

6 – Operationele versterkers

Ing. Patrick Van Houtven

Operationele versterkers

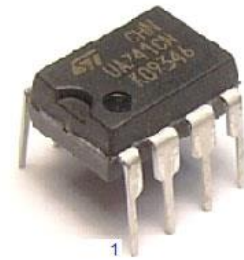
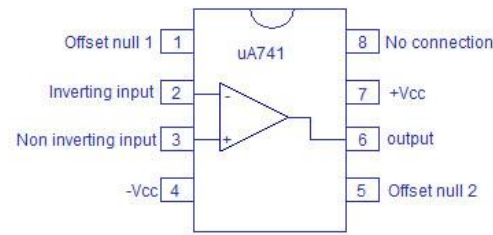
Outline

- Introductie tot opamps
- Verschilversterker
- Datagegevens opamp
- Negatieve terugkoppeling
- Opampconfiguratie
- Opamp impedantie en ruis

Doelstellingen

- Je kan de basisopamp en zijn karakteristieken beschrijven
- Je kent het werkingsprincipe van een verschilverterker.
- Je kan een aantal opampparameters verklaren met je eigen woorden
- Je kan drie opampconfiguraties analyseren
- Je kan de impedanties van de drie besproken opampconfiguraties beschrijven

6-1 Introductie



uA741 opamp Pinout and External appearance

Van waar de benaming operationeel?

- De eerste opamps (schakelingen met buizen) werden gebruikt voor het uitvoeren van wiskundige bewerkingen zoals optellen, aftrekken, integratie, differentiatie => vandaar de term operationeel
- Vandaag zijn opamps lineaire IC's en betrekkelijk goedkoop verkrijgbaar

Wat is belangrijk?

- Een basisopamp en zijn karakteristieken kunnen beschrijven met eigen woorden
- Herkennen van een opampsymbool
- Herkennen van de terminals (aansluitklemmen) van de opamps aan het IC)
- Een ideale opamp kunnen beschrijven
- Een praktische opamp kunnen beschrijven

6-1 Introductie

Symbool en aansluitklemmen (Symbol and terminals) (blz. 308)

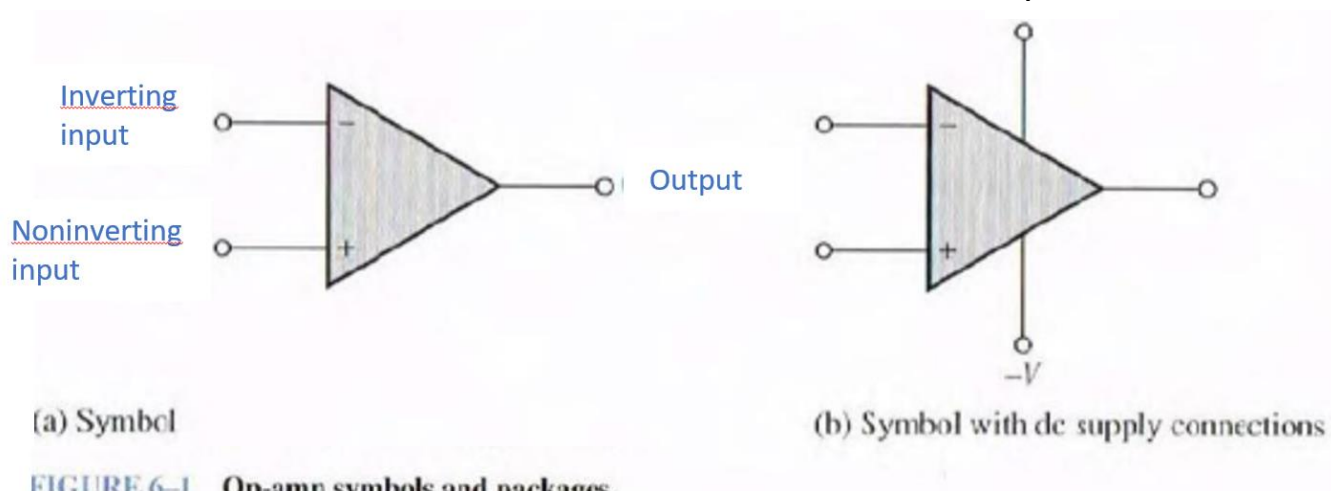


FIGURE 6-1 Op-amp symbols and packages.

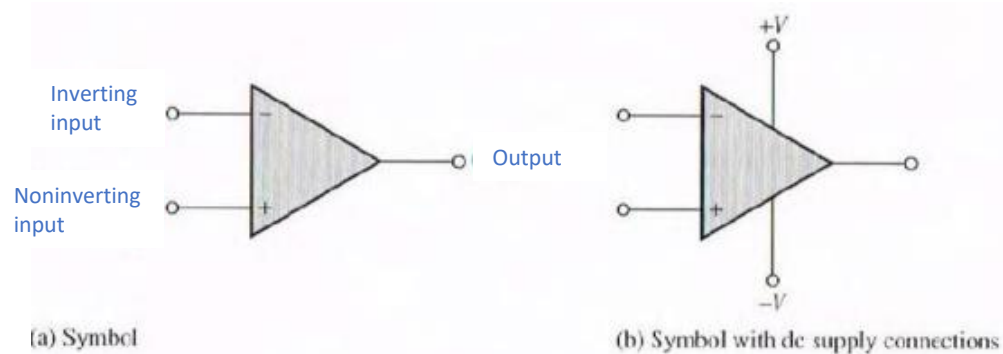
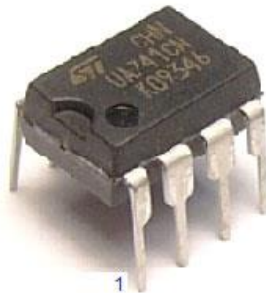
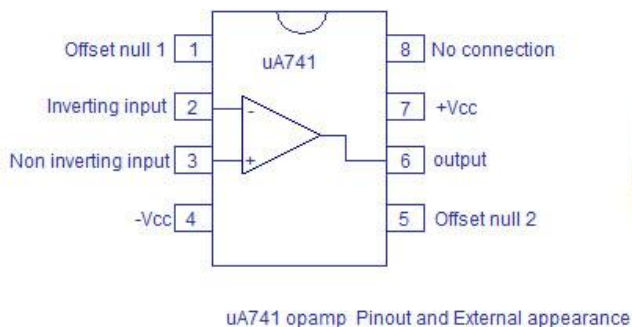
- Standaard symbool opamp (fig.6-1(a))
 - 2 ingangen :
 - inverterende (-) ingang
 - niet-inverterende (+) ingang
 - 1 uitgang (output)
 - Typische opamp werkt met 2 voedingsspanningen (fig. 6-1(b))
 - een positieve voedingsspanning $+V$
 - een negatieve voedingsspanning $-V$.

Dikwijls worden de voedingsspanningen in het schema weggelaten om zo een duidelijker weergave van de schakeling te bekomen. Maar bij simulatie of opbouw van de schakeling moeten deze voedingen steeds aanwezig zijn. Anders werkt de schakeling niet!

6-1 Introductie

Symbool en aansluitklemmen (Symbol and terminals) (blz. 308)

- Fig. 6-1(c) geeft enkele typische behuizingen weer van de opamp
 - DIP : dual in line behuizing
 - SMT : surface –mount technology
 - Aansluitklem 1 wordt aangegeven met een inkeping (notch) op het IC.



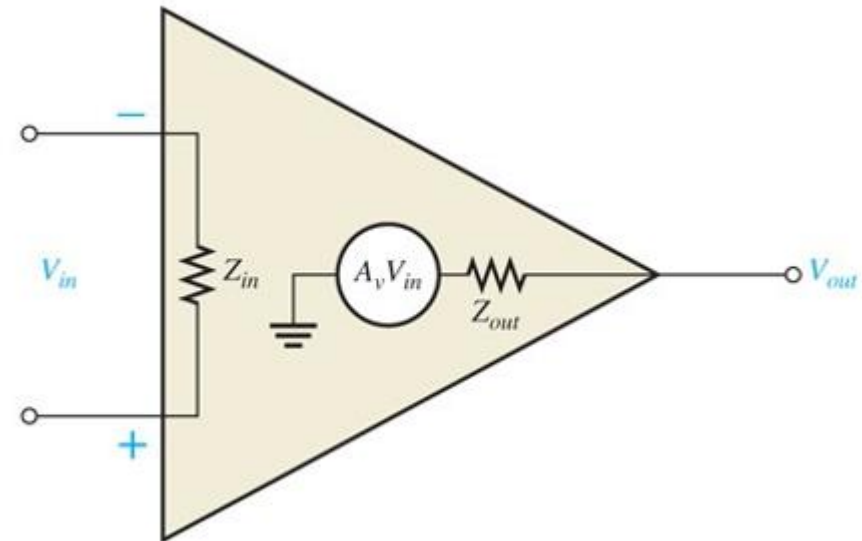
(c) Typical packages. Pin 1 is indicated by a notch or dot on dual-in-line (DIP) and surface-mount technology (SMT) packages, as shown.

FIGURE 6-1 Op-amp symbols and packages.

6-1 Introductie

De werkelijke (practical) opamp) (blz. 309)

- Geen enkele opamp is ideaal. Iedere opamp heeft zijn beperkingen.
 - Uitgangsspanning (peak-to-peak waarde) is steeds lager dan het verschil tussen de aangelegde voedingsspanningen,
 - Maximale stroom is begrenst, ...
 - Doch in veel gevallen kunnen we bij analyses een werkelijke opamp beschouwen als ideale opamp.
- Eigenschappen van een werkelijke opamp zijn :
 - een **hoge spanningsversterking** (100 000 of meer)
 - een **hoge ingangsimpedantie** (1 M Ω of meer)
 - **Lage uitgangsimpedantie** (300 Ω of minder)
 - Een **brede bandbreedte**



(b) Practical op-amp representation

Fig. 6-3

Section 6-1 checkup

1. Welke zijn de aansluitterminals van een basic-opamp?
2. Beschrijf enkele van de eigenschappen van een werkelijke (practical) opamp.



Waarom is het belangrijk om het principe van verschilversterking te begrijpen?

- Een opamp bestaat uit ten minste één verschilversterkerschakeling. Dit is de ingangstrap van een opamp.
- De verschilversterker is fundamenteel voor de interne werking van de opamp.

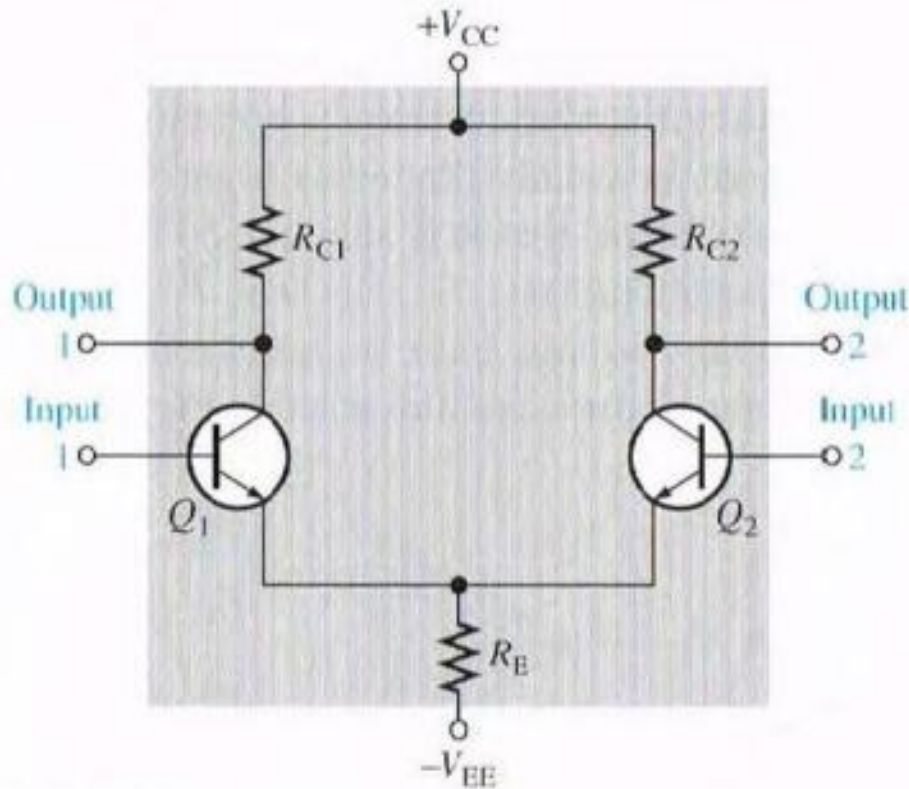
Wat is belangrijk?

- Je kan het werkingsprincipe van een verschilversterker omschrijven
- Je kan de “single ended input operation” verklaren
- Je kan de “differential-input operation” verklaren
- Je kan het begrip “common-mode operation” verklaren
- Je kan het begrip common-mode rejection ratio definiëren
- Je kan het nut aangeven waarvoor verschilversterking wordt gebruikt.

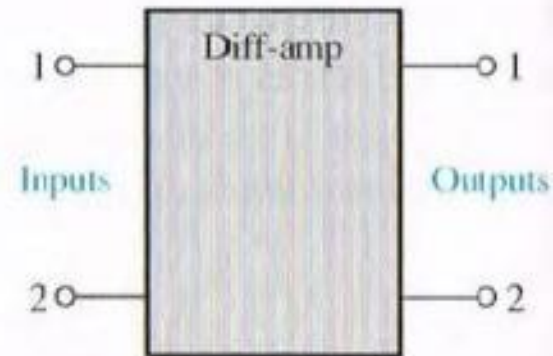
6-2 De verschilversterker (the differential amplifier)

Basic differential amplifier (diff-amp of verschilversterker)

- Fig. 6-4 toont het bloksymbool en een basic verschilversterker (diff-amp)
- De diff-amp die in een opamp wordt gebruikt levert een hoge spanningsversterking en een hoge common-mode rejection (definitie zie later in deze sectie)



(a) Circuit

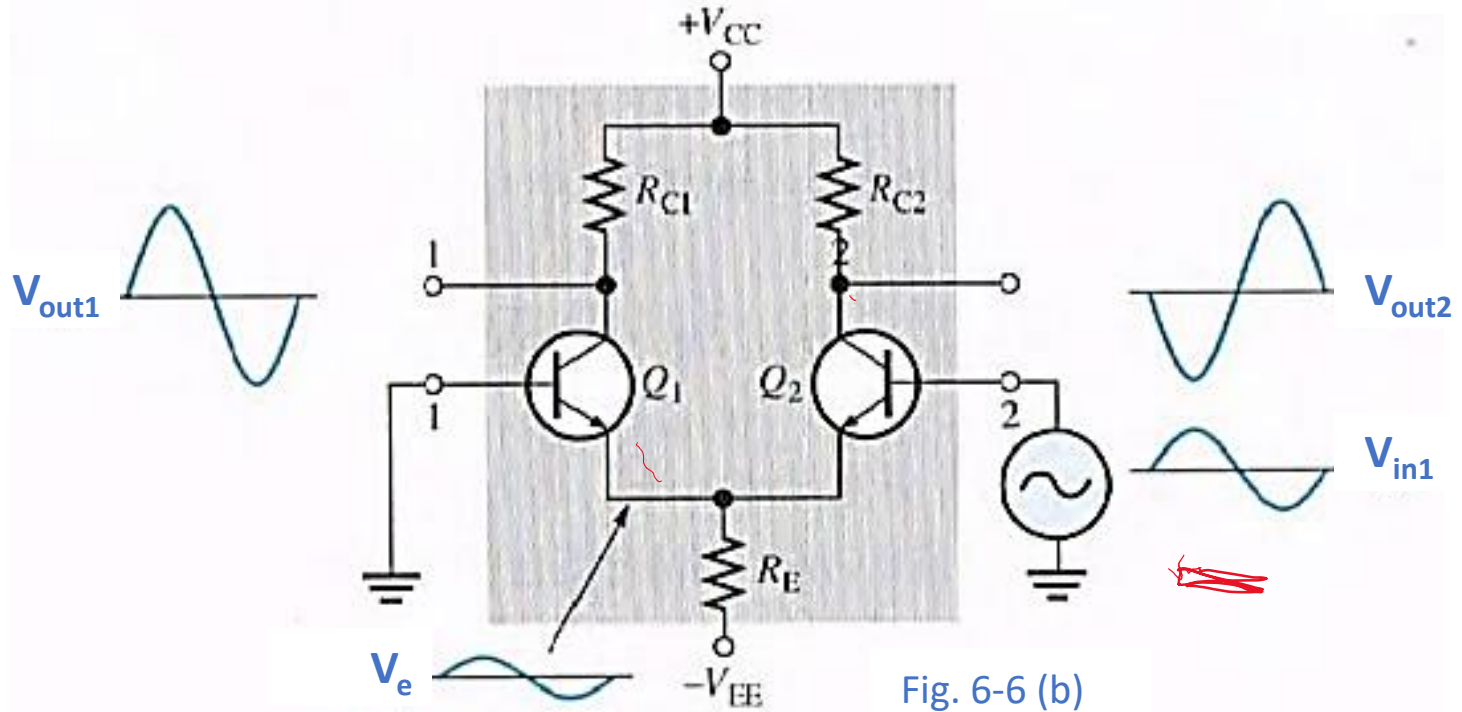


(b) Block symbol

FIGURE 6-4 Basic differential amplifier.

6-2 De verschilversterker (the differential amplifier)

V_{in} aan Q2



- Fig 6-6 (b) : Aan Q2 ligt het ingangssignaal en Q1 is verbonden met massa
 - Aan uitgang Q2 verschijnt het geïnverteerd versterkt ingangssignaal
 - Aan uitgang Q1 verschijnt een versterkt ingangssignaal in fase met het ingangssignaal
- Hoe komt dit signaal aan uitgang Q1?

De emitters van beide transistoren zijn met elkaar verbonden. Hierdoor fungeert nu Q1 als GBS (common Base) met als gevolg dat het ingangssignaal door Q1 wordt versterkt maar niet geïnverteerd

6-2 De verschilversterker (the differential amplifier)

- **Differential Input**

- Twee tegengesteld gepolariseerde signalen (out-of-phase) worden ieder aan een ingang aangelgd
- Deze manier van aansluiten wordt ook double-ended genoemd.

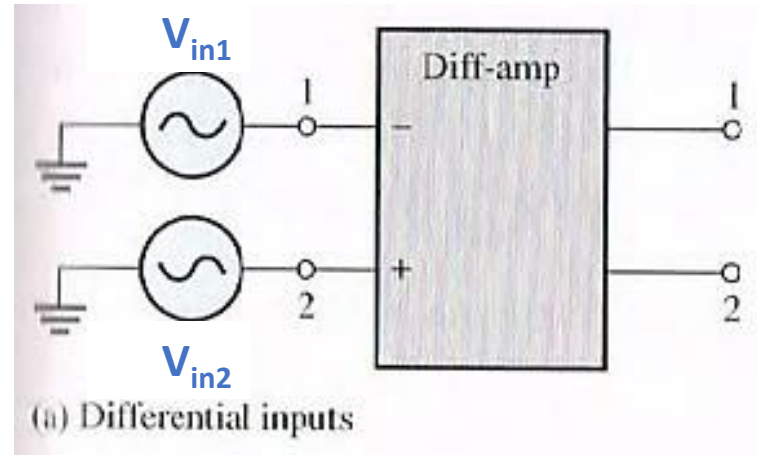


Fig. 6-7

Enkel ingangssignaal V_{in1}

- Op uitgang 1 verschijnt het versterkt geïnverteerd signaal van V_{in1}
- Op uitgang 2 verschijnt het versterkt niet-geïnverteerd signaal van V_{in1}

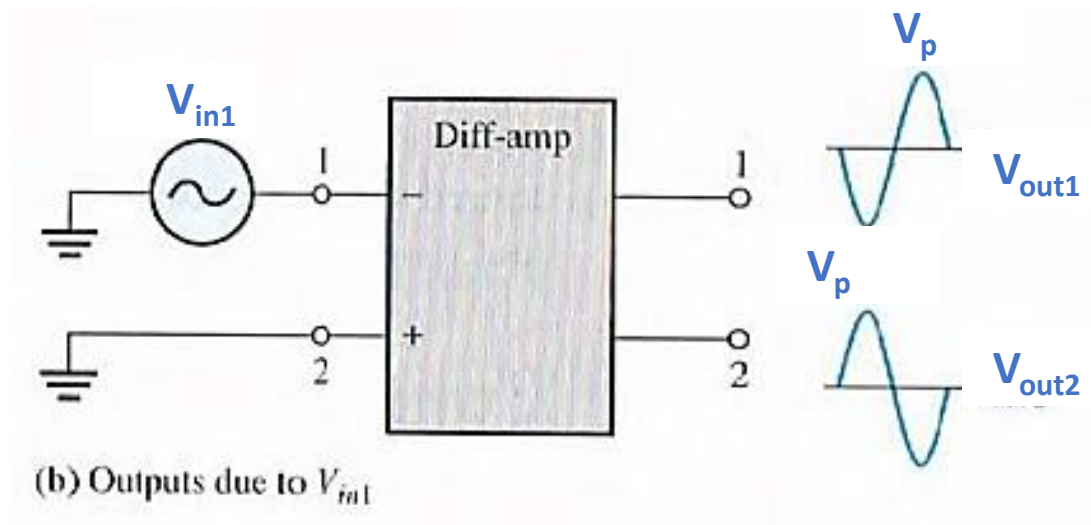


Fig. 6-7

Enkel ingangssignaal V_{in2}

- Op uitgang 1 verschijnt het versterkt niet geïnverteerd signaal van V_{in2}
- Op uitgang 2 verschijnt het versterkt geïnverteerd signaal van V_{in2}

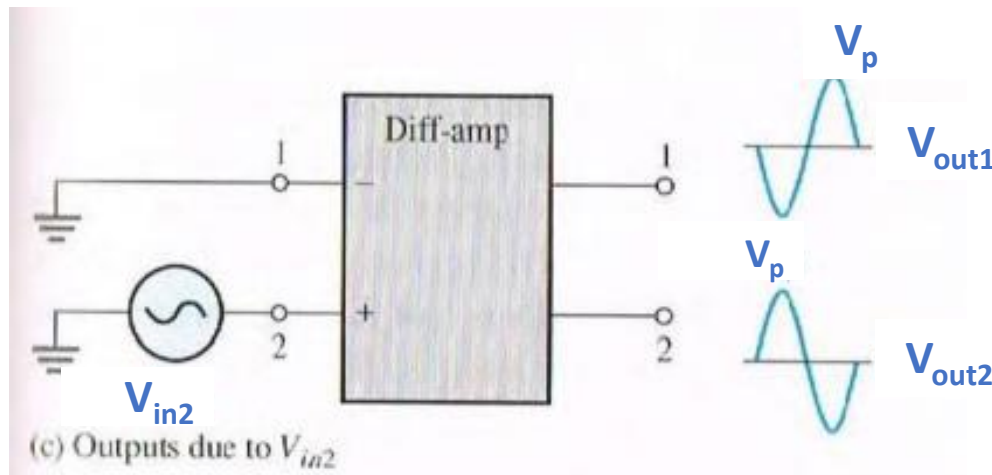


Fig. 6-7

Zowel ingangssignaal V_{in1} , als V_{in2}

- Zowel het versterkt signaal van V_{in1} als van V_{in2} verschijnen aan beide uitgangen.
 - Beide outputsignalen die per output verschijnen versterken elkaar zodat je aan beide uitgangen een amplitude $2V_p$ verkrijgt. Merk op dat beide uitgangen in tegenfase zijn.
 - Op output 1 : $V_{out1} = V_{in2} - V_{in1}$
 - Op output 2 : $V_{out2} = V_{in1} - V_{in2}$
- => spreekt van verschilsignaal of differential operation

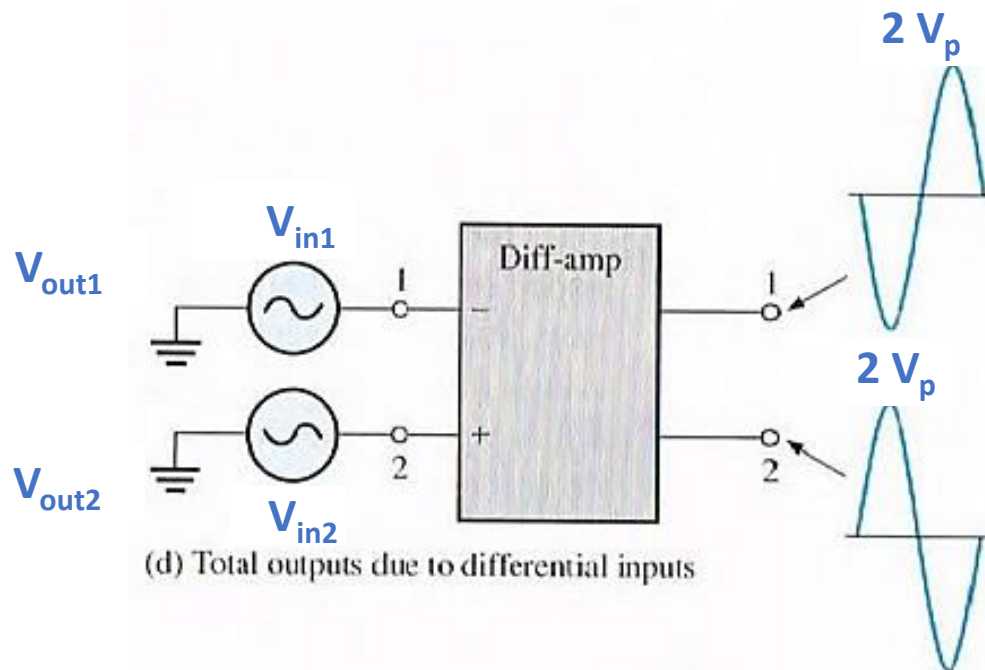


Fig. 6-7

6-2 De verschilversterker (the differential amplifier)

- **Common-mode input**

- Op beide ingangen hetzelfde signaal aanleggen (**common-mode** conditie) => aan de uitgang verschijnt er niets meer. (voor werking vergelijk met het voorgaande door eerst ieder signaal afzonderlijk te bekijken)
- Deze actie wordt common-mode rejection genoemd. Dit betekent dat ongewenste (stoor)-signalen, zoals bv. de 50 Hz-brom, die aan beide ingangen verschijnt, niet terug te vinden zijn aan de uitgang.

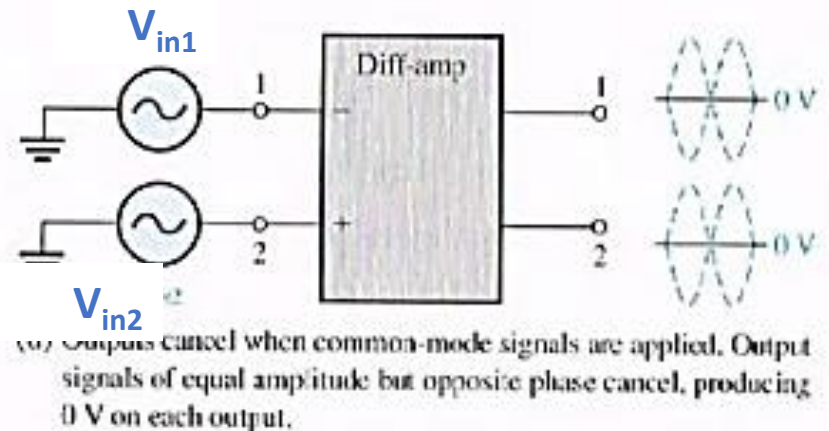
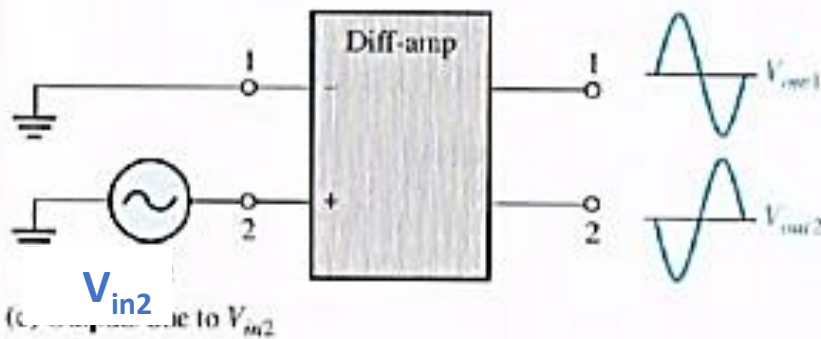
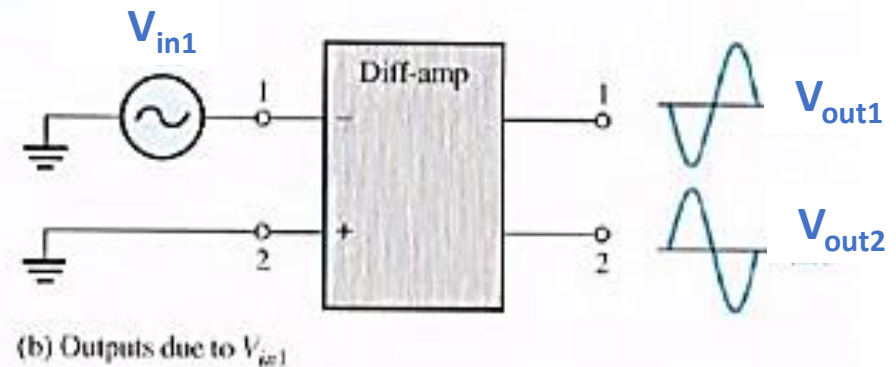
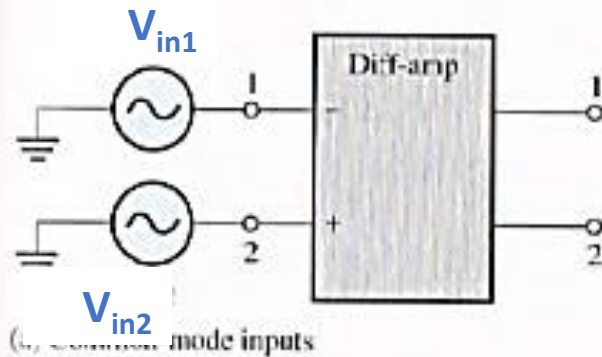


Fig. 6-8 Common-mode operation of a differential amplifier.

Common-Mode Rejection Ratio

- Gewenste signalen die verschijnen aan 1 ingang of in tegenfase aan de twee ingangen worden versterkt
- Ongewenste signalen (ruis) die verschijnen aan beide ingangen in dezelfde vorm worden onderdrukt
- De **common-mode rejection ratio (CMRR)** is de meting die aangeeft in hoeverre de common-mode signalen (ongewenste signalen die in dezelfde vorm aan beide ingangen verschijnen) worden onderdrukt.

Ideaal:

- Een verschilversterker levert een hoge versterking voor het gewenste signaal (single-ended) en nul versterking voor common-mode signalen.

Praktisch:

- Er verschijnt nog steeds een gedeelte van het common-mode signaal op de uitgang.
- Hoe groter de versterking ($A_{v(d)}$) van het gewenste signaal is ten opzichte van het common-mode signaal (A_{cm}), hoe beter de verschilversterker (diff-amp). Deze verhouding wordt weergegeven via de common-mode rejection ratio of CMRR.

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

$$CMRR' = 20\log\left(\frac{A_{v(d)}}{A_{cm}}\right)$$

EXAMPLE 6-1

A certain diff-amp has a differential voltage gain of 2000 and a common-mode gain of 0.2. Determine the CMRR and express it in decibels.

SOLUTION

$A_{v(d)} = 2000$, and $A_{cm} = 0.2$. Therefore,

$$\text{CMRR} = \frac{A_{v(d)}}{A_{cm}} = \frac{2000}{0.2} = 10,000$$

Expressed in dB,

$$\text{CMRR}' = 20 \log(10,000) = 80 \text{ dB}$$

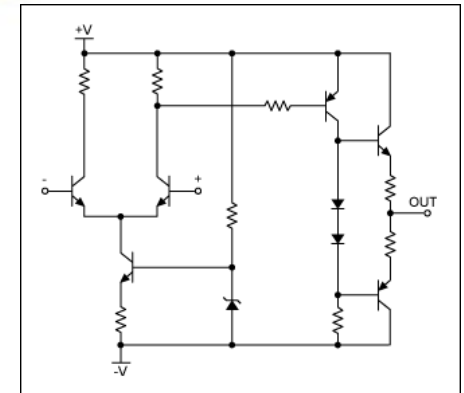
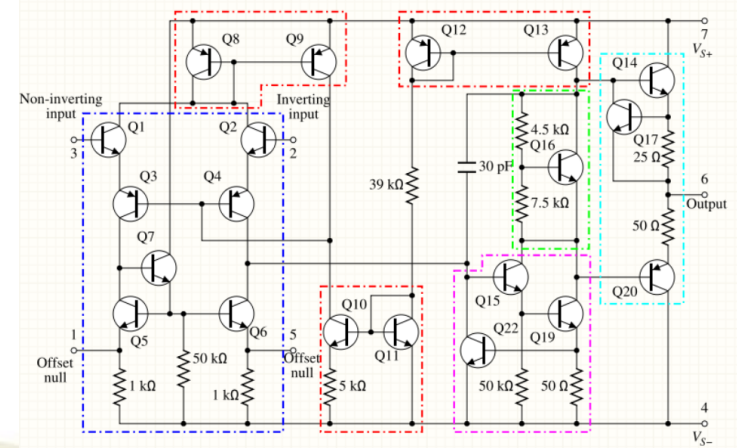
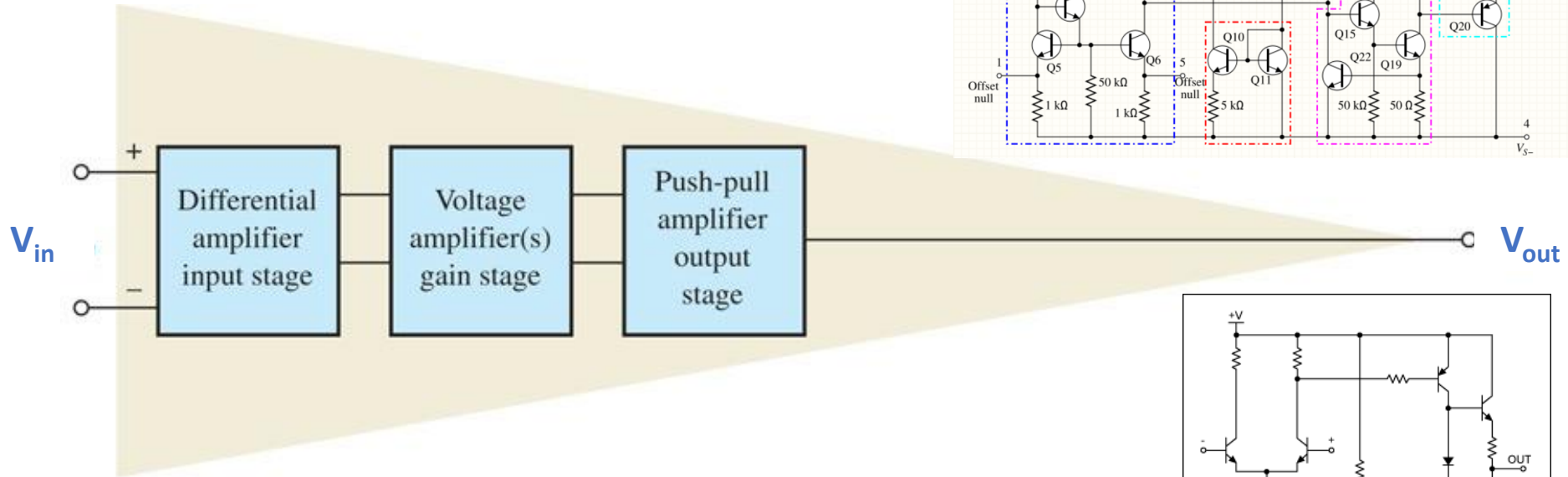
PRACTICE EXERCISE*

Determine the CMRR and express it in dB for an amplifier with a differential voltage gain of 8500 and a common-mode gain of 0.25.

*Answers are at the end of the chapter.

6-2 De verschilversterker (the differential amplifier)

Intern blokdiagram van een opamp (blz. 316)



- Een typische opamp bestaat uit 3 verschillende versterkerschakelingen:
 - Verschilversterker (differential amplifier): Dit is de ingangsschakeling van de opamp en bestaat uit twee ingangen en versterkt de verschilspanning van deze twee ingangen
 - Spanningsversterker (voltage amplifier): Meestal een klas A versterker om bijkomende spanningsversterking te bekomen. Sommige opamps bevatten meer dan één klas A versterker.
 - Een push-pull klas B versterker die gebruikt wordt als uitgangsschakeling. Deze levert extra stroom aan de uitgang en zorgt voor een lage uitgangsimpedantie van de opamp.

Section 6-2 checkup

1. **Wat is het verschil tussen differential en single-ended ingangen?**
2. **Definieer common-mode rejection**
3. **Stel een bepaalde waarde van differential gain (verschilversterking). Levert dan een hogere CMRR-waarde een hogere of lagere common-mode versterking (gain)?**



6-4 Negatieve terugkoppeling (negative feedback blz. 323)

Wat is negatieve terugkoppeling?

- Negatieve terugkoppeling (feedback) is het proces waarbij een gedeelte van de uitgangsspanning van een versterker in tegenfase wordt teruggekoppeld naar de ingang zodat de teruggekoppelde spanning wordt afgetrokken van de ingangsspanning

Wat is belangrijk?

- Je kan de effecten van negatieve terugkoppeling bij opamps omschrijven
- Je kan aantonen waar negatieve terugkoppeling wordt gebruikt.

Fig. 6-18 toont het principe van negatieve terugkoppeling.

- De inverterende ingang van de opamp zorgt ervoor dat het terugkoppelsignaal 180° in fase verdraaid wordt.
- Opamp heeft een zeer hoge inwendige versterking (open-lus versterking) en versterkt het verschil tussen de aangelegde spanningen aan de inverterende en niet-inverterende ingang.
- Een zeer kleine hoeveelheid verschilsignaal is alles wat de opamp nodig heeft om het vereiste uitgangssignaal te bekomen.

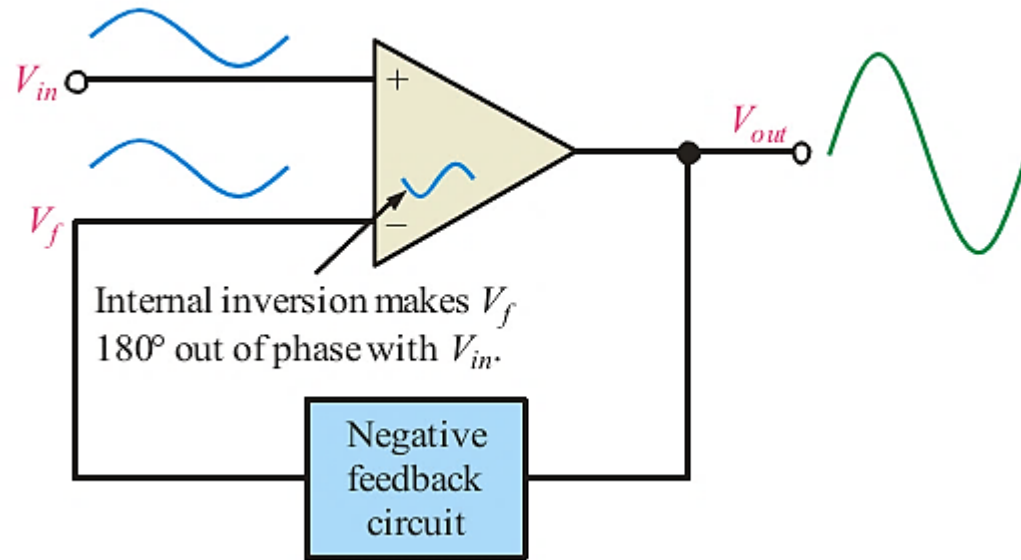


FIGURE 6-18 Illustration of negative feedback.

Wanneer negatieve terugkoppeling aanwezig is, zijn de spanningspotentialen op de inverterende- en niet-inverterende ingangen nagenoeg gelijk. Dit gegeven kan je vooruithelpen in talloze opampschakelingen aangaande welk signaal je kan verwachten.

Principewerking:

Stel op de niet-inverterende ingang (+-ingang) wordt 1,0 V aangelegd.

- Wordt 100 000 keer versterkt (open-loop gain) => uitgang bereikt zijn verzadigingswaarde ($+V_{\max}$).
- Als het feedbacksignaal de 1 V bereikt, blijft er aan de ingang niets meer over om te versterken => feedbacksignaal probeert de waarde van het ingangssignaal te bereiken, maar zal hierin niet slagen)
- Op oscilloscoop kunnen beide ingangssignalen even groot lijken, maar er zal steeds een klein verschil tussen de twee aanwezig blijven.

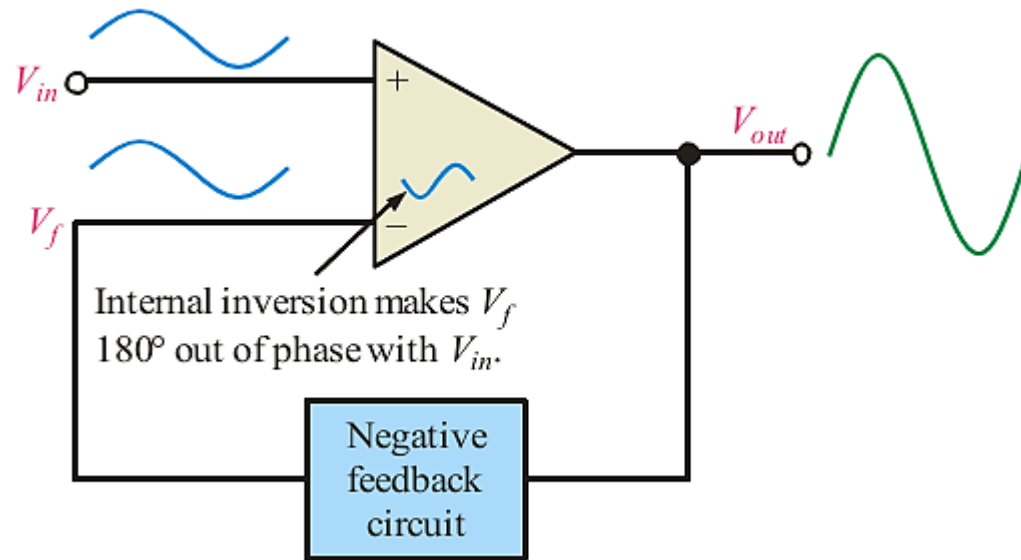


FIGURE 6-18 Illustration of negative feedback.

Stel dat er iets gebeurt waardoor de interne versterking van de opamp naar beneden gaat.

- Hierdoor zal de uitgangsspanning met een bepaalde waarde dalen => kleinere spanning teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang => groter verschil tussen inverterende en niet-inverterende ingangen => terug meer spanning aan de uitgang zodat het verlies door vermindering van inwendige versterking is gecompenseerd.
- Deze verandering in spanning is zodanig klein dat ze meestal niet meetbaar is.
- Gevolg: negatieve tegenkoppeling zorgt ervoor dat iedere versterkingsvariatie onmiddellijk gecompenseerd wordt => wordt stabiele voorspelbare uitgang bekomen

6-4 Negatieve terugkoppeling

Waarvoor wordt negatieve terugkoppeling gebruikt

Stel $V_{in} = 1 \text{ mV}$ en $A_{ol} = 100\,000$

$\Rightarrow V_{in} \cdot A_{ol} = 1 \text{ mV} \cdot 100\,000 = 100 \text{ V}$

\Rightarrow Een klein verschil aan de ingang kan de opamp sturen naar één van zijn verzadigde outputtoestanden ($+V_{max}$ of $-V_{max}$).

- Opamps die op deze manier werken (zonder negatieve tegenkoppeling) zijn in het algemeen beperkt in het functioneren tot comparatortoepassingen.
- Met negatieve terugkoppeling kan A_{ol} gereduceerd worden en gecontroleerd worden zodat een stabiele spanningsversterking wordt bekomen.
- Negatieve terugkoppeling zorgt ook voor controle van in- en uitgangsimpedantie en de bandbreedte van de versterker.

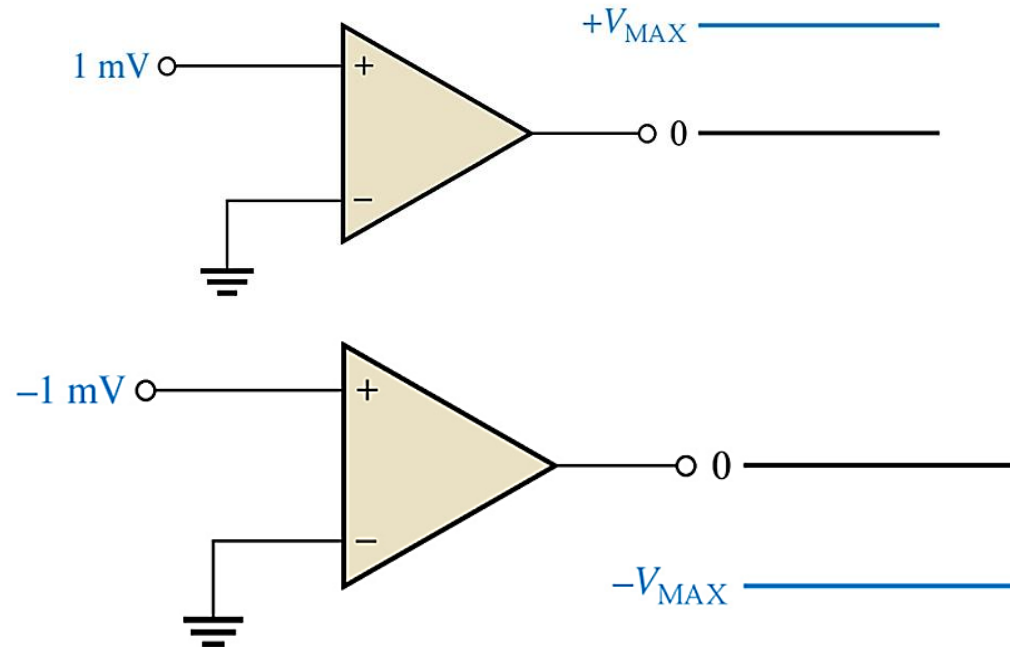


FIGURE 6-19 Without negative feedback, an extremely small difference in the two input voltages drives the op-amp to its output limits and it becomes nonlinear.

Tabel 6-2 geeft een samenvatting aangaande de algemene effecten van negatieve terugkoppeling op de werking van de opamp.

TABLE 6-2				
	VOLTAGE GAIN	INPUT Z	OUTPUT Z	BANDWIDTH
Without negative feedback	A_{ol} is too high for linear amplifier applications	Relatively high (see Table 6-1)	Relatively low	Relatively narrow (because the gain is so high)
With negative feedback	A_{cl} is set to desired value by the feedback network	Can be increased or reduced to a desired value depending on type of circuit	Can be reduced to a desired value	Significantly wider

Section 6-4 checkup

1. **Wat zijn de voordelen van negatieve terugkoppeling (feedback) in een opampschakeling?**
2. **Waarom is het noodzakelijk om de openlusversterking A_{ol} van een opamp te verkleinen?**
3. **Wanneer je opampschakeling moet nakijken op fouten, wat verwacht je te zien aan de ingangsterminals?**



6-5 Opampconfiguratie met negatieve terugkoppeling (blz 325)

Waarover gaat het?

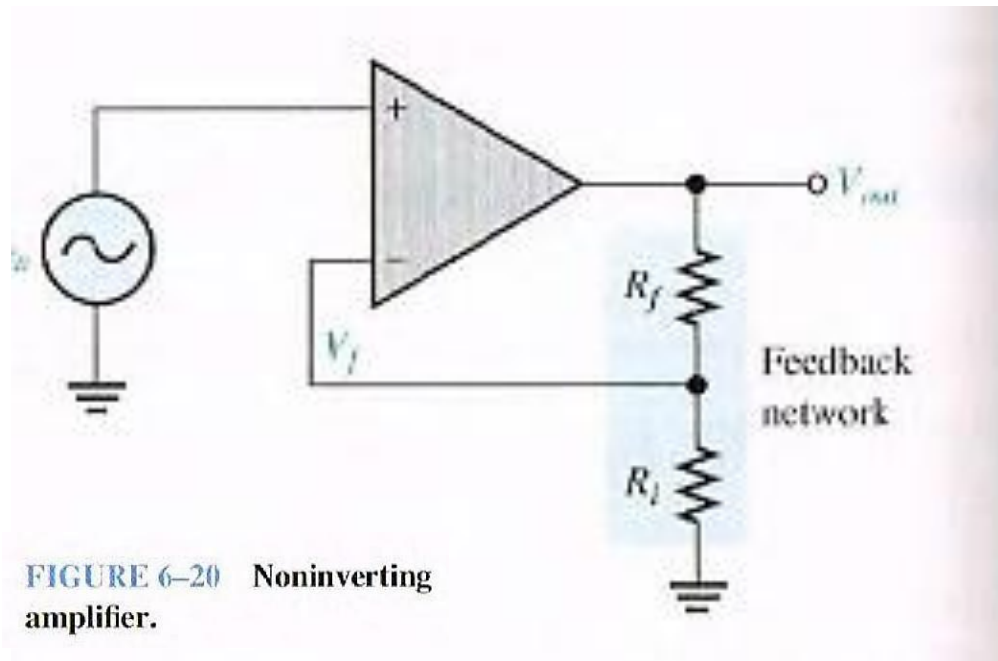
- In dit hoofdstuk worden 3 methoden besproken waarbij negatieve terugkoppeling wordt gebruikt om de versterkingsfactor te stabiliseren en de frequentieresponse te laten stijgen.
- De bekomen stabiele versterkingsfactor is meestal veel kleiner dan de openlusversterking en onafhankelijk van deze openlusversterking.

Wat is belangrijk?

- Je kan de niet-inverterende versterkerconfiguratie herkennen.
- Je kan de spanningsversterking van een niet-inverterende spanningsversterker bepalen.
- Je kan de spanningsvolgerconfiguratie herkennen.
- Je kan de inverterende versterkerschakeling herkennen.
- Je kan de spanningsversterking van een inverterende versterker bepalen.

Closed-loop Voltage gain A_{cl} (gesloten lus spanningsversterking)

- A_{cl} is de spanningsversterking van een opamp met negatieve terugkoppeling
- Configuratie bestaat uit een opamp en een extern netwerk dat de uitgang met de inverterende ingang verbind.



Niet-inverterende versterker (non inverting amplifier)

- Ingangssignaal aan niet-inverterende ingang (+)
- Een deel van de uitgang wordt aangelegd aan de inverterende ingang (-), daarom negatieve terugkoppeling genoemd
- De **verzwakkingsfactor**, die het gedeelte bepaald wat van de uitgangsspanning wordt teruggekoppeld, wordt **B** genoemd.
- De spanningswaarde die overblijft; afkomstig van de uitgangsspanning, wordt V_f genoemd.

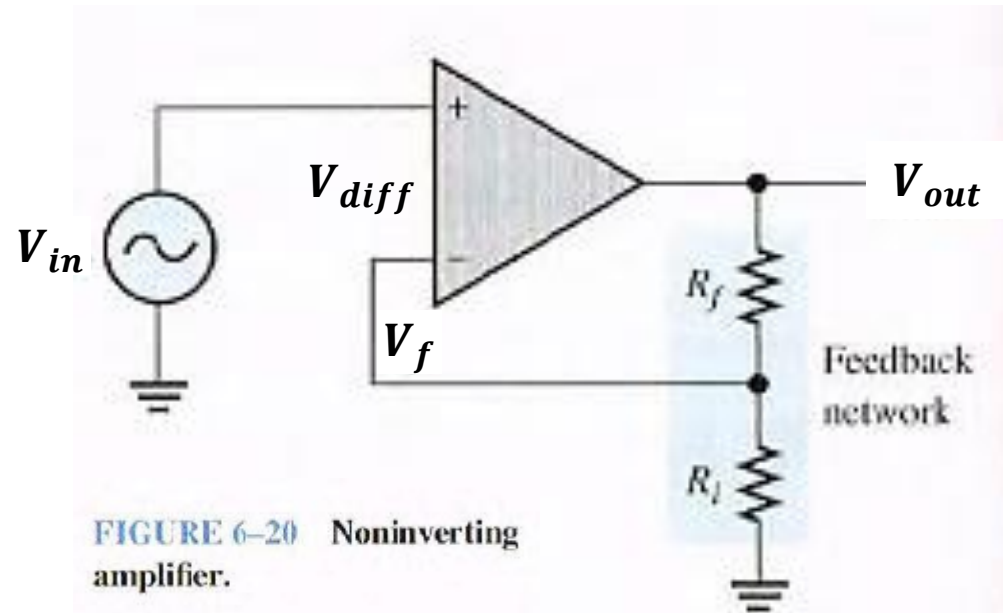
$$V_f = B \cdot V_{out}$$

- **Verschilspanning** V_{diff} die gemeten wordt tussen de twee ingangen van de opamp kan geschreven worden als:

$$V_{diff} = V_{in} - V_f$$

- Aangezien V_{diff} zeer klein is, zijn V_{in} en V_f praktisch even groot zodat bij benadering kan geschreven worden:

$$V_{in} = B \cdot V_{out}$$



- Omvorming : $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{B}$
- $A_{cl(NI)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{B}$

6-5 Opampconfiguratie met negatieve terugkoppeling

- De terugkoppelsectie wordt gevormd door

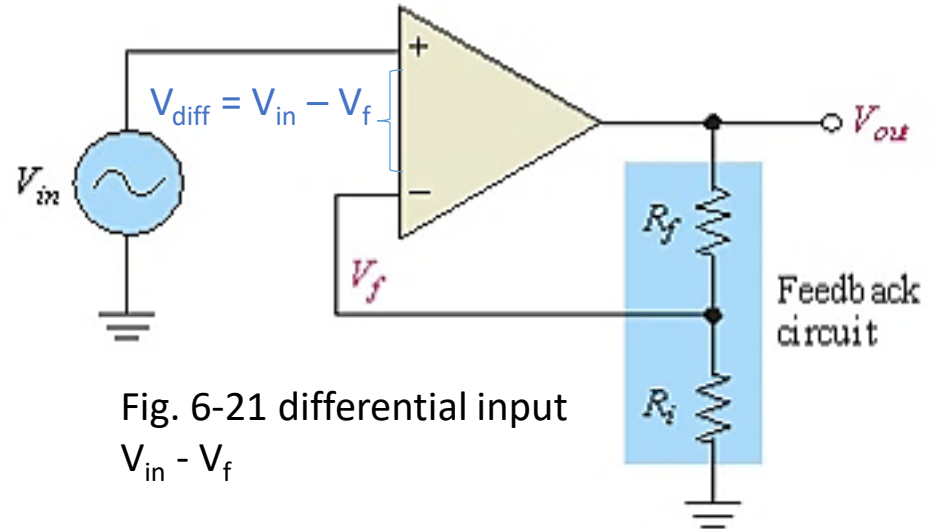
R_f en R_i . Samen vormen ze een spanningsdeler. Het gedeelte van de uitgangsspanning dat teruggekoppeld wordt naar de inverterende ingang is als volgt te vinden:

$$V_{in} \cong BV_{out} \cong \left(\frac{R_i}{R_i + R_f} \right) V_{out}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{R_i + R_f}{R_i} \right)$$

$$A_{cl} = \frac{R_f}{R_i} + 1$$

De gesloten lus versterking van een niet-inverterende versterker kan bijgevolg ingesteld worden aan de hand van de weerstandswaarden R_f en R_i . De formule is gebaseerd op het feit dat de open lus versterking zeer hoog is in vergelijking met de weerstandsverhouding R_f/R_i .



In zeldzame gevallen wanneer een meer precieze berekening noodzakelijk is voor de versterking:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{A_{ol}}{1 + A_{ol}B} \right)$$

$$A_{cl(NI)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{A_{ol}}{1 + A_{ol}B} \right)$$

EXAMPLE 6-5

Determine the closed-loop voltage gain of the amplifier in Figure 6-22.

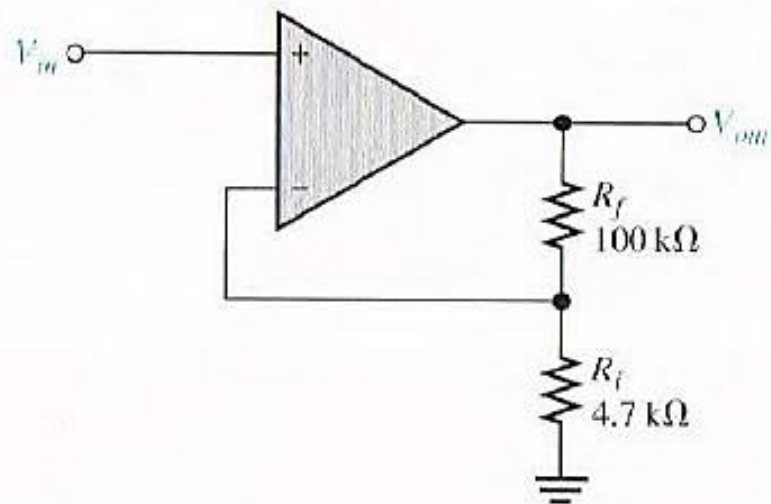


FIGURE 6-22

SOLUTION

This is a noninverting op-amp configuration. Therefore, the closed-loop voltage gain is

$$A_{cl(NI)} = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{100\text{ k}\Omega}{4.7\text{ k}\Omega} + 1 = 22.3$$

PRACTICE EXERCISE

If R_f in Figure 6-22 is increased to $150\text{ k}\Omega$, determine the closed-loop gain.

Spanningsvolger (voltage follower)

- Spanningsvolger is een speciale situatie van de niet-inverterende versterkerconfiguratie. (zie fig. 6-23)
- Kenmerken voor spanningsvolger:
 - $R_f = 0 \Omega$ (of kortsluiting) en $R_i = \infty$ (of open keten)

- $A_{cl} = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{0}{\infty} + 1 \cong 1$

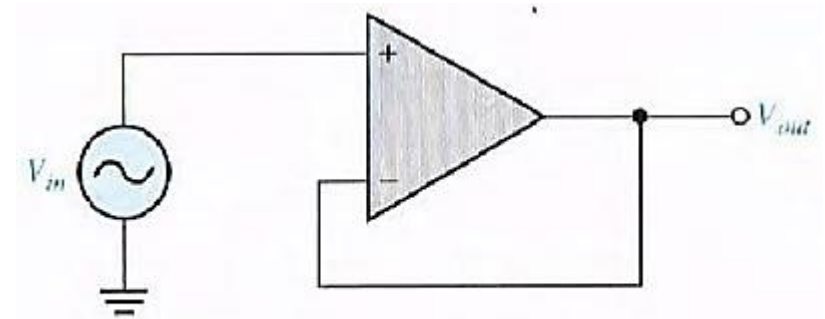


FIGURE 6-23 Op-amp voltage-follower.

Inverterende versterker (inverting amplifier)

- Fig. 6-24 schakeling inverterende versterker
- Ingangssignaal wordt aangelegd via de ingangsweerstand R_i aan de inverterende ingang.
- De uitgang wordt teruggekoppeld via de feedbackweerstand R_f naar de niet-inverterende ingang.

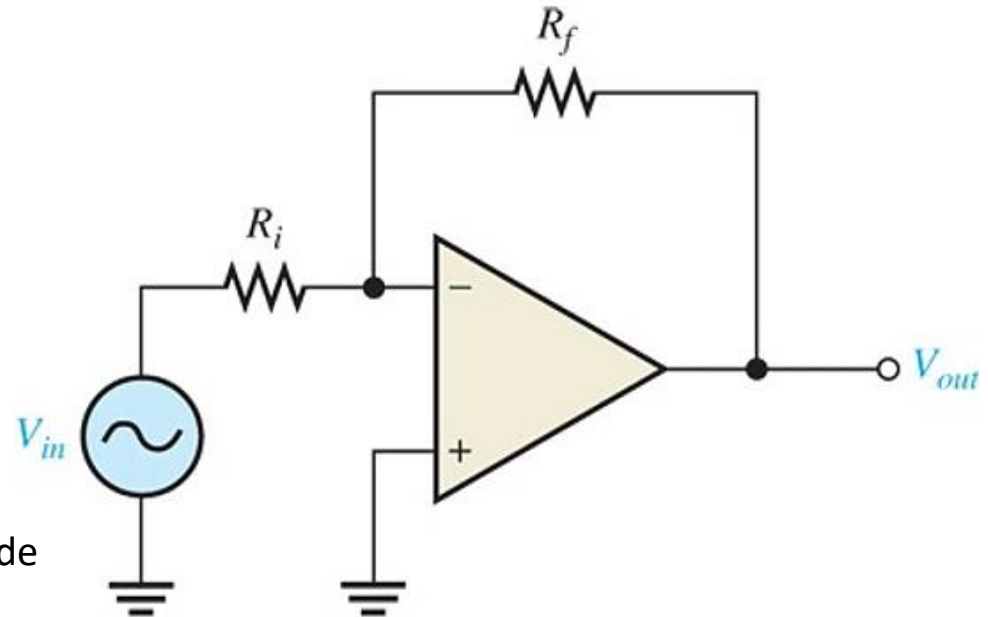


FIGURE 6-24 Inverting amplifier.

Inverterende versterker (inverting amplifier)

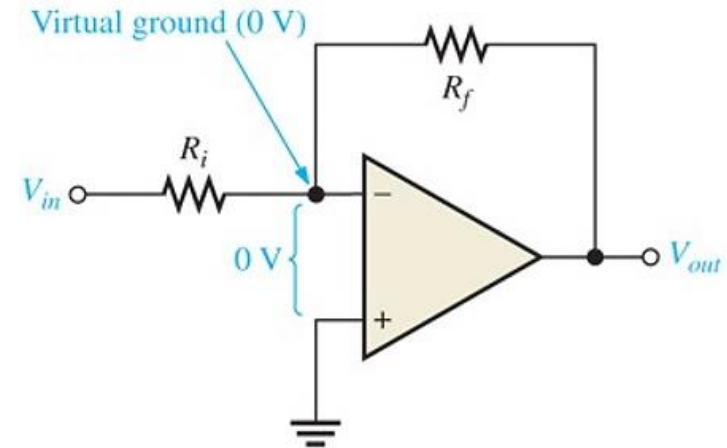
- Als we de opamp ideaal veronderstellen vloeit er geen stroom door de inverterende ingang vermits de ingangsimpedantie oneindig is. Bij een praktische opamp is in veel gevallen de stroom die door de inverterende ingang vloeit verwaarloosbaar ten opzichte van de stroom die door R_i en R_f vloeien $\Rightarrow I_{in} = I_f$
- We weten uit het voorgaande dat de spanning op de inverterende- en niet-inverterende ingang nagenoeg gelijk is. Vermits de niet-inverterende ingang aan massa ligt is de spanning op de inverterende ingang ook nagenoeg gelijk aan het massapotentiaal. (spreekt van virtueel massapunt) $\Rightarrow V_{in}$ staat over R_i en V_{out} staat over R_f . Dit geeft:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_i} \approx I_f = -\frac{V_{out}}{R_f} \Rightarrow \frac{V_{in}}{R_i} = -\frac{V_{out}}{R_f}$$

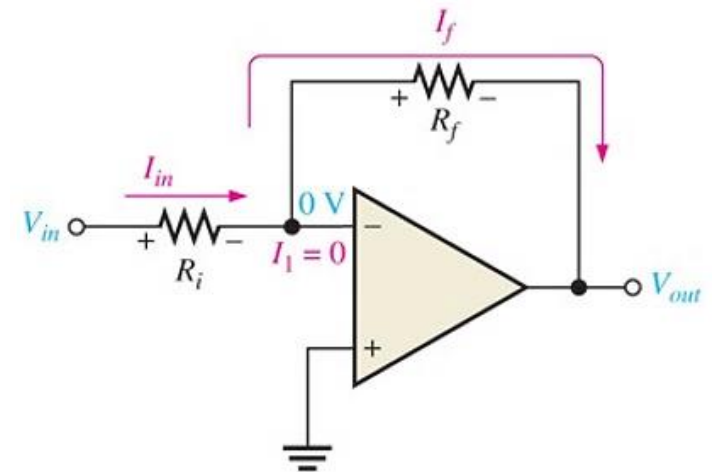
Herwerken:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_i} \text{ of: } \mathbf{A_{cl} = -\frac{R_f}{R_i}}$$

- A_{cl} is onafhankelijk van de open-lusversterking A_{ol} en is te vinden door de verhouding te nemen van de terugkoppelweerstand R_f op de ingangsweerstand R_i
- Opmerking: negatief teken in formule A_{cl} slaat op het feit dat V_{out} 180° in fase verschoven is t.o.v. V_{in} .



(a) Virtual ground



(b) $I_{in} = I_f$ and current at the inverting input (I_1) is 0.

FIGURE 6-25

EXAMPLE 6-6

Given the op-amp configuration in Figure 6-26, determine the value of R_f required to produce a closed-loop voltage gain of -100 .

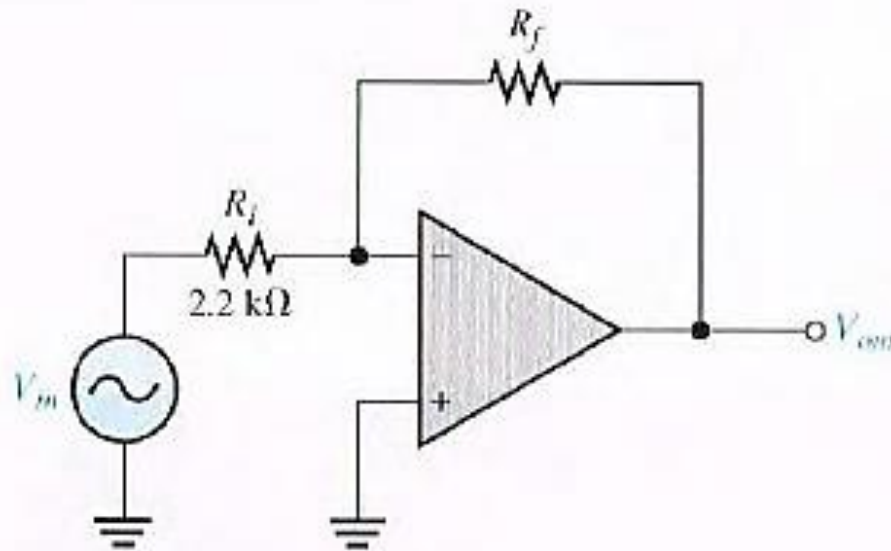


FIGURE 6-26

SOLUTION

Knowing that $R_i = 2.2 \text{ k}\Omega$ and $A_{cl(I)} = -100$, calculate R_f as follows:

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

$$R_f = -A_{cl(I)}R_i = -(-100)(2.2 \text{ k}\Omega) = 220 \text{ k}\Omega$$

Section 6-5 checkup

1. Wat is het hoofddoel van negatieve terugkoppeling?
2. De gesloten lusversterking A_{cl} (closed loop gain) van iedere opampschakeling in 6-5 besproken is afhankelijk van de openlus versterking A_{ol} (open-loop voltage gain) van de opamp? (Waar of niet waar)
3. De verzwakking (B) van een niet-inverterende opampconfiguratie is gelijk aan 0,02. Wat is A_{cl} ?



6-6 Opampimpedanties en ruis (op-amp impedances and noise)

Waarover gaat het?

- In deze sectie bespreken we hoe negatieve terugkoppeling de input- en output impedantie van een opamp beïnvloed.
- De effecten op zowel de inverterende- als de niet-inverterende versterkerschakeling worden besproken

Wat is belangrijk?

- Je kan de in- en uitgangsimpedantie bepalen van volgende opampschakelingen:
 - niet-inverterende versterker
 - Spanningsvolger
 - Inverterende versterker

Ingangsimpedantie (input impedance) van een niet-inverterende versterker)

- Verskil tussen V_f (terugkoppelspanning aan inverterende ingang) en V_{in} is zeer klein en wordt voorgesteld door V_{diff} .
- Dit houdt in dat de ingangsstroom in de opamp ook zeer klein is. Voor een ideale opamp geldt:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \cong \frac{V_{in}}{0} = \text{oneindig } (\infty)$$

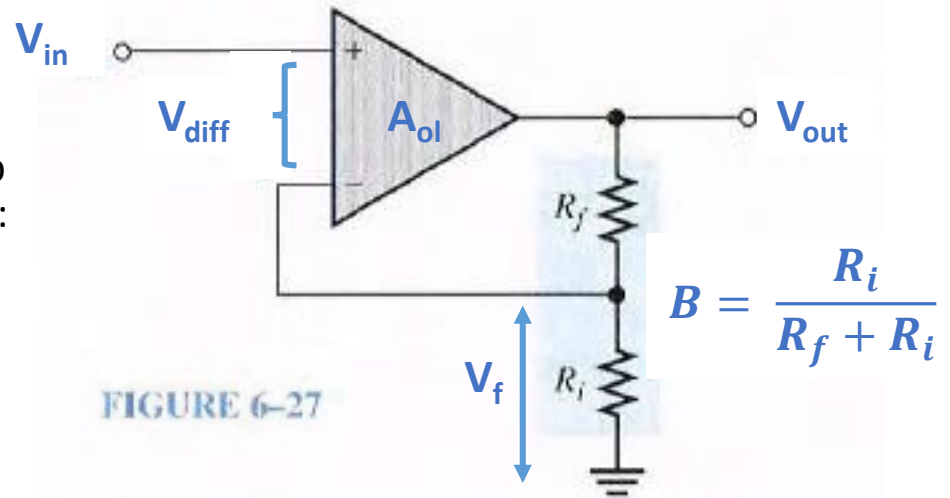
- Voor veel praktische schakelingen kan deze waarde gebruikt worden om een basisidee te bekomen van de werking van de schakeling.
- Meer exacte analyse: I_{in} is verschillend van 0 => deze vloeit in de opamp en veroorzaakt een V_{diff} over de ingangsimpedantie (tussen de twee ingangen) van de opamp.

$$V_{in} = V_{diff} + V_f \text{ en } V_f = B \cdot V_{out}$$

$$\text{Met } V_{out} \cong A_{ol} \cdot V_{diff} :$$

- $V_{in} = V_{diff} + A_{ol} \cdot B \cdot V_{diff} = (1 + A_{ol} \cdot B) V_{diff}$
- Vermits $V_{diff} = I_{in} \cdot Z_{in}$:

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



Hieruit volgt :

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

$$\mathbf{Z_{in(NI)} = (1 + A_{ol} \cdot B) \cdot Z_{in}}$$

$Z_{in(NI)}$ is de totale ingangsimpedantie van de niet-inverterende versterker en veel groter dan de inwendige ingangsimpedantie van de opamp alleen. (dus zonder uitwendige terugkoppeling)

Uitgangsimpedantie (output impedance) van een niet-inverterende versterker

- Toepassen spanningswet van Kirchhoff in het outputcircuit:

$$V_{out} = A_{ol} \cdot V_{diff} - Z_{out} \cdot I_{out}$$

- Met $V_{diff} = V_{in} - V_f$:

$$V_{out} = A_{ol} \cdot (V_{in} - V_f) - Z_{out} \cdot I_{out}$$

- Indien verondersteld mag worden dat $A_{ol} \cdot (V_{in} - V_f) \gg Z_{out} \cdot I_{out}$ is:

$$V_{out} \cong A_{ol} \cdot (V_{in} - V_f) \cong A_{ol} \cdot (V_{in} - B \cdot V_{out})$$

$$V_{out} \cong A_{ol} \cdot V_{in} - A_{ol} \cdot B \cdot V_{out}$$

$$V_{out} + A_{ol} \cdot B \cdot V_{out} \cong A_{ol} \cdot V_{in}$$

$$V_{out}(1 + A_{ol} \cdot B) \cong A_{ol} \cdot V_{in}$$

- Alles delen door I_{out} :

$$\frac{V_{out}}{I_{out}}(1 + A_{ol} \cdot B) \cong \frac{A_{ol} \cdot V_{in}}{I_{out}}$$

- $\frac{V_{out}}{I_{out}}$ stelt de uitgangsimpedantie $Z_{out(NI)}$ van de niet-inverterende versterker (opamp met tegenkoppeling)

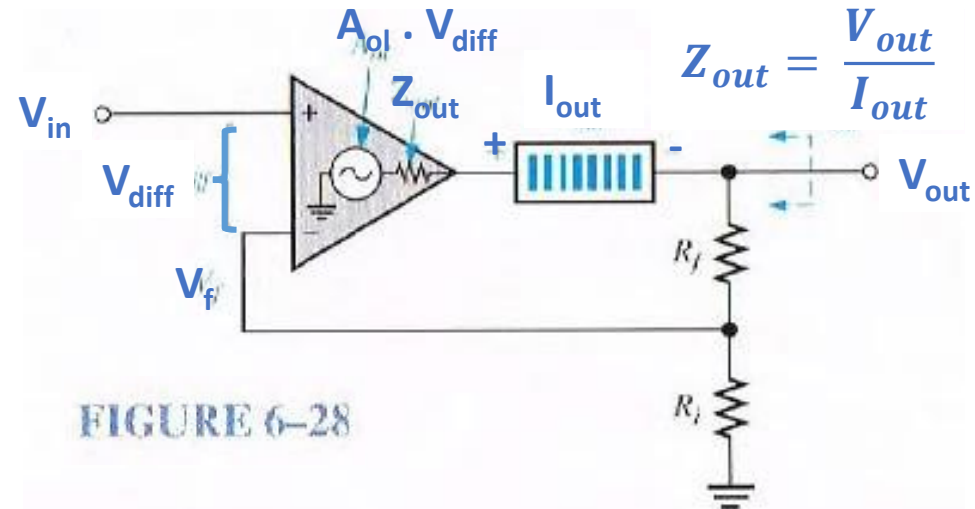


FIGURE 6-28

- $A_{ol} \cdot V_{in}$ is de uitgangsspanning van de opamp zonder tegenkoppeling, dus stelt $\frac{A_{ol} \cdot V_{in}}{I_{out}}$ de uitgangsimpedantie Z_{out} voor van de opamp zonder uitwendige tegenkoppeling.

$$Z_{out(NI)}(1 + A_{ol} \cdot B) = Z_{out}$$

$$\mathbf{Z_{out(NI)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{ol} \cdot B}}$$

De uitgangsspanning van een opamp is relatief laag. Met tegenkoppeling wordt de uitgangsimpedantie nog lager zodat in veel gevallen $Z_{out(NI)} \approx 0 \Omega$

EXAMPLE 6-7

- (a) Determine the input and output impedances of the amplifier in Figure 6-29.
 The op-amp data sheet gives $Z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, $Z_{out} = 75 \Omega$, and $A_{ol} = 200,000$.
- (b) Find the closed-loop voltage gain.

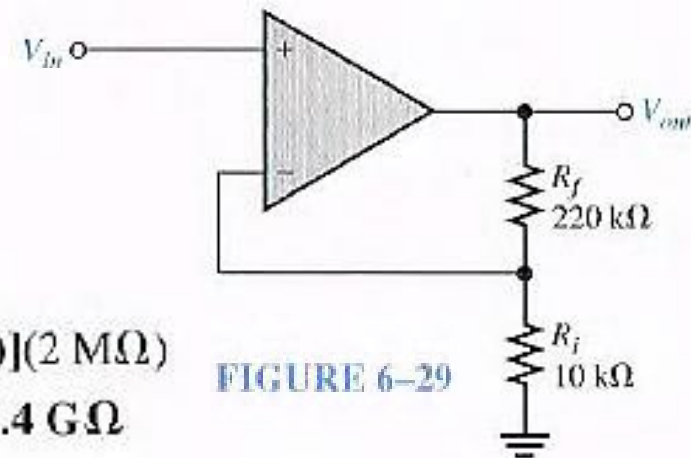


FIGURE 6-29

- (a) The attenuation, B , of the feedback network is

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{230 \text{ k}\Omega} = 0.0435$$

$$\begin{aligned} Z_{in(NI)} &= (1 + A_{ol}B)Z_{in} = [1 + (200,000)(0.0435)](2 \text{ M}\Omega) \\ &= (1 + 8700)(2 \text{ M}\Omega) = 17,402 \text{ M}\Omega = \mathbf{17.4 \text{ G}\Omega} \end{aligned}$$

$$Z_{out(NI)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{ol}B} = \frac{75 \Omega}{1 + 8700} = 0.0086 \Omega = \mathbf{8.6 \text{ m}\Omega}$$

$$(b) \quad A_{cl(NI)} = \frac{1}{B} = \frac{1}{0.0435} \cong \mathbf{23}$$

Impedanties bij spanningsvolger

- Spanningsvolger is een speciaal geval van niet-inverterende versterker. Dezelfde formules zijn bruikbaar maar met $B=1$.

$$Z_{in(NI)} = (1 + A_{ol}) \cdot Z_{in}$$

$$Z_{out(NI)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{ol}}$$

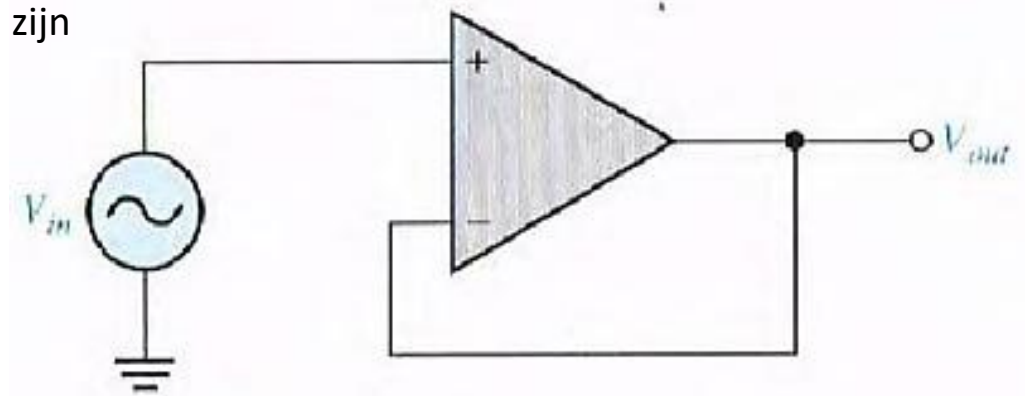


FIGURE 6-23 Op-amp voltage-follower.

- Aangezien B kleiner dan één is bij de niet-inverterende versterker is de ingangsimpedantie van de spanningsvolger steeds groter dan deze van de niet-inverterende versterker.
- De uitgangsimpedantie van de spanningsvolger is veel kleiner dan deze van de niet-inverterende versterker.

$$B = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{0}{\infty} + 1 \cong 1$$

Impedanties bij spanningsvolger

EXAMPLE 6-8

The same op-amp as in Example 6-7 is used in a voltage-follower configuration. Determine the input and output impedances.

The op-amp data sheet gives $Z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, $Z_{out} = 75 \Omega$, and $A_{ol} = 200,000$.

SOLUTION

Ω

Since $B = 1$,

$$Z_{in(VF)} = (1 + A_{ol})Z_{in} = (1 + 200,000)(2 \text{ M}\Omega) = \mathbf{400 \text{ G}\Omega}$$

$$Z_{out(VF)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{ol}} = \frac{75 \Omega}{1 + 200,000} = \mathbf{375 \mu\Omega}$$

Vergelijk met example 6-7 (niet –inverterende versterker) daar was:

$Z_{in(NI)} = 17,4 \text{ G}\Omega$ en $Z_{out(NI)} = 8,6 \text{ m}\Omega$

Impedanties bij inverterende versterker (inverting amplifier)

- Via fig. 6-30 kan je de impedanties bepalen. De spanning op de inverterende ingang is ongeveer 0V omwille van het virtueel massapunt.

- Ingangsimpedantie:**

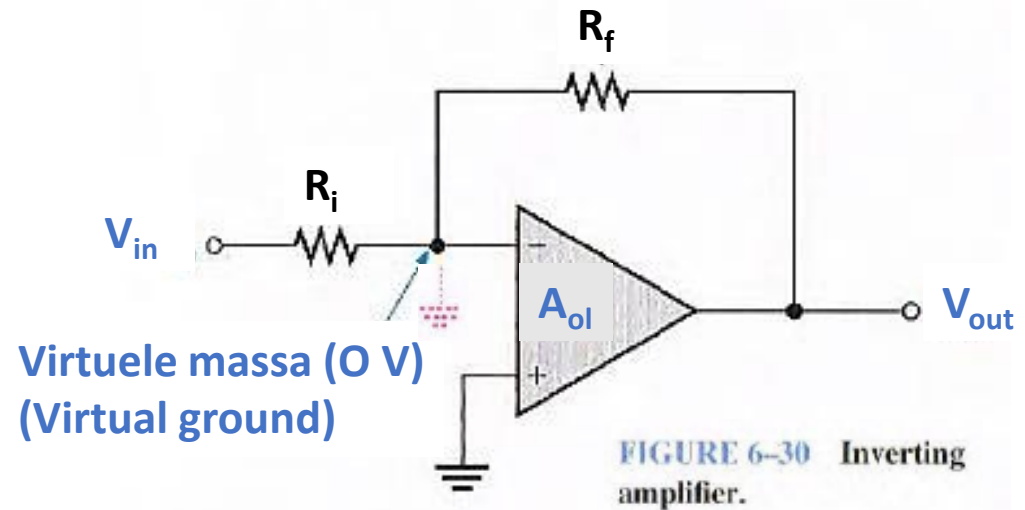
$$Z_{in(I)} \cong R_i$$

De ingangsbron aanziet de inverterende ingang als een massa (virtueel massapunt) waardoor het enkel R_i als ziet alsingangsimpedantie.

- Uitgangsimpedantie:**

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

De uitgangsimpedantie bij gesloten lus van de inverterende versterker daalt eveneens net zoals de niet-inverterende versterker. De uitdrukking is dezelfde als bij de niet-inverterende versterker.



De uitgangsimpedantie van inverterende en niet-inverterende opampschakeling is zeer laag. Hierdoor kan een relatief grote belasting aan de uitgang worden geplaatst zonder dat de uitgangsspanning van waarde verandert.

Impedanties bij inverterende versterker

EXAMPLE 6-9

Find the values of the input and output impedances in Figure 6-32. Also, determine the closed-loop voltage gain. The op-amp has the following parameters: $A_{ol} = 50,000$; $Z_{in} = 4 \text{ M}\Omega$; and $Z_{out} = 50 \Omega$.

SOLUTION

$$Z_{in(l)} \cong R_i = 1.0 \text{ k}\Omega$$

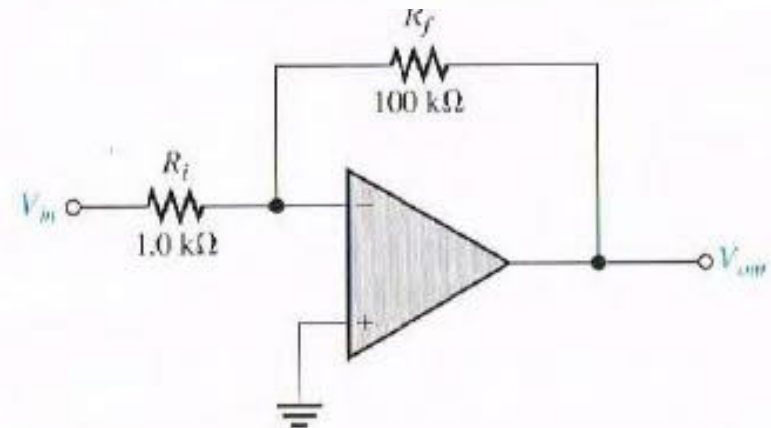
The feedback attenuation, B , is

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1.0 \text{ k}\Omega}{101 \text{ k}\Omega} = 0.0099$$

Then

$$Z_{out(l)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{ol}B} = \frac{50 \Omega}{1 + (50,000)(0.0099)} = \mathbf{101 \text{ m}\Omega} \quad (\text{zero for all practical purposes})$$

$$A_{cl(l)} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1.0 \text{ k}\Omega} = \mathbf{-100}$$



Ruis (noise – Blz. 337)

- System note (blz. 338)
- Meer en meer worden schakelingen ontworpen waarbij lagere voedingsspanningen en instelstromen gebruikt worden. Dit om energie te besparen.
- Als werkspanningen worden verlaagd, en de vereisten aangaande de nauwkeurigheid worden verhoogd, bekomt ruis een factor waarmee rekening dient te worden gehouden.
- Definitie ruis: elk ongewenst signaal dat de kwaliteit van het gewenste signaal beïnvloed. De relatie tussen gewenst signaal en ruis wordt weergegeven als volgt:

$$\frac{S_f}{N_f} = \frac{\text{rms-waarde signaal (effectieve signaalspanning)}}{\text{rms-waarde ruis (effectieve ruisspanning)}}$$

- Signaal/ruis vergelijkbaar met een stereo-installatie.
 - CD hard zetten => ruis van de stereo-installatie wordt onderdrukt door de muziek
 - CD stopt met spelen => als volume niet stiller wordt gezet, hoor je de systeemruis
 - Bij CD's is de signaal/ruisverhouding veel lager dan bij vinylplaten en cassettebanden => is reden dat CD de andere media verdrongen heeft.
 - Meestal is de ruis die je nu nog hoort in een stereoketen deze van de elektronica van het systeem en niet van het medium waarop de muziek staat.