarsvegar sem misfasa inngangsmótstöðu  $Z_{in(d)}$  eða samfasa inngangsmótstöðu  $Z_{in(cm)}$ . Misfasa inngangsmótstaðan  $Z_{in(d)}$  er heildarmótstaðan sem mælist milli innganga aðgerðamagnarans eins og sýnt er á mynd 8a á meðan samfasa inngangsmótstaðan er mæld frá inngangi til jarðar eins og sýnt er á mynd 8b.



a) inngangsmótstaða  
mismunamagnara

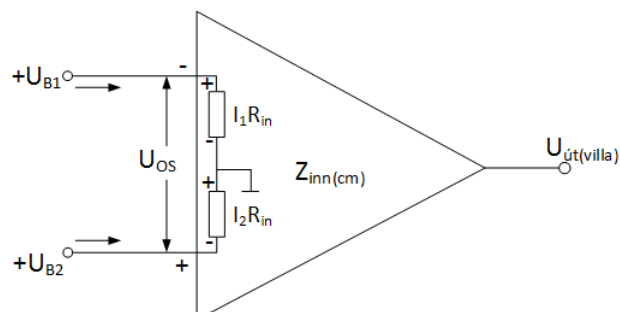
b) samfasa  
inngangsmótstaða

Mynd 8. Inngangsmótstaða aðgerðamagnara (Op-amp input impedance).

### 15. Inngangs „Offset“ straumur

Í aðgerðamagnara eru inngangsstraumarnir ekki núll. Inngangs *Offset* straumurinn  $I_{OS}$  er skilgreindur sem númerískur mismunur inngangsstraumanna eða

$$I_{OS} = |I_1 - I_2|$$



Mynd 9. Áhrif  $I_{OS}$  straumsins á  $U_{OS}$  spennuna.

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

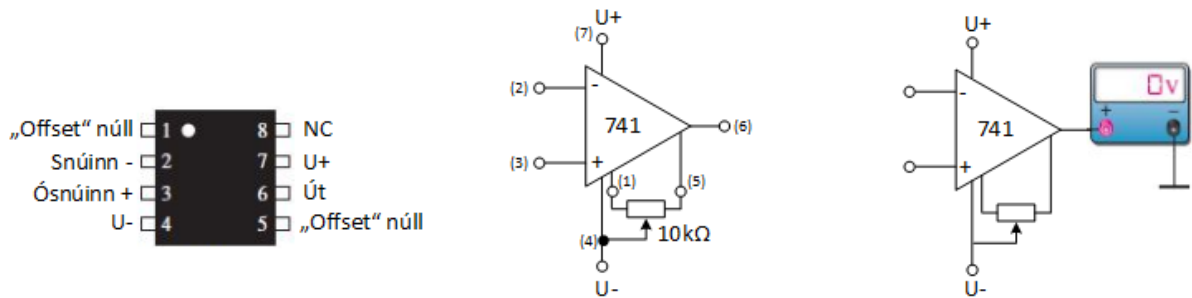
Inngangs *offset* spennan sem myndast vegna straumsins  $I_{OS}$  er

$$U_{OS} = I_1 \cdot R_{in} - I_2 \cdot R_{in} = (I_1 - I_2) \cdot R_{in} = I_{OS} \cdot R_{in}$$

Spennuvillan sem verður á útgang aðgerðamagnara  $U_{út(villa)}$  vegna  $I_{OS}$  er mögnuð af spennumögnun aðgerðamagnarans og er

$$U_{út(villa)} = A_u \cdot U_{OS}$$

Breyting á *offset* straumnum vegna hitabreytinga er um það bil  $5(\text{nA}/^\circ\text{C})$  eru algeng og hefur áhrif á villuspennuna  $U_{út(villa)}$ . Flestir aðgerðamagnarar hafa möguleika á að leiðrétta villuspennuna  $U_{út(villa)}$ . Venjulega er þetta gert með því að tengja ytri mótstöðu á tengipunkta rásarinnar eins og sýnt er á mynd 10.

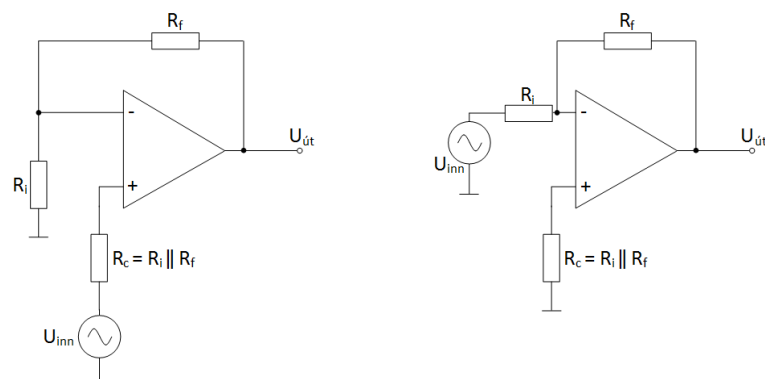


a) 8-pinna DIP eða SMT hús      b) Ytri breytimótstaða      c) núllstilling

Mynd 10. Dæmi *offset* núll tengingu 741 aðgerðamagnara.

Mótstöðunni er breytt þangað til að útgangsspennan verður núll, mynd 10c.

Leiðréttingu á villuspennunni  $U_{út(villa)}$  fyrir ósnúin og snúin aðgerðamagnara má einnig gera eins og mynd 11a og mynd 11b sýnir.

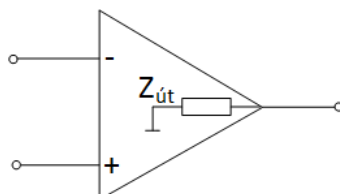


a) Ósnúinn magnari      b) Snúinn magnari.

Mynd 11. Dæmi um leiðréttingu á  $U_{út(villa)}$  fyrir ósnúin og snúin aðgerðamagnara.

## 16. Útgangsmótstaða aðgerðamagnara (*Output Impedance*)

Útgangsmótstaða aðgerðamagnara er skilgreind sem sú mótstaða sem mæld er milli útgangsskaut og jarðar eins og sýnt er á mynd 12.



Mynd 12. Útgangsmótstaða aðgerðamagnara (*Op-amp output impedance*).

## 17. Rishraði (*Slew Rate*)

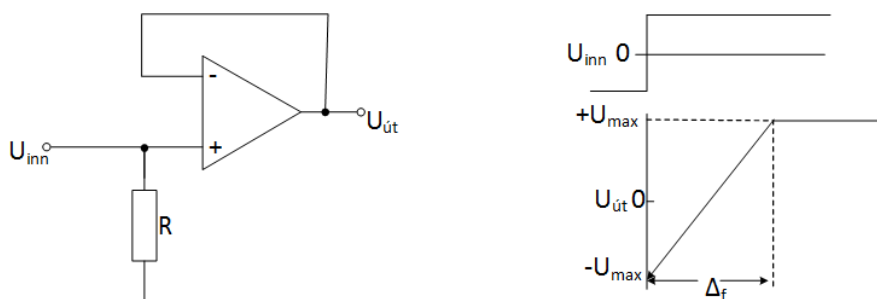
Hámarksbreyting útspennu á tímaeiningu miðað við að sett sé púlsspenna (*step input voltage*) á inngang aðgerðamagnara er skilgreint sem rishraði (*slew rate*) aðgerðamagnara eða

$$\text{Rishraði (Slew rate)} = \frac{\Delta U_{\text{út}}}{\Delta t} \left[ \frac{\text{V}}{\mu\text{s}} \right]$$

Þar sem

$$\Delta U_{\text{út}} = U_{\text{út(max)}} - (-U_{\text{út(min)}})$$

Rishraði er háð hátíðnisvörun magnarastiga aðgerðamagnarans og eykst með aukinni hátíðnisvörun. Mynd 13 sýnir hvernig hægt er að mæla spennufyllgnina þegar kassapúls er settur á inngang aðgerðamagnarans Þessi mæling sýnir minnstu spennufyllgnina..



a) Prufurás

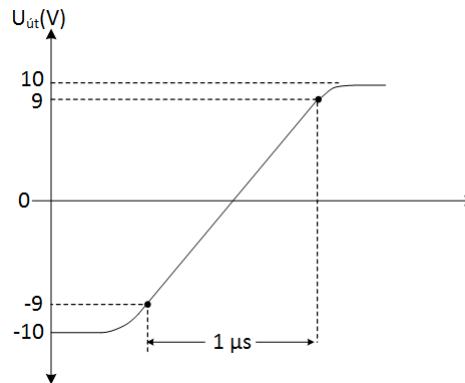
b) Inngangsspenna og niðurstaða

Mynd 13. Mæling á rishraða aðgerðamagnara (*Slew-rate measurement*).

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### Sýnidæmi:

Hver er rishraði (*slew rate*) aðgerðamagnara ef mynd 14 sýnir hvernig aðgerðamagnari bregst við kassabylgju á inngang.



Mynd 14.

$$\Delta U_{út} = U_{út(max)} - (-U_{út(max)}) =$$

$$9(V) - (-9(V)) = 18(V)$$

$$\text{Rishraði (Slew rate)} =$$

$$\frac{\Delta U_{út}}{\Delta t} = \frac{18(V)}{1(\mu s)} = 18 \left( \frac{V}{\mu s} \right)$$

### 18. Dæmi

Hver er rishraði (*slew rate*) aðgerðamagnara ef aðgerðamagnari bregst við kassabylgju á inngang sem gefur spennusveiflu á útgang frá -8(V) til +7(V) á 0,75 (μs)?

### 19. Tíðni svörun (*Frequency Response*)

Hátíðnisvörun aðgerðamagnara er háð tegund transistora sem byggja upp mögnunarstig aðgerðamagnarann. Í mögnurunum sem byggja upp aðgerðamagnarann eru engir þéttar og þess vegna geta þeir unnið á mjög lágu tíðnum allt niður í dc (0 Hz).

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### 20. Samanburður á aðgerðamögnurum

Tafla 1 sýnir samanburð á helstu föstum algengra aðgerðamagnara.

Aðgerða- magnari	CMRR (dB) Min	Mögnun án aftur- virkni( $A_{ol}$ )	Inngangs offset spenna í ( $mV_{Max}$ )	Inngangs Straumur ( $nA_{Max}$ )	Inngangs Mótstaða ( $M\Omega_{Min}$ )	Rishraði ( $V/\mu S_{Min}$ )	Athugasemdir
LM741C	70	200000	6	500	0,3	0,5	Almennur magnari setur staðal
LM101A	80	160000	7,5	250	1,5	-	Almennur aðgerða magnari
OP113	100	2400000	0,075	600	-	1,2	Lágt suð, reklítill
OP177	130	12000000	0,01	1,5	26	0,3	Mjög nákvæmur
OP184	60	240000	0,065	350	-	2,4	Nákvæmur
AD8009	50	-	5	150	-	5500	BW=700MHz, hraður
AD8041	74	56000	7	2000	0,16	160	BW=160MHz
AD8055	82	3500	5	1200	10	1400	Hröð spennu- afturvirkni

### 21. Aðrir möguleikar aðgerðamagnara

Flestir aðgerðamagnarar hafa þrjá öryggisþætti.

1. **Skammhlaupsvörn** (*short-circuit protection*) sem veldur því að rásin skemmist ekki þó svo að útgangur aðgerðamagnarans skammhleypist.
2. **Upphleðsluvörn** (*no latchup*) sem kemur í veg fyrir að útgangur aðgerðamagnarans festist í einhverri ákveðinni stöðu.
3. **Offset núll** sem búa má til með ytri mótstöðu og stilla síðan útspennu aðgerðamagnarans á núll þegar núll spenna er sett á innganga aðgerðamagnarans.

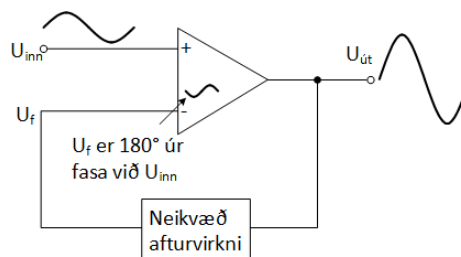
## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### 22. Dæmi

1. Hver er munur á einfasa og misfasa innganga?
2. Skilgreinið deyfingastuðul?
3. Veldur hærra CMRR hærri eða lægri samfasa mögnun?
4. Teldu upp að minnsta kosti 10 stuðla (*parameters*) fyrir aðgerðamagnara.
5. Finnið CMRR í *decibelum* fyrir aðgerðamagnari (*op-amp*) sem er með mögnun án afturvirkni  $A_{ol}$  sem 85000 og samfasa mögnun  $A_{cm}$  (*common-mode gain*) = 0,25?
6. Hver er rishraði (*slew rate*) aðgerðamagnara ef aðgerðamagnari bregst við kassabylgju á inngang sem gefur spennusveiflu á útgang frá -8(V) til +7(V) á 0,9 ( $\mu s$ )?

### 23. Neikvæð afturvirkni ( *Negative feedback* )

Neikvæð afturvirkni er mikilvægt hugtak í rafeindafræðum, sérílagi við notkun aðgerðamagnara. Neikvæð afturvirkni (*Negative feedback*) er ferli þar sem hluti útspennu magnara er sett á -inngang aðgerðarmagnarans. Þetta er sýnt myndrænt á mynd 15. Þar er afturvirka merkinu  $U_f$ , sem fer inn á viðsnúna skaut (-) (*inverting (-) input*) aðgerðamagnarans, snúið um  $180^\circ$  miðað við inngangsmerkið  $U_{inn}$



Mynd 15. Neikvæð afturvirkni (*Negative feedback*).

Eins og áður hefur verið rætt um er mögnun aðgerðamagnara án afturvirkni mjög há (meira en 100000). Þess vegna getur mjög lítil inngangsspenna  $U_{inn}$  komið aðgerðamagnaranum í mettun. Í raun getur inngangs *offset* spenna (*input offset voltage*) aðgerðamagnarans gert það. Sem dæmi ef  $U_{inn} = 1$  (mV) og  $A_{ol} = 100,000$  þá verður útgangsspennan  $U_{út}$

$$U_{út} = A_{ol} \cdot U_{inn} = 100000 \cdot 10(mV) = 100(V)$$



## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

Þetta er í raun ekki hægt þar sem útgangsspennan getur mest orðið vinnuspenna aðgerðamagnarans, venjulega  $\pm 15$  (V) en magnarinn er samt keyrður í mettun og hægt er að segja að án neikvæðrar afturvirkni getur mjög lítil inngangsspenna keyrt aðgerðamagnarann í ólínulega vinnslu **og þar með í mettun**.

Með neikvæðri afturvirkni er spennumögnun  $A_{cl}$  magnarans stjórnað þannig að hann vinni línulega sem magnari auk þess eru inngangs- og útgangsmótstöður stillanlegar. *Tafla 2* sýnir hvað hægt er að ná fram með aðgerðamögnurum með og án afturvirkni. Notkun aðgerðamagnara án afturvirkni einskorðast sérstaklega við ýmsar gerðir af samanburðarásum (*comparator*).

Aðgerða-magnari	Spennu-mögnun	Inngangs-mótstaða (Z)	Útgangs-mótstaða (Z)	Bandbreidd
Án afturvirkni	Mjög há og ekki stillanleg	Há	Hlutfallslega lá	Lítill, vegna mikillar mögnunar
Með afturvirkni	Stillanleg með ytri rásum	Hægt að stilla með ytri íhlutum að óskuðu gildi	Hægt að stilla með ytri íhlutum að óskuðu gildi	Verulega meiri vegna minni mögnunar

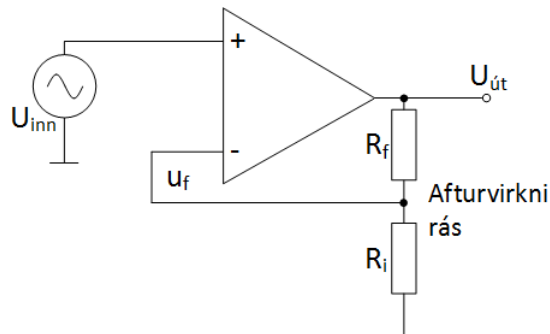
*Tafla 2.*

### 24. Dæmi

1. Hver eru kostir magnara sem tengdur er með neikvæða afturvirkni?
2. Af hverju er nauðsynlegt að minnka mögnun aðgerðamagnara með neikvæðri afturvirkni?

### 25. Aðgerðamagnarar með neikvæða afturvirkni

Aðgerðamagnari þar sem signalið er sett á ósnúna innganginn (+) (*Noninverting Amplifier*) en tengdur með neikvæðri afturvirkni með mótstöðunum  $R_f$  og  $R_i$ . Þetta er sýnt á mynd 16. Þessar mótstöður valda neikvæðri afturvirkni á eftirfarandi hátt

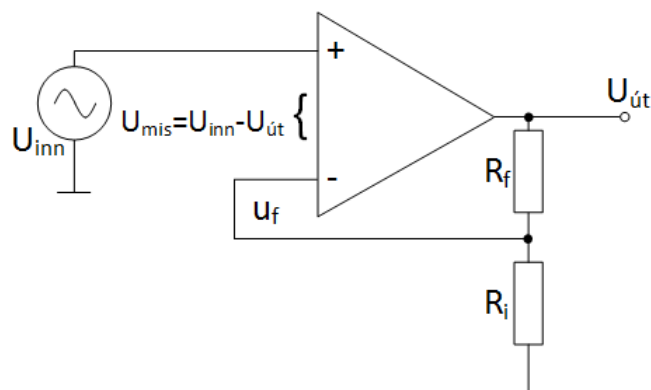


Mynd 16. Aðgerðamagnari með inngangsmerkið á ósnúna skautið (+) en tengdur með neikvæðri afturvirkni (*Noninverting Amplifier*).

Mótstöðurnar  $R_i$  og  $R_f$  mynda spennudeilirás sem minnkar  $U_{út}$  og tengja spennuna sem myndast  $U_f$  inn á snúna skaut (*inverting input*). Afturvirka spennan (*feedback voltage*) er skilgreind sem

$$U_f = \left[ \frac{R_i}{R_f + R_i} \right] \cdot U_{út} = B \cdot U_{út} ; B = \frac{R_i}{R_f + R_i}$$

Mismunur spennanna sem er á milli  $U_{inn}$  og  $U_f$  verður mismunaspenna  $U_{mis}$  inn á aðgerðamagnarann eins og sést á mynd 17.



Mynd 17. Aðgerðamagnari með inngangsmerkið á ósnúna skautið (+) en tengdur með neikvæðri afturvirkni (*Noninverting Amplifier*).

---

**Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -**

---

Spennan  $U_{\text{mis}}$  sem sýnd er á mynd 17 er mögnuð með mögnunarstuðli aðgerðamagnarans  $A_{ol}$  og gefur okkur útgangsspennu.  $B$  túlkar deyfingalið afturvirku rásarinnar (*attenuation of the feedback circuit*).

$$U_{\text{út}} = A_{ol}(U_{\text{inn}} - U_f) = A_{ol}(U_{\text{inn}} - B \cdot U_{\text{út}}) \Rightarrow$$

$$\frac{U_{\text{út}}}{U_{\text{inn}}} = \frac{A_{ol}}{1 + B \cdot A_{ol}}$$

Þar sem  $B \cdot A_{ol} \gg 1$  verður

$$\frac{U_{\text{út}}}{U_{\text{inn}}} = \frac{A_{ol}}{B \cdot A_{ol}} = \frac{1}{B}$$

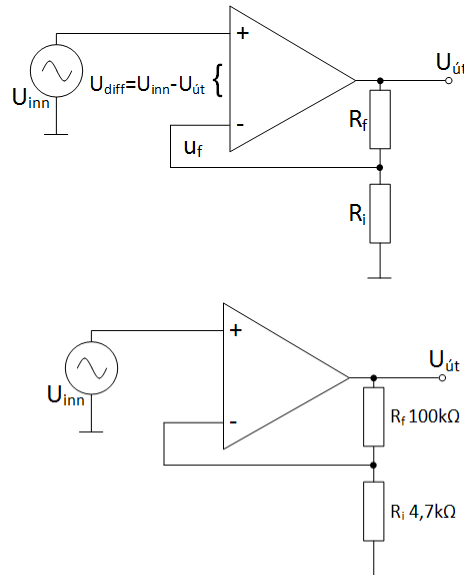
og heildarmögnun magnarans  $A_{cl}$  án viðsnúnings  
(*non inverting amplifier*) með afturvirkni verður

$$A_{cl(NI)} = \frac{U_{\text{út}}}{U_{\text{inn}}} = \frac{R_f}{R_f + R_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### Sýnidæmi:

Finnið mögnun aðgerðamagnara með inngangsmerkið á ósnúna skautið (+) en tengdur með neikvæðri afturvirkni (*Noninverting Amplifier*) ef  $A_{ol} = 100\,000$ .



Mynd 18. Aðgerðamagnari með inngangsmerkið á ósnúna skautið (+) en tengdur með neikvæðri afturvirkni (*Noninverting Amplifier*).

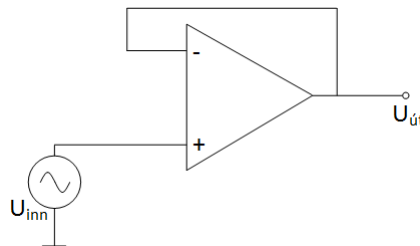
$$A_{cl(NI)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{100(k\Omega)}{4,7(k\Omega)} = 22,3$$

### 26. Dæmi

Hver er heildarmögnun rásarinnar á mynd 18 ef  $R_i = 4700\Omega$  og  $R_f = 150\,(k\Omega)$ .

## 27. Spennufylgja (*Voltage-Follower*)

Að beintengja alla útgangsspennu inn á snúna inngang (*inverting (-) input*) ósnúins magnara (*noninverting amplifie*) er sértengidæmi. Þessi rás fær heitið spennufylgja (*Voltage-Follower*) og sést tengingin á mynd 19.



Mynd 19. Spennufylgja (*Voltage-Follower*).

Mögnun slíkrar rásatengingar er 1 þar sem

$$A_{cl(NI)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

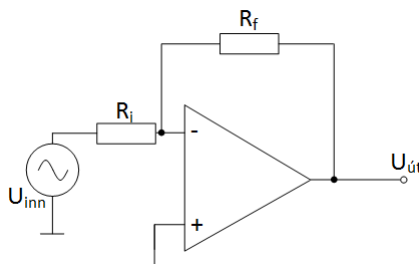
þar sem  $R_i$  stefnir á  $\infty$  stefnir  $\frac{R_f}{R_i}$  á 0 og

$$A_{cl(VF)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = 1$$

Það sem er áhugaverðast við spennufylgjuna er mjög há inngangsmótstaða og mjög lá útgangsmótstaða. Þetta gerir spennufylgjuna (*voltage-follower*) eftirsóknaverða sem viðnámsbreytir (*Buffer*). Þetta verður skoðað í næsta kafla.

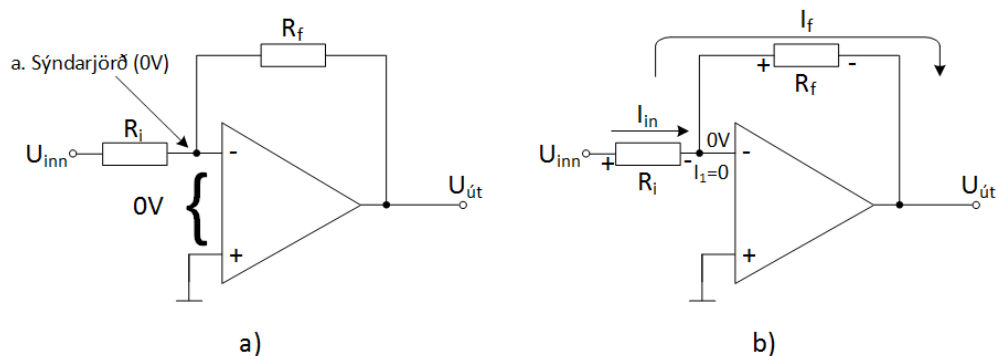
### 28. Snúin magnari (*Inverting Amplifier*)

Aðgerðamagnari tengdur eins og sýnt er á mynd 20 snýr inngangsmerkinu þannig að það er  $180^\circ$  út úr fasa á útganginum. Þetta kallast snúinn aðgerðamagnari. Hann er með neikvæða afturvirkni sem stýrir mögnun hans. Inngangsmerkið er sett inn á snúna (*inverting (-)*) inngang hans í gegn um raðtengdu mótstöðuna  $R_i$ . Einnig er afturvirka hluta útgangsmerkis sett á sama inngang í gegn um mótstöðuna  $R_f$ . Ósnúni inngangur (*noninverting (+)* input) aðgerðamagnarans tengist í jörð.



Mynd 20. Snúinn magnari.

Til að finna mögnunarjöfnu snúins aðgerðamagnara eins og sýndur er á mynd 20 gerum við ráð fyrir að vinna með hinn fullkomna aðgerðamagnara sem segir að inngangsmótstaða magnarans stefni á óendanlegt. Þar sem inngangsmótstaðan er óendanleg þá rennur heldur engin straumur inn á snúna inngang (*inverting(-) input*) hans. Ef engin straumur rennur inn í snúna inngang (*inverting(-) input*) verður heldur ekkert spennufall milli snúna (*inverting(-)*) og ósnúna (*noninverting(+)*) inngang hans. Þetta þýðir að spennan á snúna inngangnum (*inverting (-) input*) er núll þar sem ósnúni inngangurinn (*noninverting (+) input*) er jarðaður. Núllspennan á snúna inngangnum (*inverting (-) input*) er vísað í sem **sýndarjörð** (*virtual ground*). Mynd 21a sýnir þetta ástand.



Mynd 21. Sýndarjörð og spennumögnun í snúnum aðgerðamagnara.

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

Þar sem enginn straumur rennur í snúna inngangi aðgerðamagnarans eins og sést á mynd 21b og spennufallið yfir  $R_i$  verður  $U_{inn}$  þar sem við höfum sýndarjörð hinumegin á mótstöðunni heildarmögnunaðgerðamagnarans  $A_{cl(I)}$

$$I_{inn} = I_f$$

$$I_{inn} = \frac{U_{inn}}{R_i} \quad ; \quad I_f = \frac{-U_{út}}{R_f}$$

$$\Rightarrow$$

$$\frac{U_{inn}}{R_i} = \frac{-U_{út}}{R_f}$$

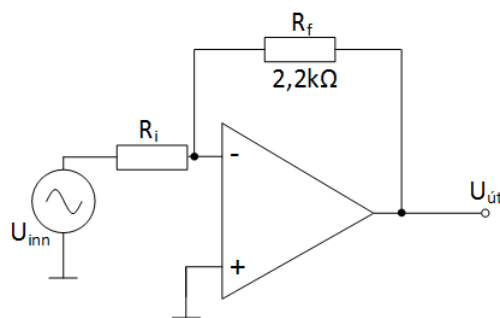
og mögnunin er

$$A_{cl(I)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = -\frac{R_f}{R_i}$$

Lokajafnan sýnir að mögnun í snúnum aðgerðamagnara er eingöngu háð innagangsmótstöðunni ( $R_i$ ) og afturvirknimótstöðunni  $R_f$ . Mínus í jöfnunni túlkar 180 ° fasavendingu í aðgerðamagnaranum.

### Sýnidæmi:

Reiknið mótstöðuna  $R_f$  fyrir magnarann á mynd 22 ef  $A_{cl(I)}$  er -100?



Mynd 22. Snúin aðgerðamagnari.

$$A_{cl(I)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = (-) \frac{R_f}{R_i} \Rightarrow$$

$$R_f = (-)A_{cl(I)} \cdot R_i = 100 \cdot 2200(\Omega) = 220(k\Omega)$$

### 29. Dæmi

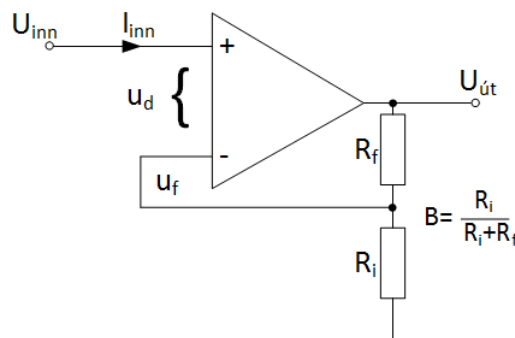
1. Reiknið mótstöðuna  $R_f$  fyrir magnarann á mynd 19 ef  $A_{cl(I)} = -100$  ef  $R_i = 4,7k\Omega$ ?
2. Hver er ástæða fyrir afturvirkni í mögnurum?

### 30. Inngangs – og útgangsmótstaða ósnúins aðgerðamagnarans

**Heildarinngangsmótstaða** sem verður til fyrir ósnúin aðgerðamagnara með afturvirkni er háð íhlutum afturvirknirásarinnar og þess vegna er ekki hægt að segja að það stefni á óendanlegt. Með hjálp myndar 23 sést að deyfingastuðull afturvirknirásarinnar  $B$  er

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

Einnig er gert ráð fyrir því að lítið spennfall  $U_d$  er milli (+) og (-) póla aðgerðamagnara.



Mynd 23. Ósnúin aðgerðamagnari.

Inngangsspennan er skilgreind sem

$$U_{inn} = U_d + U_f ; U_f = B \cdot U_{út} ; U_{út} = U_d \cdot A_{ol} ; U_d = I_{inn} \cdot Z_{in} \Rightarrow$$

$$U_{inn} = (1 + B \cdot A_{ol})U_d$$

og

$$U_{inn} = (1 + B \cdot A_{ol})I_{inn} \cdot Z_{in}$$

$\Rightarrow$  að heildarinngangsmótstaða  $Z_{in(NI)}$  magnarastigsins verður

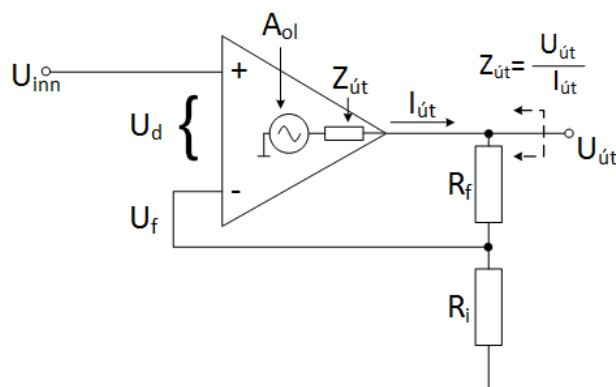
$$Z_{in(NI)} = \frac{U_{inn}}{I_{inn}} = (1 + B \cdot A_{ol})Z_{in}$$



## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

Jafnan um heildarinnangsmótstöðu segir að hún sé margfalt hærri en uppgefin inngangsmótstaða aðgerðamagnarans (án afturvirkni) sem uppgefin er af framleiðanda.

Heildarútgangsmótstaða ósnúins magnara er fundin með hjálp mynd 24.



Mynd 24. Ósnúin aðgerðamagnari.

$$U_{út} = U_d \cdot A_{ol} + I_{út} \cdot Z_{út} \text{ og } U_d = U_{inn} - U_f \Rightarrow$$

$$U_{út} = (U_{inn} - U_f) \cdot A_{ol} + I_{út} \cdot Z_{út} = U_{inn} \cdot A_{ol} - U_f \cdot A_{ol} + I_{út} \cdot Z_{út}$$

$$\text{Þar sem } U_{inn} = \frac{U_{út}}{A_{ol}} \text{ og } U_f = B \cdot U_{út} \text{ verður}$$

$$U_{út} = \frac{U_{út}}{A_{ol}} - B \cdot U_{út} \cdot A_{ol} + I_{út} \cdot Z_{út} \Rightarrow$$

$$U_{út} \left( 1 - \frac{1}{A_{ol}} + B \cdot A_{ol} \right) = I_{út} \cdot Z_{út}$$

$$\text{þar sem } -\frac{1}{A_{ol}} \gg 1 \text{ fæst}$$

$$U_{út}(1 + B \cdot A_{ol}) = I_{út} \cdot Z_{út}$$

$$\text{og þar sem } \frac{U_{út}}{I_{út}} \text{ er heildarútgangsmótstaðan } Z_{út(NI)}$$

sem sést inn í magnarann verður hún

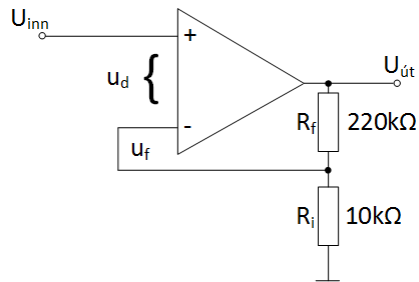
$$Z_{út(NI)} = \frac{U_{út}}{I_{út}} = \frac{Z_{út}}{(1 + B \cdot A_{ol})}$$

Jafnan um heildarútgangsmótstöðu sýnir að hún verður mikið minni en innri útgangsmótstaða  $Z_{út}$  aðgerðamagnarans.

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### Sýnidæmi:

- Reiknið heildarinngangs- og heildarútgangsmótstöðu magnarans á mynd 25 ef það gildir aðgerðamagnarannað  $Z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $Z_{út} = 75 \text{ }\Omega$  og  $A_{ol} = 200000$ ?
- Minndu heildarmögnun magnarastigsins  $A_{cl(NI)}$ ?



Mynd 25. Ósnúin aðgerðamagnari.

$$a) \quad B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{10(k\Omega)}{10(k\Omega) + 220(k\Omega)} = 0,0435$$

$$Z_{in(NI)} = \frac{U_{inn}}{I_{inn}} = (1 + B \cdot A_{ol}) Z_{in}$$

$$= (1 + 0,0435 \cdot 200000) \cdot 2(M\Omega) = 17,4(G\Omega)$$

$$Z_{út(NI)} = \frac{U_{út}}{I_{út}} = \frac{Z_{út}}{(1 + B \cdot A_{ol})} = \frac{75(\Omega)}{(1 + 0,0435 \cdot 200000)} = 8,6(m\Omega)$$

$$b) \quad A_{cl(NI)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{220(k\Omega)}{10(k\Omega)} = 23$$

### 31. Dæmi

- Reiknið heildarinngangs- og heildarútgangsmótstöðu magnarans á mynd 25 ef það gildir  $Z_{in} = 3,5 \text{ M}\Omega$ ,  $Z_{út} = 82 \text{ }\Omega$  og  $A_{ol} = 135000$ ?
- Finndu heildarmögnun magnarastigsins  $A_{cl(NI)}$ ?

### 32. Inn - og útgangsmótstaða spennufylgju (*Voltage-Follower*)

Þar sem spennufylgjan er sértilfelli fyrir ósnúin magnara (*noninverting amplifier*) og deifingastuðull afturvirknirásarinnar  $B = 1$  fæst að inngangsmótstaða hennar er

$$Z_{in(NI)} = \frac{U_{inn}}{I_{inn}} = (1 + A_{ol})Z_{in}$$

Útgangsmótstaðan verður

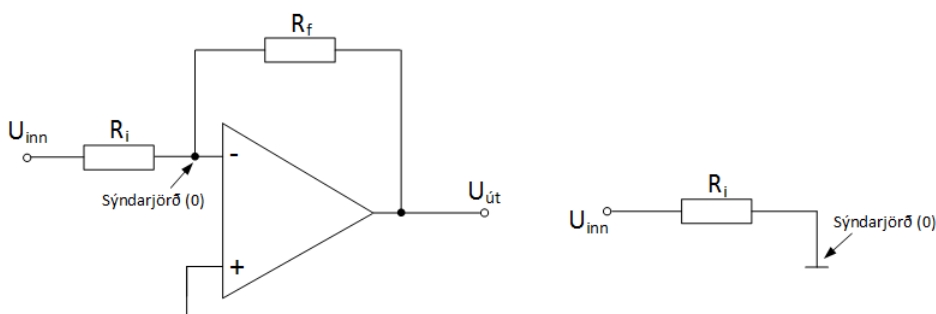
$$Z_{út(NI)} = \frac{U_{út}}{I_{út}} = \frac{Z_{út}}{(1 + A_{ol})}$$

### 33. Dæmi

Reiknið heildarinngangs- og heildarútgangsmótstöðu spennufylgju ef það gildir að  $Z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $Z_{út} = 75 \text{ }\Omega$  og  $A_{ol} = 200000$ ?

### 34. Inn - og útgangsmótstaða snúins aðgerðamagnara

Á mynd 26a og 26b er sýnt hvernig heildar inn- og útgangsmótstaða magnarastigs með aðgerðamagnara er fundin.



Mynd 26. Snúinn aðgerðamagnari (*inverting op-amp*).

Inngangsmerkið og afturvirka merkið koma inn á snúna inngang magnarans (-) og snúni inngangurinn tengist sýndarjörð (0V). Þess vegna verður aðeins mótstaðan  $R_i$  virk sem inngangsmótstaða eða

$$Z_{in(I)} = R_i$$

## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

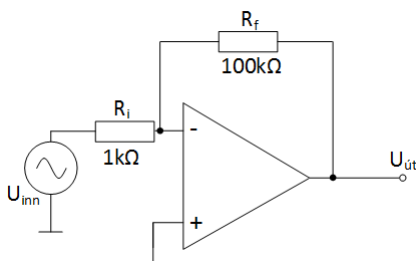
Útgangsmótstaða snúins magnara með afturvirkni fylgir sömu reglu og fyrir ósnúinn aðgerðamagnara eða

$$Z_{út(I)} = \frac{U_{út}}{I_{út}} = \frac{Z_{út}}{(1 + B \cdot A_{ol})}$$

Útgangsmótstaða snúins og ósnúins aðgerðamagnara með afturvirkni er mjög lítil og þess vegna er hægt að tengja mismunandi stærðir álagsmótstöðu við hann án þess að útgangsspennan frá honum breytist.

### Sýnidæmi:

Reiknaðu inn- og útgangsmótstöðu og mögnun snúins aðgerðamagnara á mynd 27 sem er með  $A_{ol} = 50000$ ,  $Z_{in} = 4 \text{ (M}\Omega\text{)}$  og  $Z_{út} = 50 \text{ (}\Omega\text{)}$ ?



Mynd 27. Snúinn aðgerðamagnari (inverting op-amp).

$$Z_{in(I)} = R_i = 1(\text{k}\Omega)$$

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1(\text{k}\Omega)}{1(\text{k}\Omega) + 100(\text{k}\Omega)} = 0,001$$

$$Z_{út(I)} = \frac{U_{út}}{I_{út}} = \frac{Z_{út}}{(1 + B \cdot A_{ol})} = \frac{50}{(1 + 0,001 \cdot 50000)} = 980(\text{m}\Omega)$$

$$A_{cl(I)} = \frac{U_{út}}{U_{inn}} = -(-) \frac{R_f}{R_i} = (-) \frac{100000}{100} = -100$$

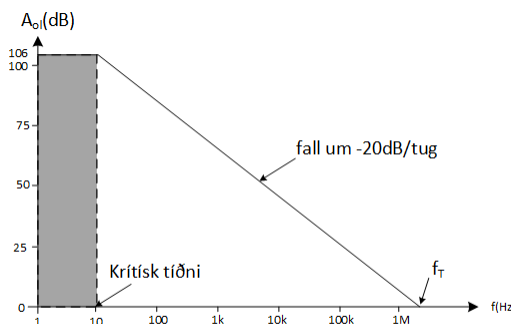
## Rafeindafræði 17. hefti – Aðgerðamagnarar -

### 35. Dæmi

1. Reiknaðu inn- og útgangsmótstöðu og mögnun ósnúins aðgerðamagnara á mynd 25 sem er með  $A_{ol} = 100000$ ,  $Z_{in} = 5 \text{ (M}\Omega\text{)}$ ,  $Z_{út} = 75 \text{ (}\Omega\text{)}$ ,  $R_i = 560 \text{ (}\Omega\text{)}$  og  $R_f = 82 \text{ (k}\Omega\text{)}$ ?
2. Hvernig ber saman inngang- og útgangsmótstöðu ósnúins magnara við inngangs- og útgangsmótstöðu aðgerðamagnarans sjálfs?
3. Minnkar eða eykst inngangsmótstaða magnara sem tengdur er sem spennufylgja (*voltage-follower*)?
4. Reiknaðu inn- og útgangsmótstöðu og mögnun snúins aðgerðamagnara á mynd 26 sem er með  $A_{ol} = 120000$ ,  $Z_{in} = 2 \text{ (M}\Omega\text{)}$ ,  $Z_{út} = 60 \text{ (}\Omega\text{)}$ ,  $R_i = 2 \text{ (k}\Omega\text{)}$  og  $R_f = 100 \text{ (k}\Omega\text{)}$ ?

### 36. Spennumögnun er tíðniháð (*Voltage Gain Is Frequency Dependent*)

Öll umræða um spennumögnun í þessum kafla er miðuð við millitíðnimögnun magnarans og talin vera óháð tíðni. Mögnun aðgerðamagnara er sögð ná frá 0 Hz (dc) að efri marktíðni ( $f_c$ ) magnarans þar sem mögnunin hefur fallið um -3dB frá millitíðnimögnuninni. Aðgerðamagnarar eru dc magnarar (engin þéttir skilur að magnarastig aðgerðamagnarans) og þess vegna er engin neðri marktíðni ( $f_n$ ). Þetta þýðir að millitíðni aðgerðamagnarans nær að tíðninni 0 Hz og dc spennur eru magnaðar eins og millitíðnir. Þetta sést á mynd 28.



Mynd 28. Tíðnisvörðun aðgerðamagnara (*Bode plot*).

Framleiðendur gefa upp línurit yfir mögnu tíðnisvörðunar (*Bode plot*) fyrir aðgerðamagnara. Þau líta út eins og mynd 28. Takið eftir því að á því línuriti fellur mögnunin um -20 dB á tíund (*decade*) eða (-6 dB á áttund (*octave*)). Millitíðnimögnun aðgerðamagnarans  $A_{ol}$  er 200000 eða 106 dB og efri marktíðnin  $f_c$  er um 10 Hz.

### **37. 3 dB bandbreidd aðgerðamagnara (*Open-Loop Bandwidth*)**

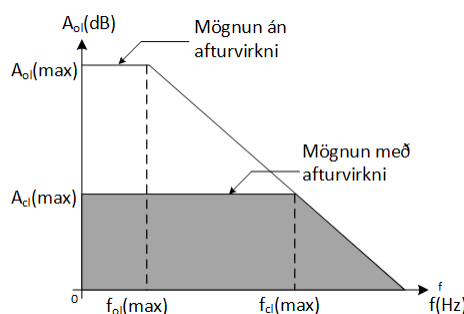
Bandbreidd magnara liggur milli efri- og neðri marktíðnar eða þar sem mögnun millitíðnar hefur minnkað um -3 dB. Þetta þýðir

$$B_W = f_e - f_n$$

Þar sem neðri marktíðni  $f_n$  fyrir aðgerðamagnara er 0 verður bandbreiddin

$$B_W = f_e$$

Hægt er að finna bandbreidd aðgerðamagnara með afturvirkni á línriti. Það eina sem þarf að gera er að finna mögnun snúins eða ósnúins aðgerðamagnara með afturvirkni og draga svo mögnunarlínulínu eins og sýnt er á mynd 29 og lesa tíðnina sem þá er um það bil bandbreiddin.



*Mynd 29. Tíðnisvörðun aðgerðamagnara með afturvirkni (dekket svæði).*