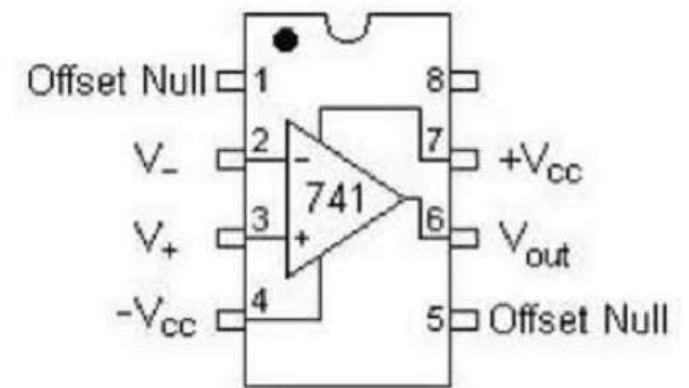


# Chương 5. KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

## Operational Amplifiers (or OP-AMP)

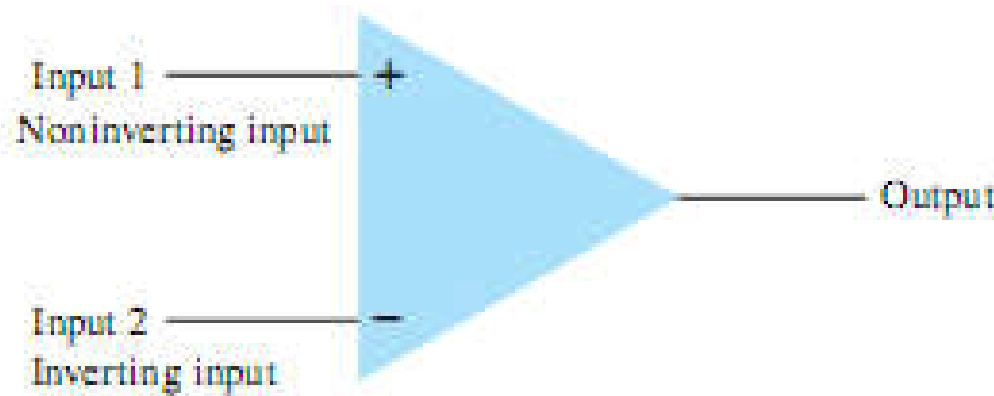


# Chương 7. KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

## Operational Amplifiers (or OP-AMP)

### 5.1. Khái niệm cơ bản

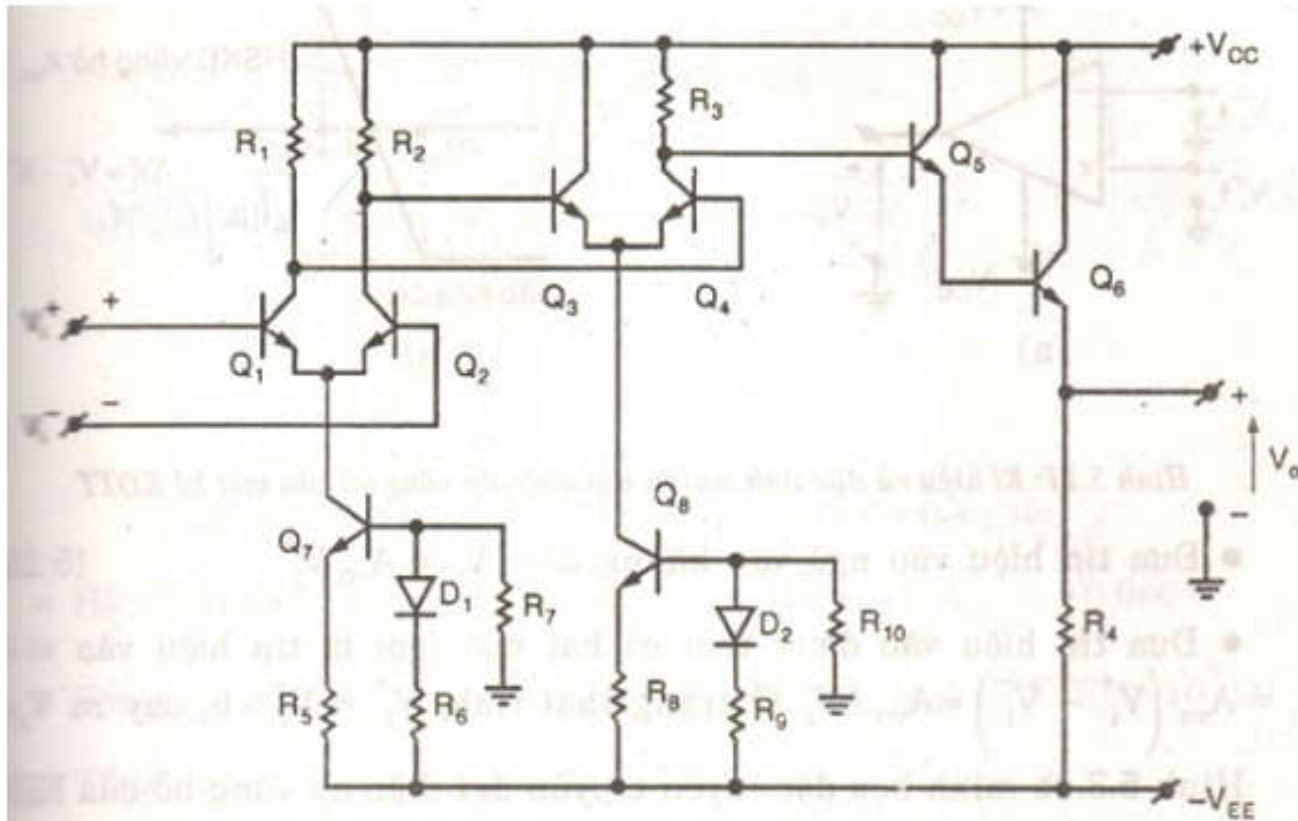
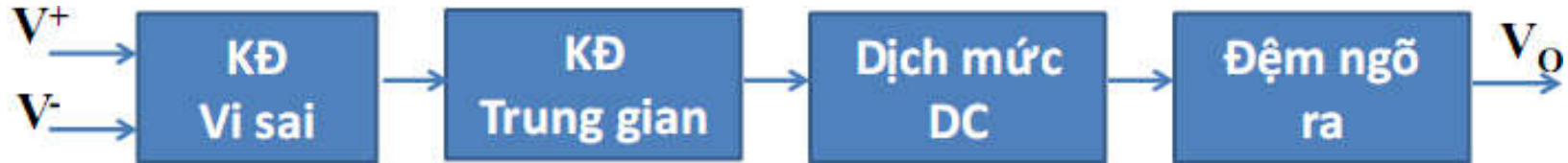
Vi mạch khuếch đại thuật toán (Op-Amp) là vi mạch có hệ số khuếch đại rất lớn, dùng để thực hiện các phép tính cộng, trừ, nhân, chia, vi phân tích phân, hoặc để tạo ra các sóng sin, vuông, tam giác. Vi mạch có hệ số 2 ngõ vào và 1 ngõ ra và hai chân cấp nguồn, có thể cấp nguồn đối xứng hoặc nguồn đơn



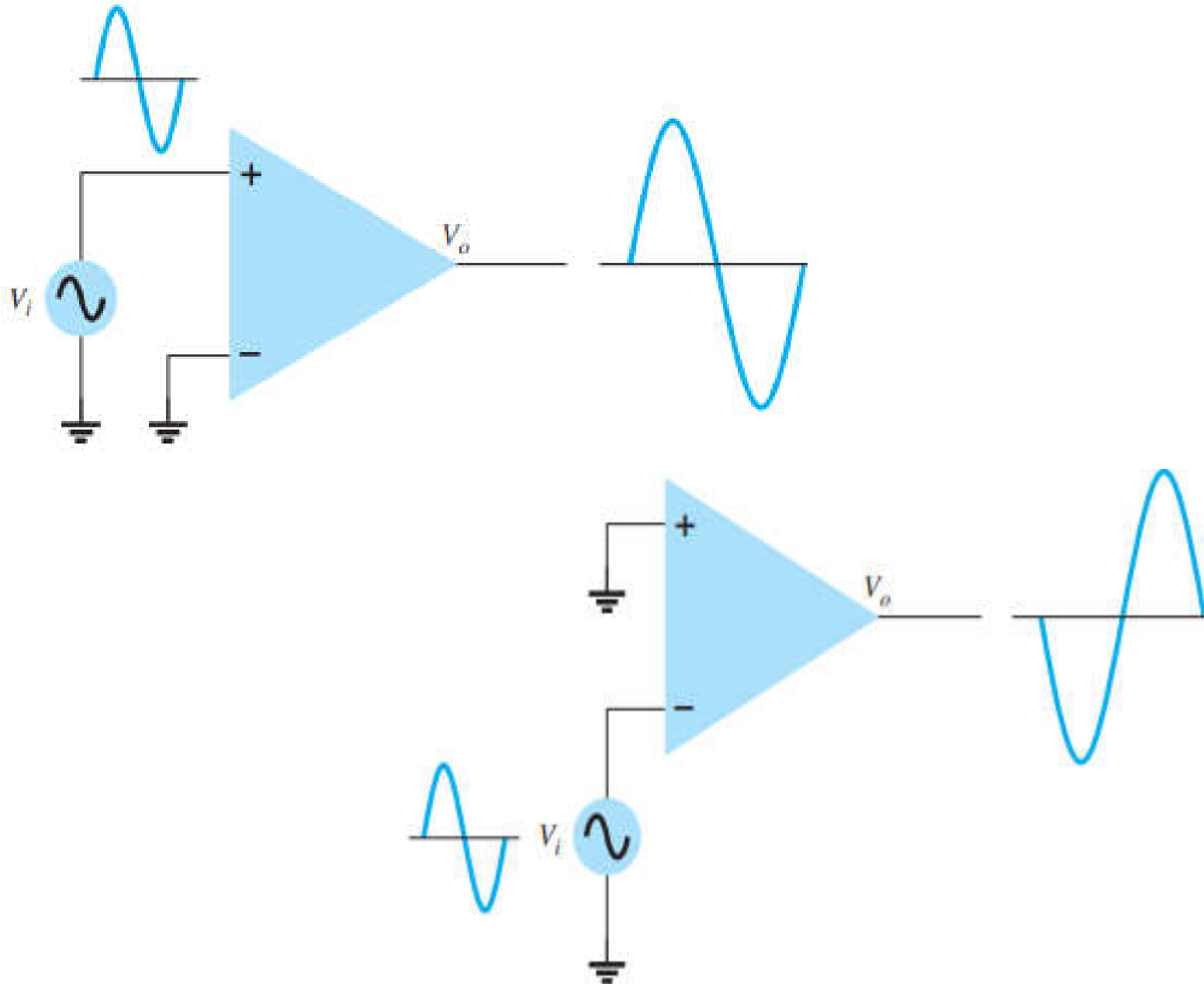
# Chương V. KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

## Operational Amplifiers (or OP-AMP)

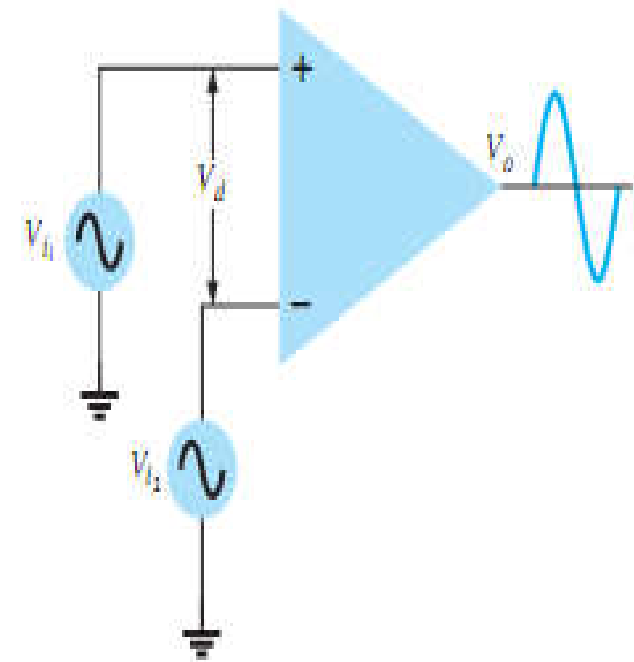
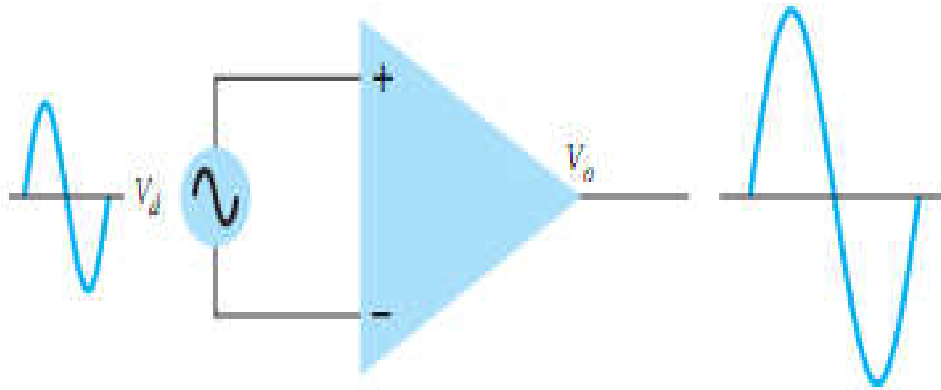
### 5.1.1. Sơ đồ khối của Op-Amp



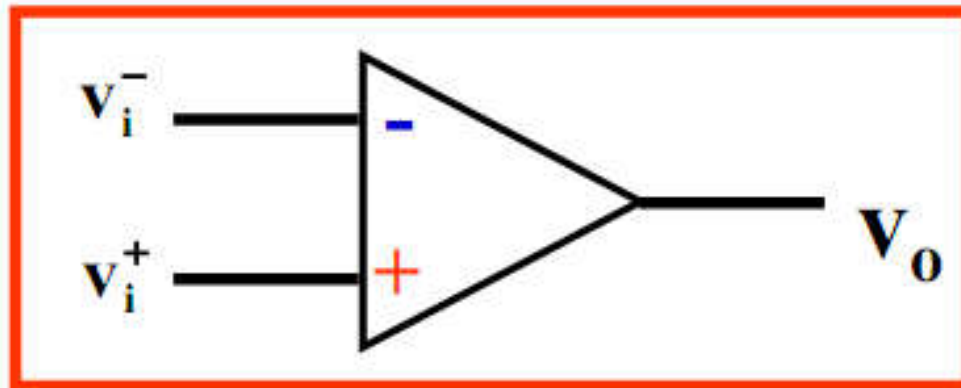
### 5.1.1. Sơ đồ khối của Op-Amp



### 5.1.1. Sơ đồ khối của Op-Amp



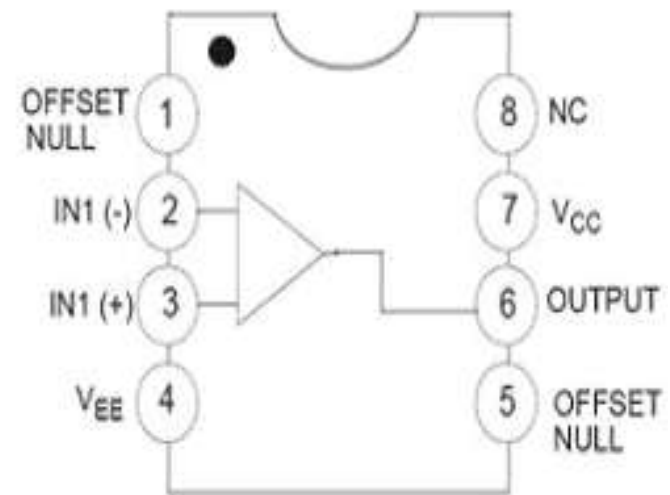
## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP



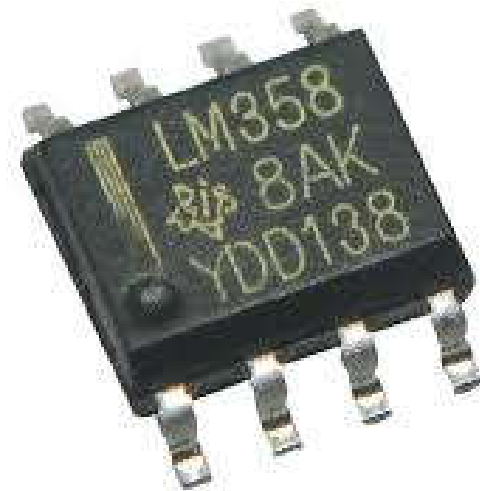
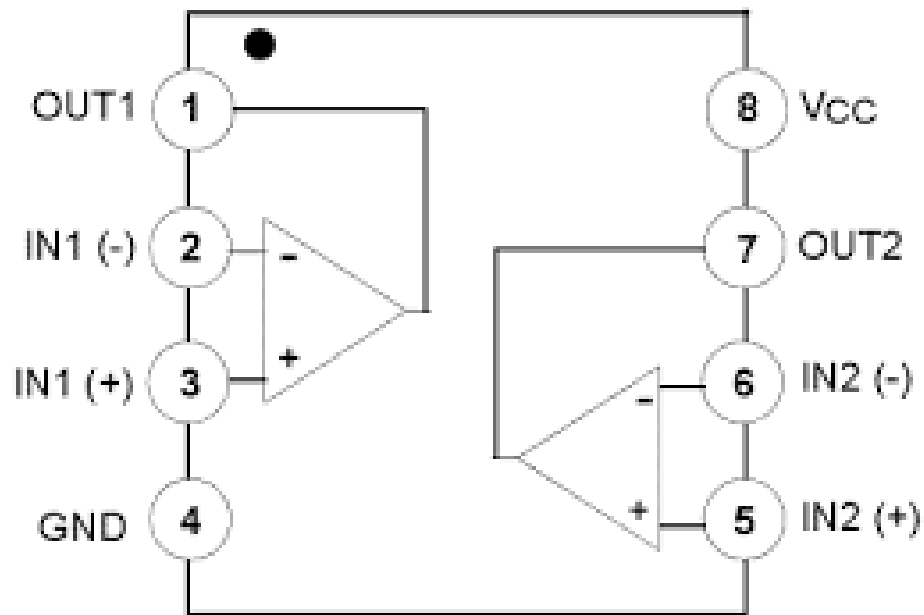
$V_i^-$  : Ngõ vào đảo

$V_i^+$  : Ngõ vào không đảo

$V_o$  : Ngõ ra



## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP



## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP

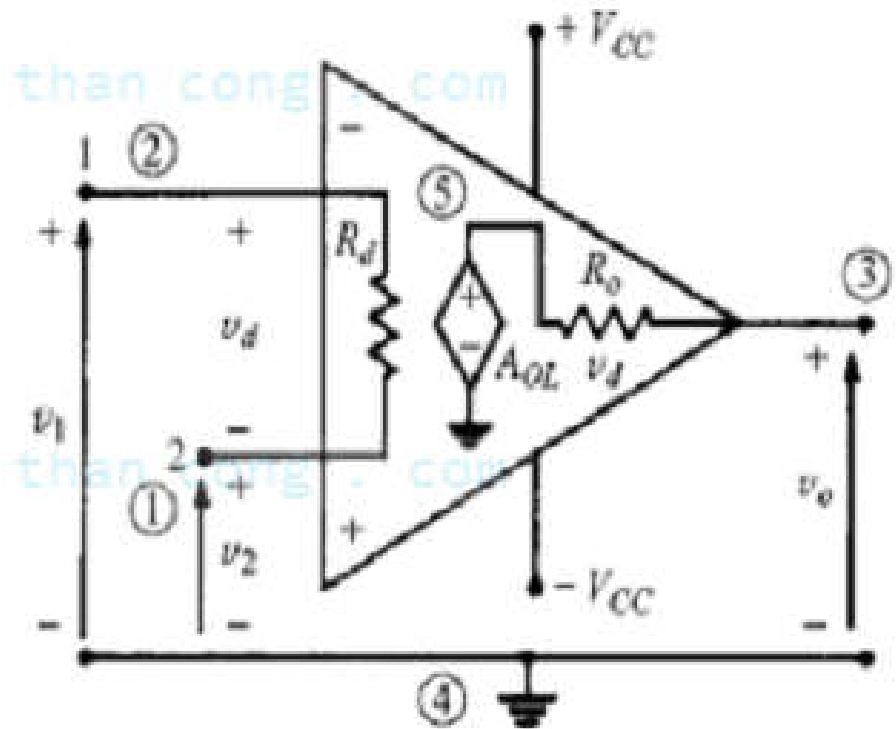
### OP-AMP không lí tưởng

Một bộ khuếch đại vi mạch thuật toán khuếch đại đại vi sai điện áp  $v_d$  giữa hai tín hiệu vào

$$v_d = v_2 - v_1 = v_i^+ - v_i^-$$

Hệ số khuếch đại điện áp hở mạch được tính theo công thức

$$A_{OL} = \frac{v_o}{v_d} = \frac{v_o}{v_2 - v_1} = \frac{v_o}{v_i^+ - v_i^-}$$





## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP

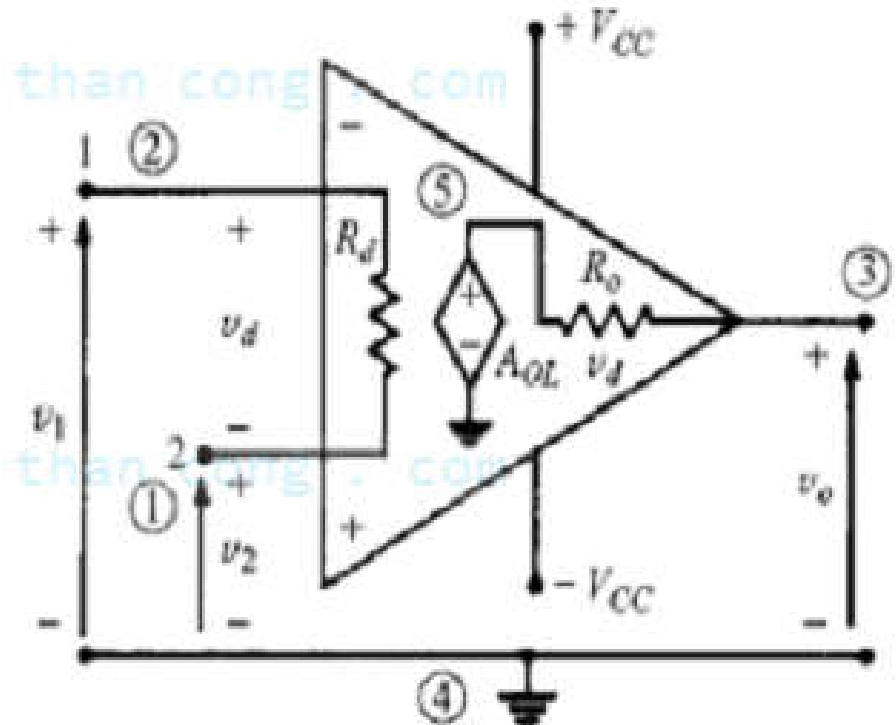
### OP-AMP không lí tưởng

$V_d$  ngõ vào vi sai

$R_d$  điện trở vào

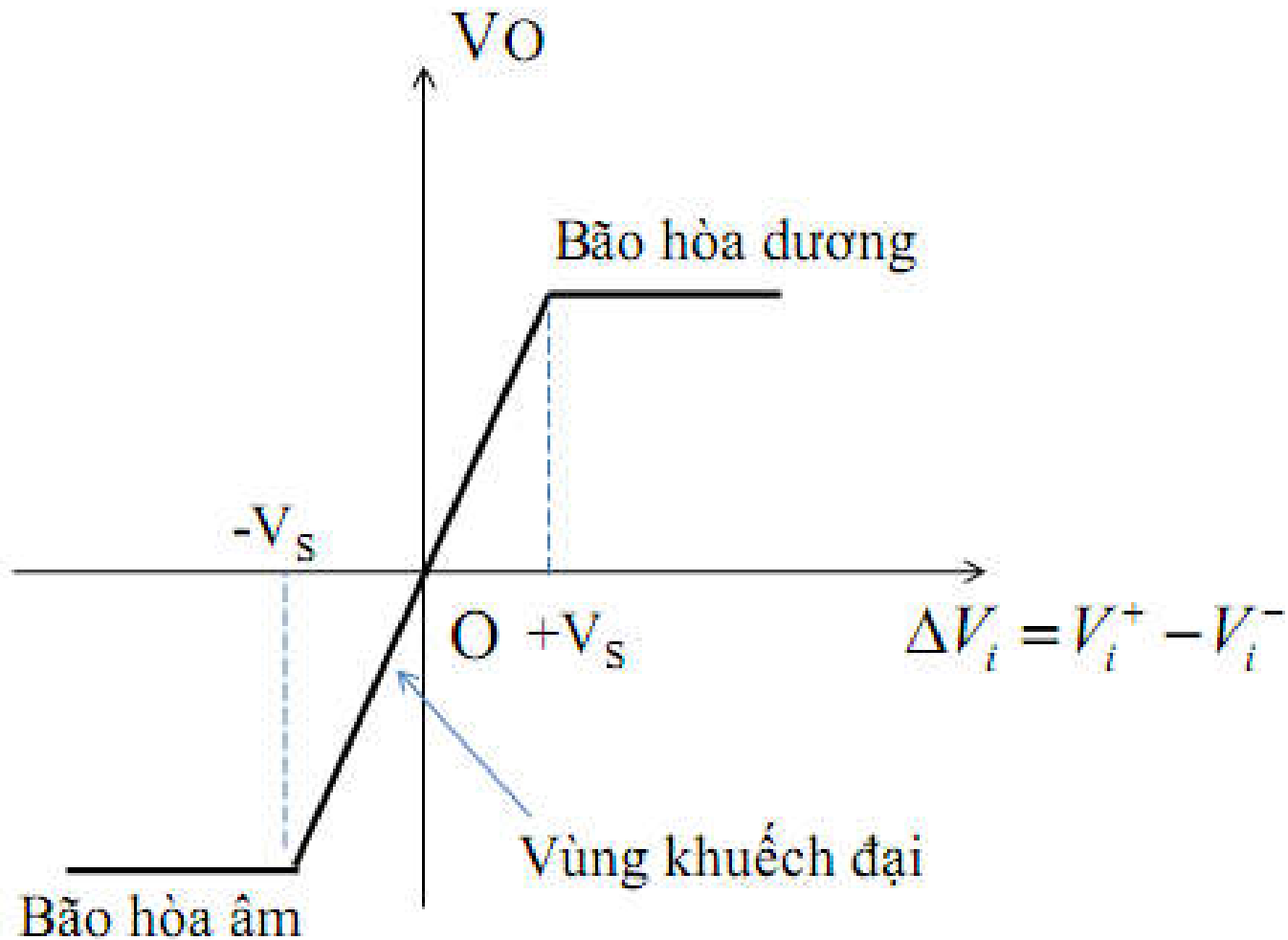
$R_o$  điện trở ra

$A_{OL}$  là độ lợi vòng hở



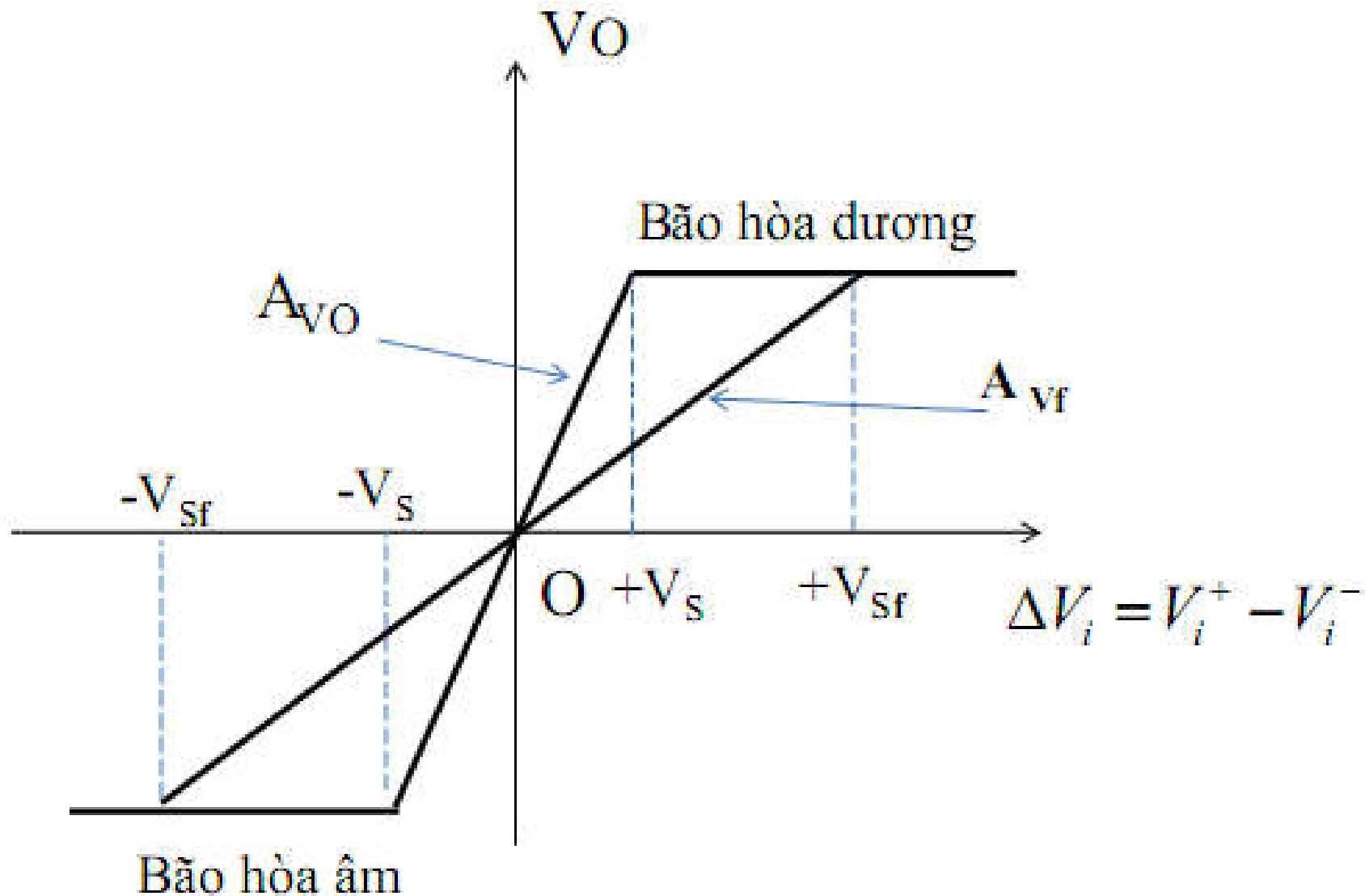
## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP

### Đặc tuyến truyền đạt vòng hở



## 5.1.2. Đặc tính của OP-AMP

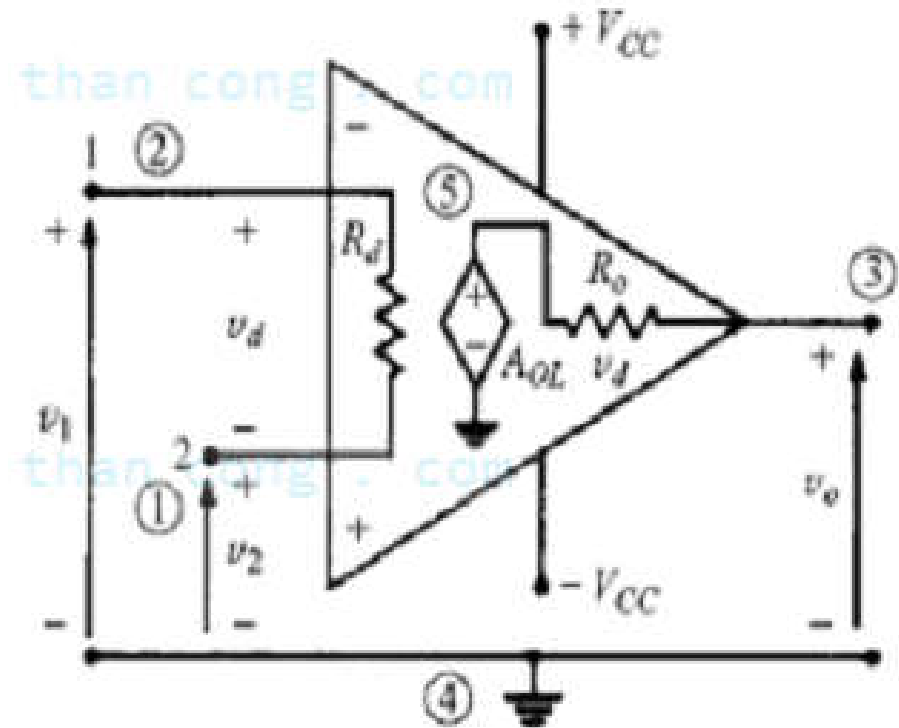
**Đặc tính truyền đạt vòng kín (khi có hồi tiếp âm)**



### 5.1.3. Độ lợi vòng hở

**OP-AMP không lí tưởng**

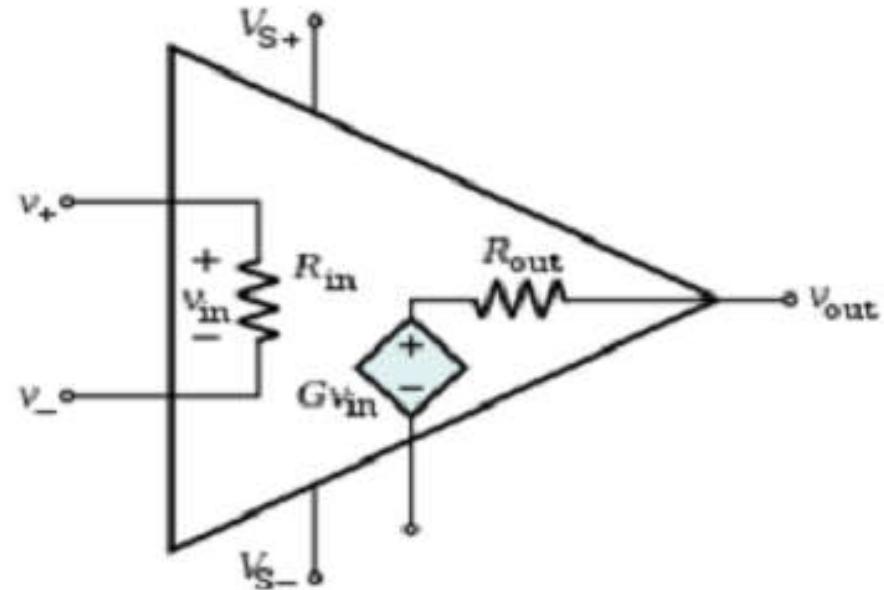
$$A_{OL} = \frac{v_o}{v_d} = \frac{v_o}{v_2 - v_1} = \frac{v_o}{v_i^+ - v_i^-}$$



### 5.1.3. Độ lợi vòng hở

## OP-AMP lí tưởng

- Hệ số khuếch đại vòng hở  $A_{VO} \rightarrow \infty$
- Tổng trở vào  $R_{in} \rightarrow \infty$
- Tổng trở ra  $R_{out} \rightarrow 0$

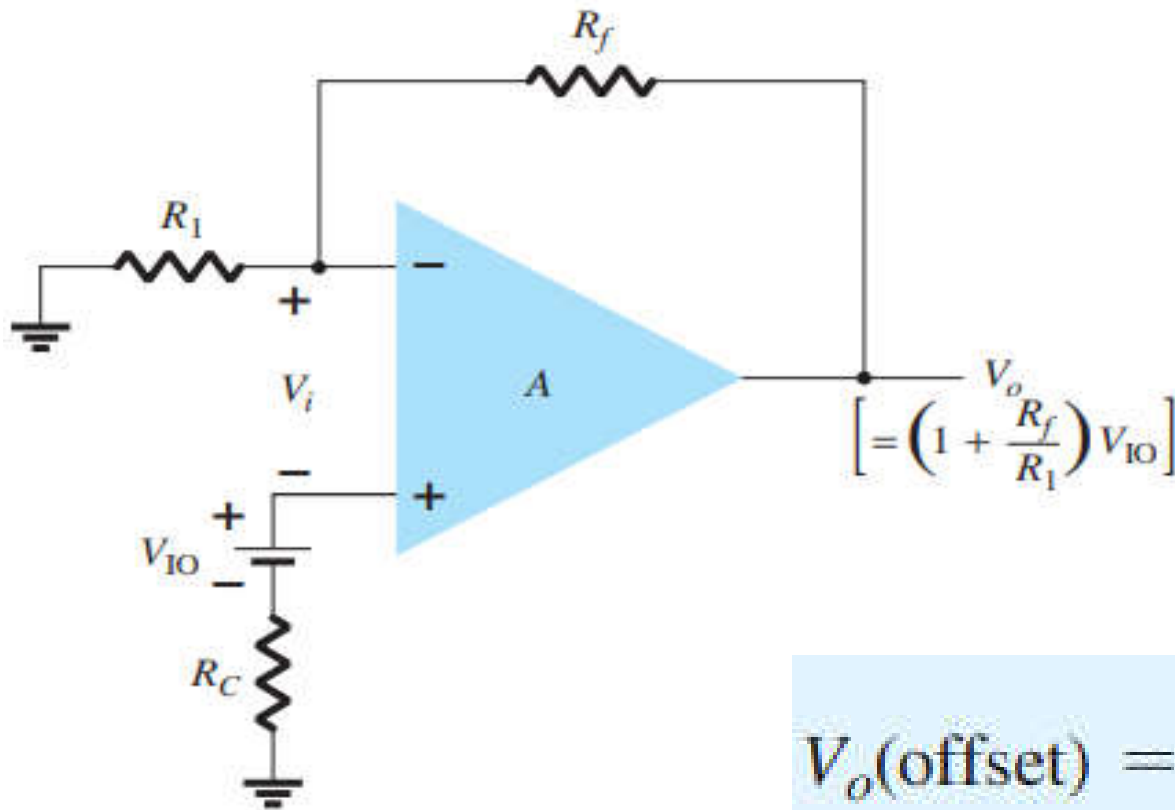


$$V_i^+ = V_i^-$$
$$I^+ = I^- = 0$$

## 5.1.4. Dòng Offset, điện áp Offset

Input Offset Voltage (Điện áp bù đầu vào)  $V_{IO}$

Thông số kỹ thuật của nhà sản xuất cung cấp giá trị  $V_{IO}$  cho op-amp.

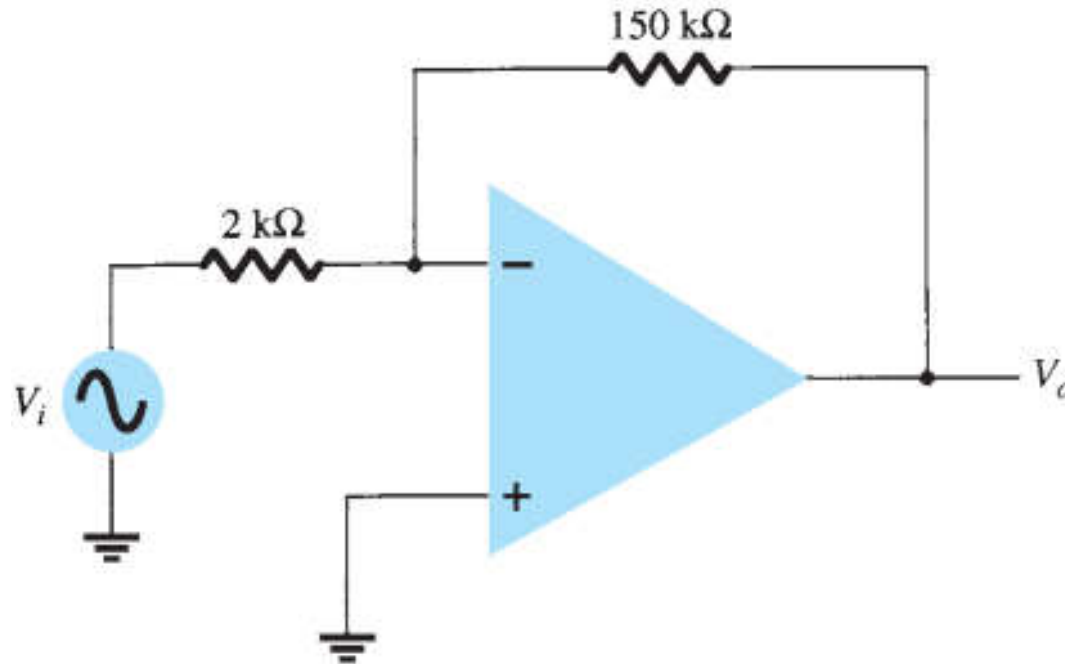


$$V_o(\text{offset}) = V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1}$$

## 5.1.4. Dòng Offset, điện áp Offset

Input Offset Voltage (Điện áp bù đầu vào)  $V_{IO}$

Calculate the output offset voltage of the circuit in Fig. Thông số tra bảng op-amp  $V_{IO} = 1.2 \text{ mV}$

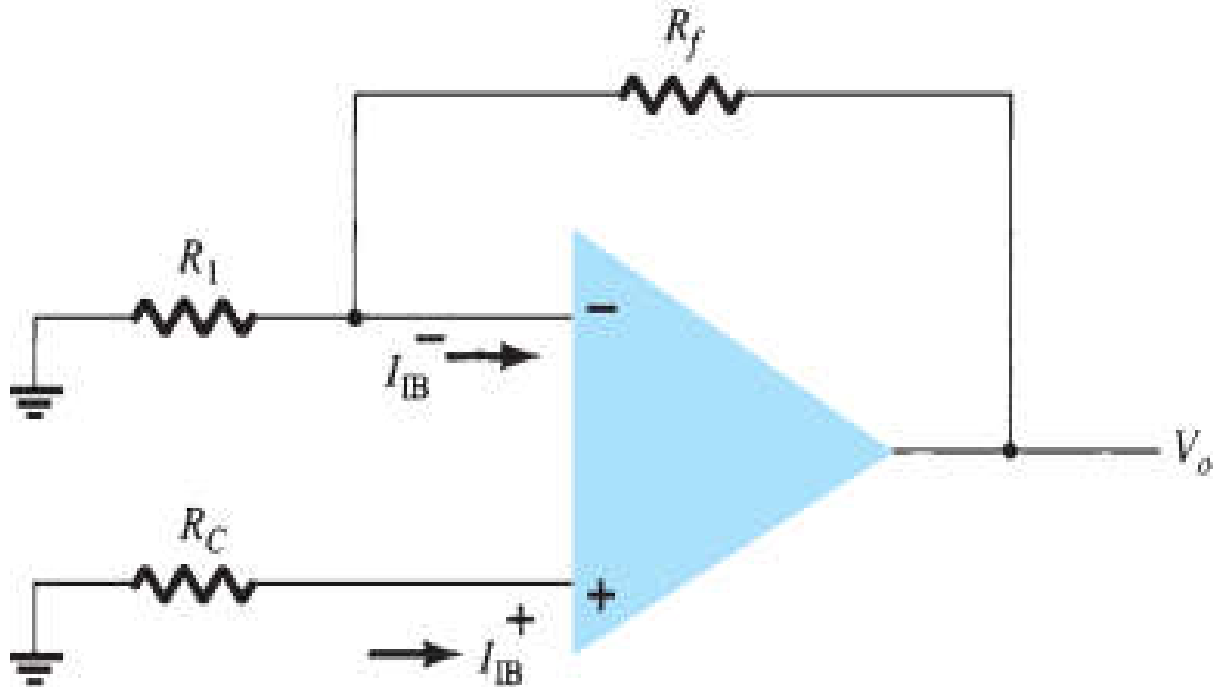


$$V_o(\text{offset}) = V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 91.2 \text{ mV}$$

## 5.1.4. Dòng Offset, điện áp Offset

Output Offset Voltage Due to Input Offset Current

Điện áp bù ngõ ra *do* dòng điện bù ngõ vào



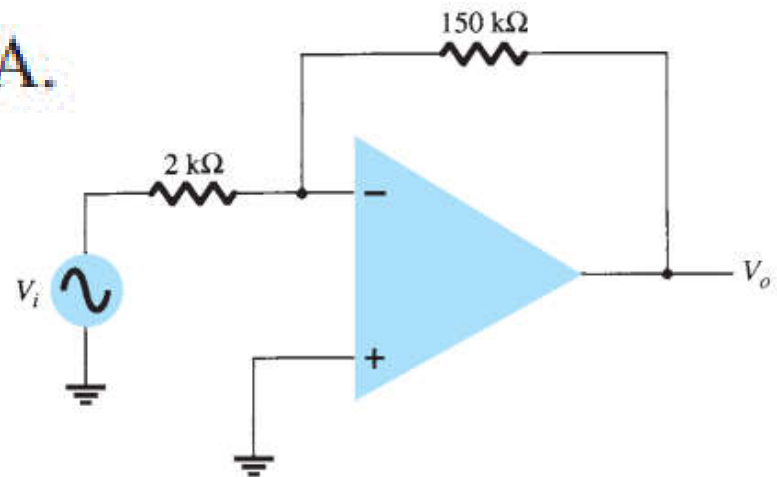
$$V_o \text{ (offset due to } I_{IO}) = I_{IO} R_f$$



## 5.1.4. Dòng Offset, điện áp Offset

Calculate the offset voltage for the circuit of Fig  
Thông số tra bảng op-amp

$$I_{IO} = 100 \text{ nA.}$$



$$V_o = I_{IO} R_f = (100 \text{ nA})(150 \text{ k}\Omega) = 15 \text{ mV}$$

**Total Offset Due to  $V_{IO}$  and  $I_{IO}$**

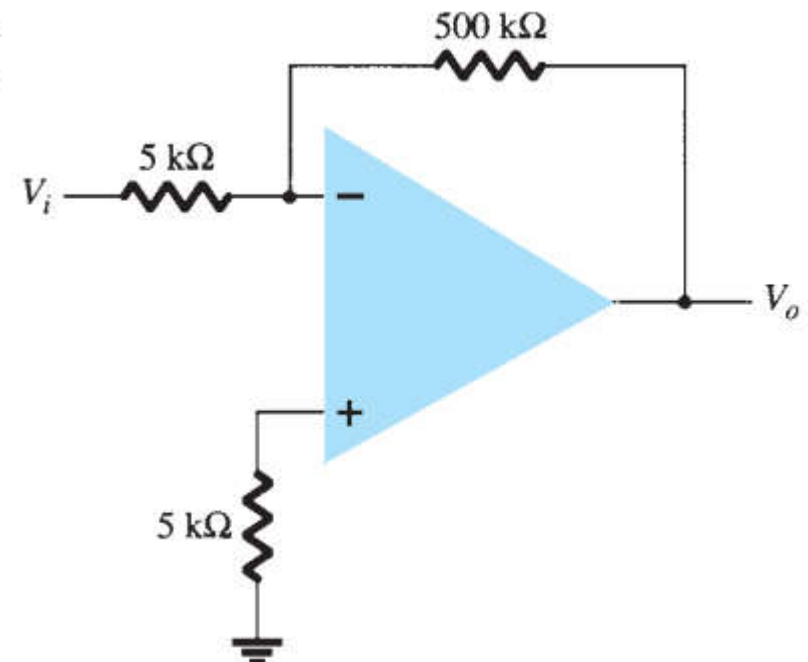
$$|V_o(\text{offset})| = |V_o(\text{offset due to } V_{IO})| + |V_o(\text{offset due to } I_{IO})|$$

## 5.1.4. Dòng Offset, điện áp Offset

Calculate the total offset voltage for the circuit of Fig. for an opamp with specified values  $V_{IO} = 4 \text{ mV}$  and  $I_{IO} = 150 \text{ nA}$ .

$$\begin{aligned} V_o(\text{offset due to } V_{IO}) &= V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1} \\ &= 404 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_o(\text{offset due to } I_{IO}) &= I_{IO} R_f \\ &= (150 \text{ nA})(500 \text{ k}\Omega) = 75 \text{ mV} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_o(\text{total offset}) &= V_o(\text{offset due to } V_{IO}) + V_o(\text{offset due to } I_{IO}) \\ &= 404 \text{ mV} + 75 \text{ mV} = \mathbf{479 \text{ mV}} \end{aligned}$$

## 5.2. Các mạch ứng dụng

### 5.2.1. Mạch khuếch đại đảo

Xét mạch OPAMP lý tưởng:

$R_i = \infty$ ,  $I_i = 0$  nên:

$$v_i^- = v_i^+ \approx 0$$

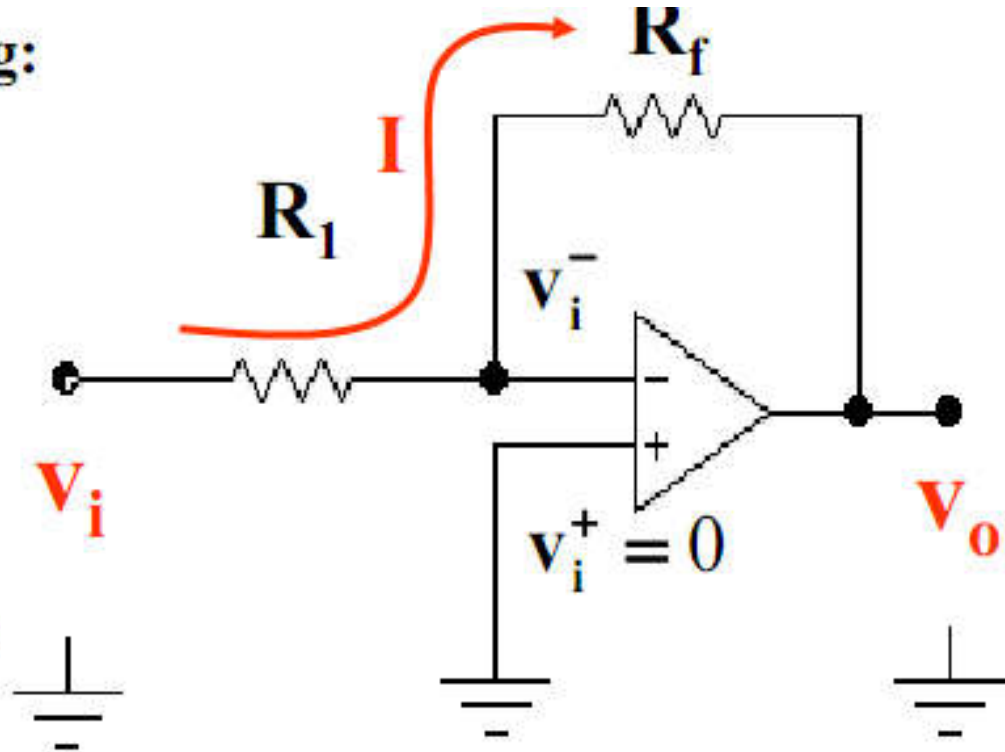
Dòng qua  $R_1$ :

$$I = \frac{v_i}{R_1} = -\frac{v_o}{R_f}$$

Hệ số khuếch đại vòng kín:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

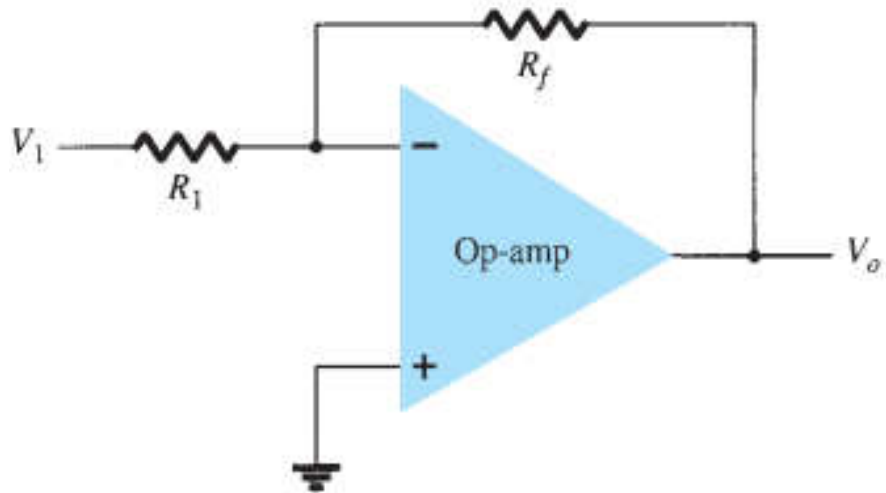
$$\Rightarrow v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i$$



Tổng trở vào:  $Z_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1$  1  
9

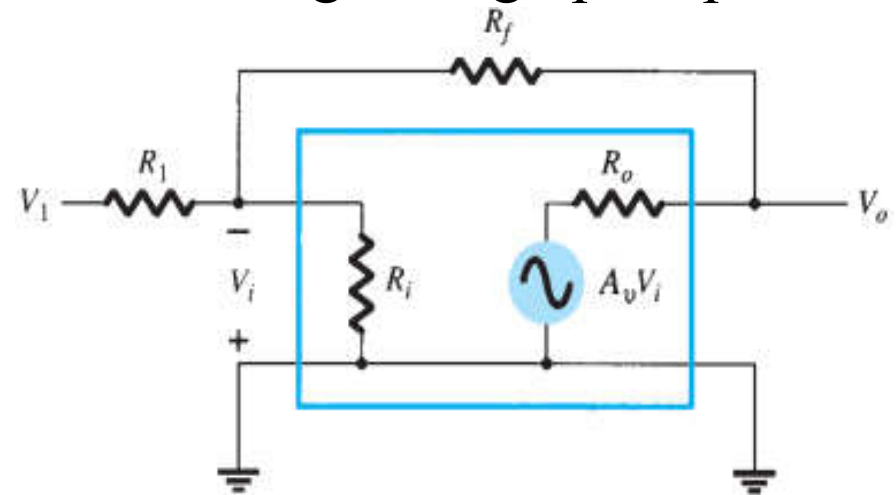
## 5.2.1. Mạch khuếch đại đảo

Ví dụ:



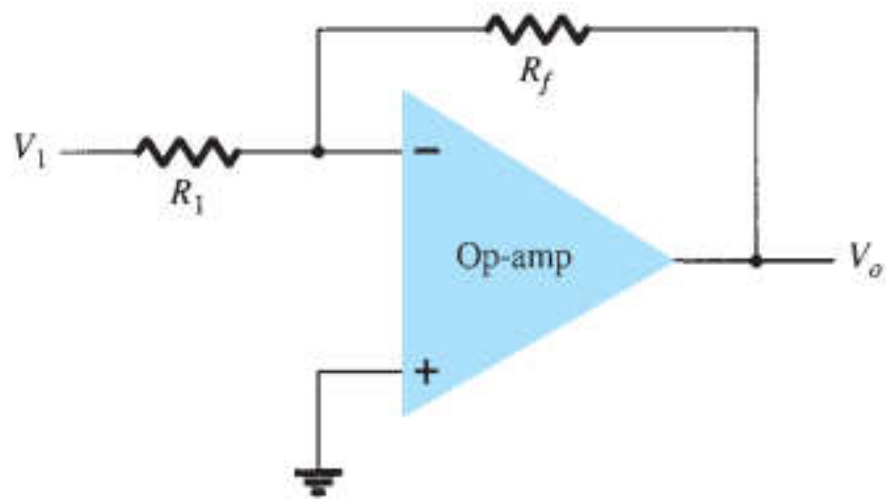
$$\frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

mạch tương đương op-amp



## 5.2.1. Mạch khuếch đại đảo

Ví dụ:



Cho  $R_1 = 100\text{k}\Omega$  và  $R_f = 500\text{k}\Omega$ . Điện áp ra bằng bao nhiêu nếu điện áp vào  $V_1 = 2\text{V}$ ?

$$\begin{aligned} V_o &= -\frac{R_f}{R_1} V_1 \\ &= \mathbf{-10\text{ V}} \end{aligned}$$

## 5.2.2. Mạch khuếch đại không đảo

Xét mạch OPAMP lý tưởng:

$R_i = \infty, I_i = 0$  nên:  $v_i^- = v_i^+$  ;  
Dòng qua  $R_1$ :

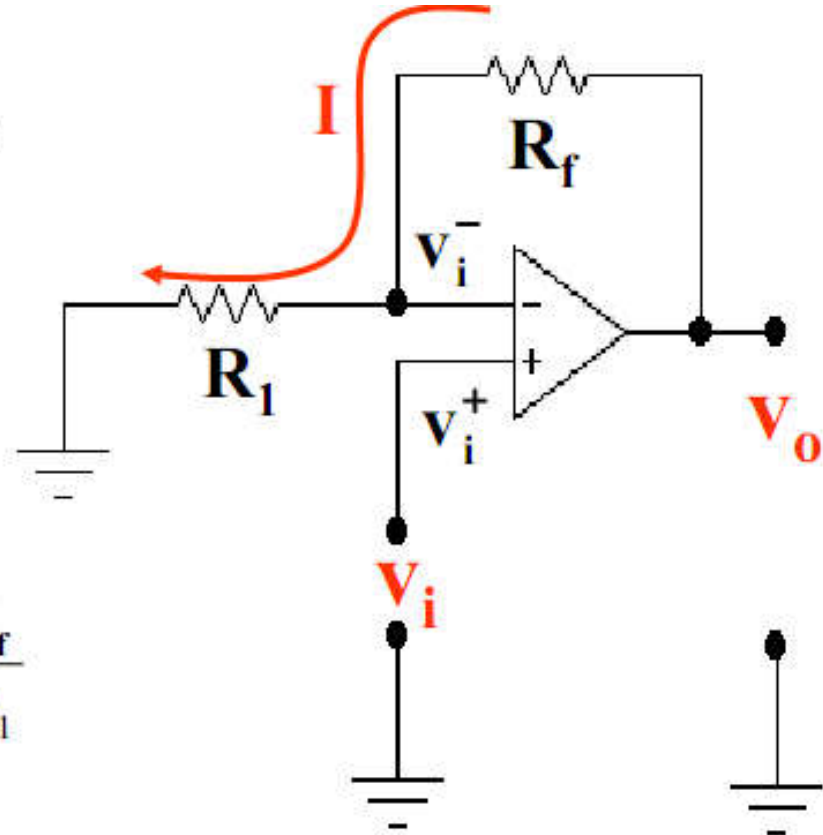
$$I = \frac{v_i^-}{R_1} = \frac{v_o}{R_1 + R_f}$$

Mặt khác, coi :  $v_i^- = v_i^+ \approx v_i$

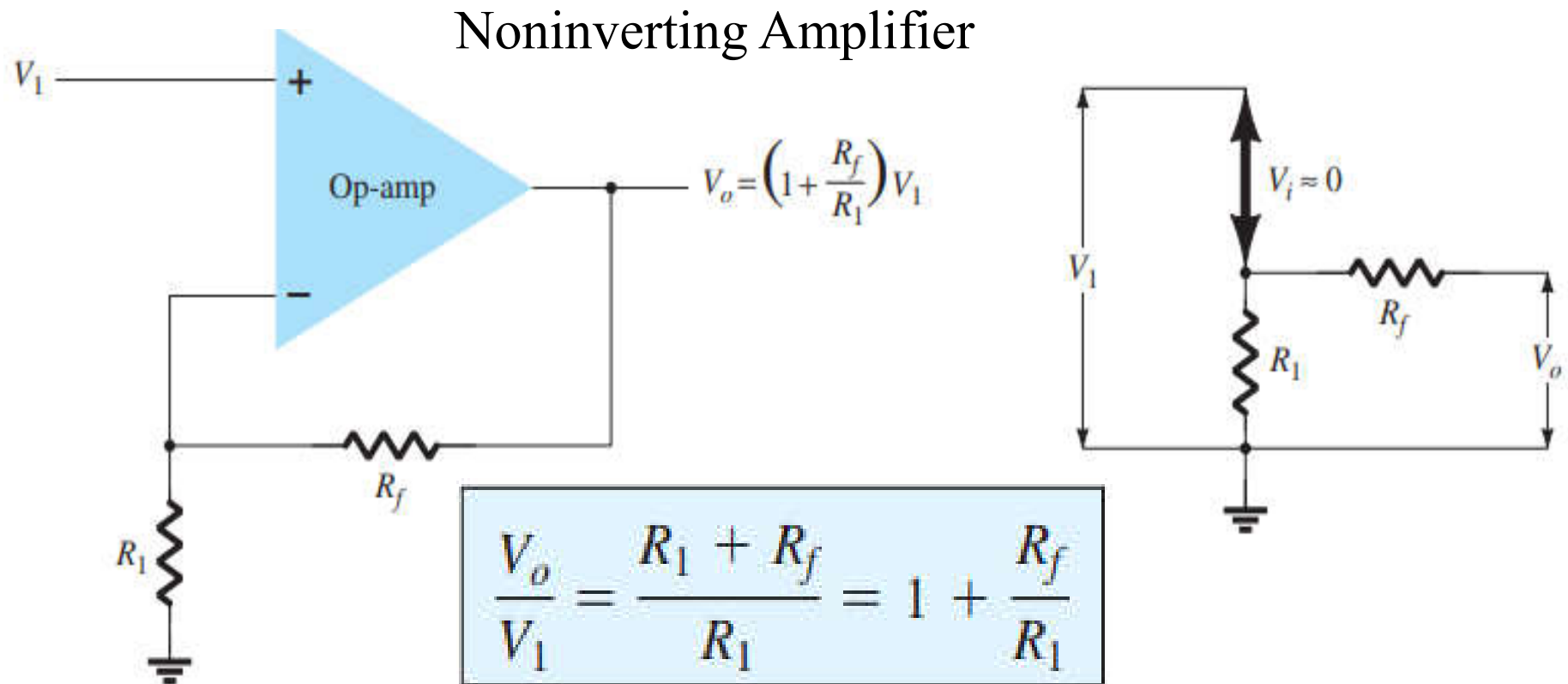
Ta có hệ số khuếch đại vòng kín

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\Rightarrow v_o = \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_i$$



## 5.2.2. Mạch khuếch đại không đảo

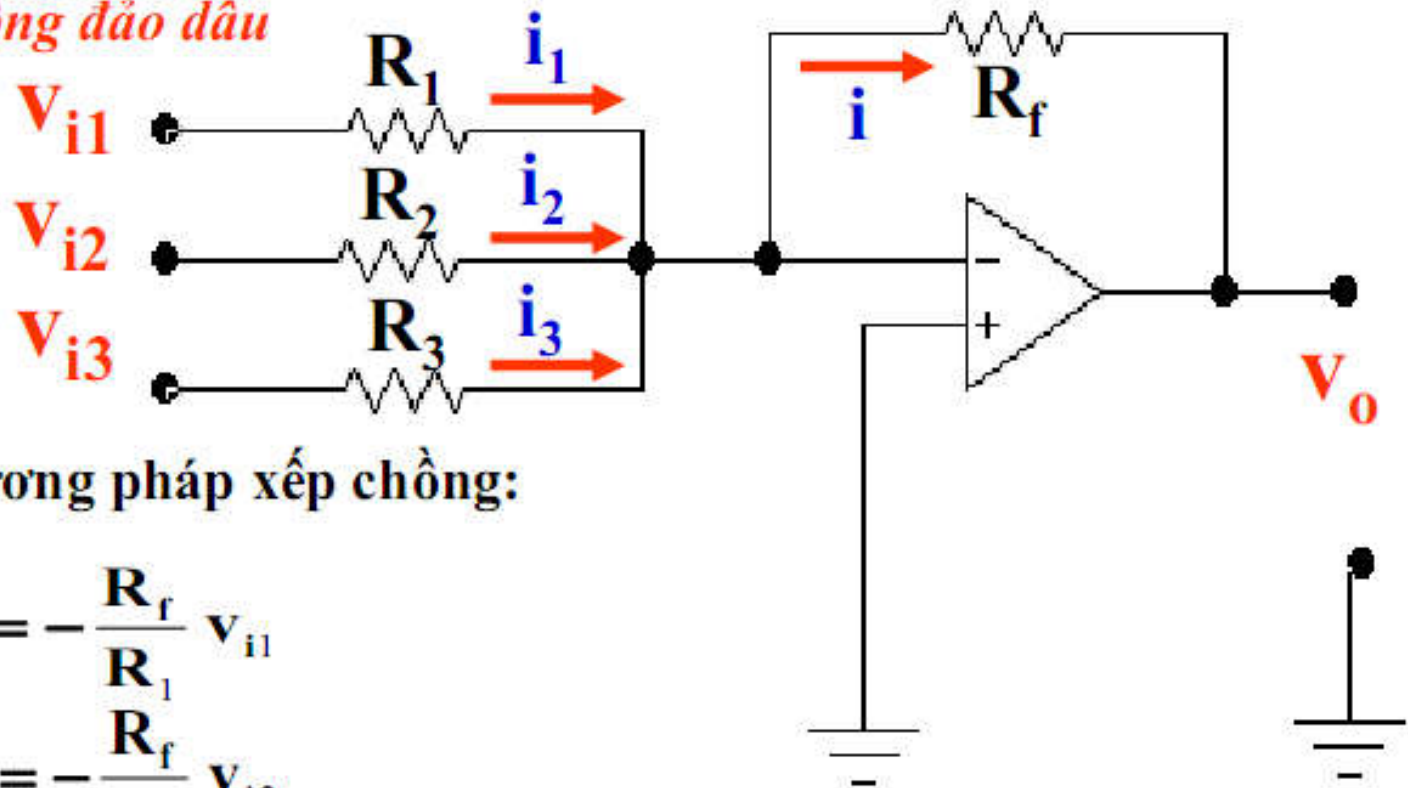


Calculate the output voltage of a noninverting amplifier for values of  $V_1 = 2 \text{ V}$ ,  $R_f = 500 \text{ k}\Omega$ , and  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ .

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_1 = \left(1 + \frac{500 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega}\right) (2 \text{ V}) = 6(2 \text{ V}) = +12 \text{ V}$$

## 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng

*\* Mạch cộng đảo dấu*



Dùng phương pháp xếp chồng:

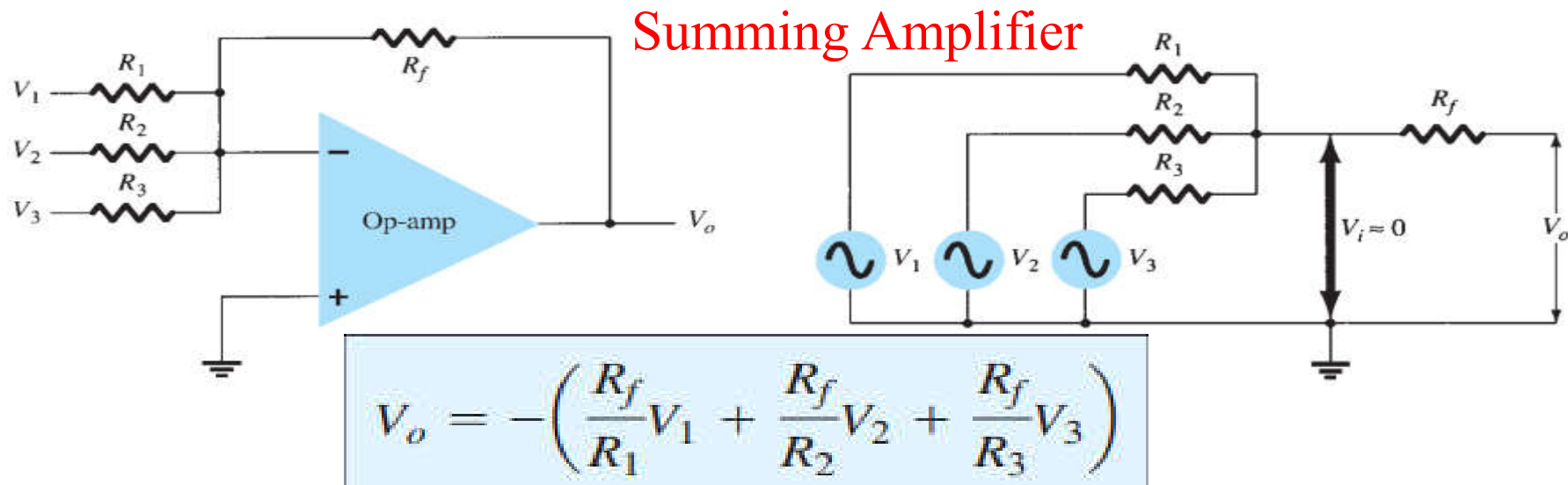
$$V_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} V_{i1}$$

$$V_{o2} = -\frac{R_f}{R_2} V_{i2}$$

$$V_{o3} = -\frac{R_f}{R_3} V_{i3}$$



## 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng



Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , ta có:

$$v_o = -\frac{R_f}{R}(v_{i1} + v_{i2} + v_{i3})$$

Và nếu  $R_f = R$ , ta có:

$$v_o = -(v_{i1} + v_{i2} + v_{i3})$$

## 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng

### Ví dụ

Calculate the output voltage of an op-amp summing amplifier for the following sets of voltages and resistors. Use  $R_f = 1 \text{ M}\Omega$  in all cases.

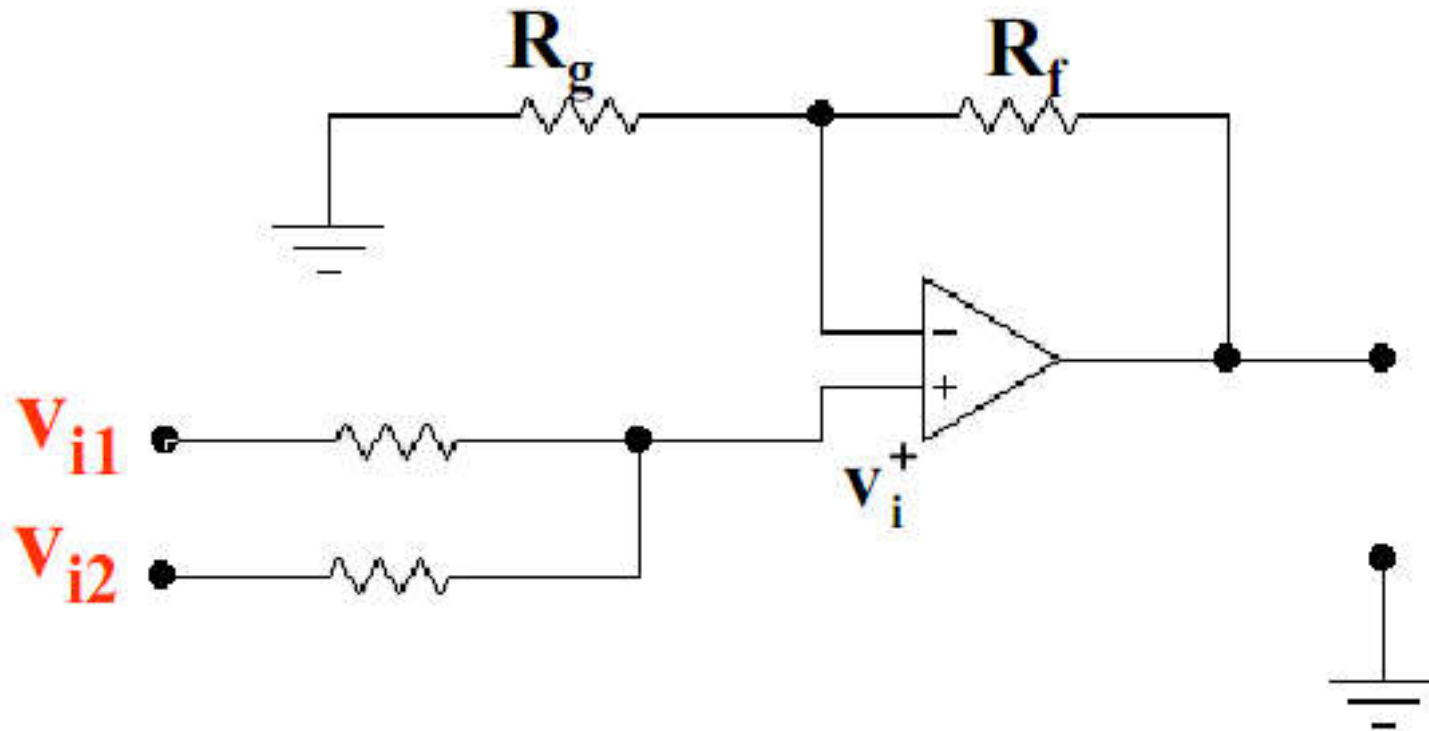
- a.  $V_1 = +1 \text{ V}$ ,  $V_2 = +2 \text{ V}$ ,  $V_3 = +3 \text{ V}$ ,  $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ .
- b.  $V_1 = -2 \text{ V}$ ,  $V_2 = +3 \text{ V}$ ,  $V_3 = +1 \text{ V}$ ,  $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ .

$$\begin{aligned} \text{a. } V_o &= - \left[ \frac{1000 \text{ k}\Omega}{500 \text{ k}\Omega} (+1 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+2 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+3 \text{ V}) \right] \\ &= -[2(1 \text{ V}) + 1(2 \text{ V}) + 1(3 \text{ V})] = \mathbf{-7 \text{ V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } V_o &= - \left[ \frac{1000 \text{ k}\Omega}{200 \text{ k}\Omega} (-2 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{500 \text{ k}\Omega} (+3 \text{ V}) + \frac{1000 \text{ k}\Omega}{1000 \text{ k}\Omega} (+1 \text{ V}) \right] \\ &= -[5(-2 \text{ V}) + 2(3 \text{ V}) + 1(1 \text{ V})] = \mathbf{+3 \text{ V}} \end{aligned}$$

### 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng

Mạch khuếch đại cộng không đảo dấu



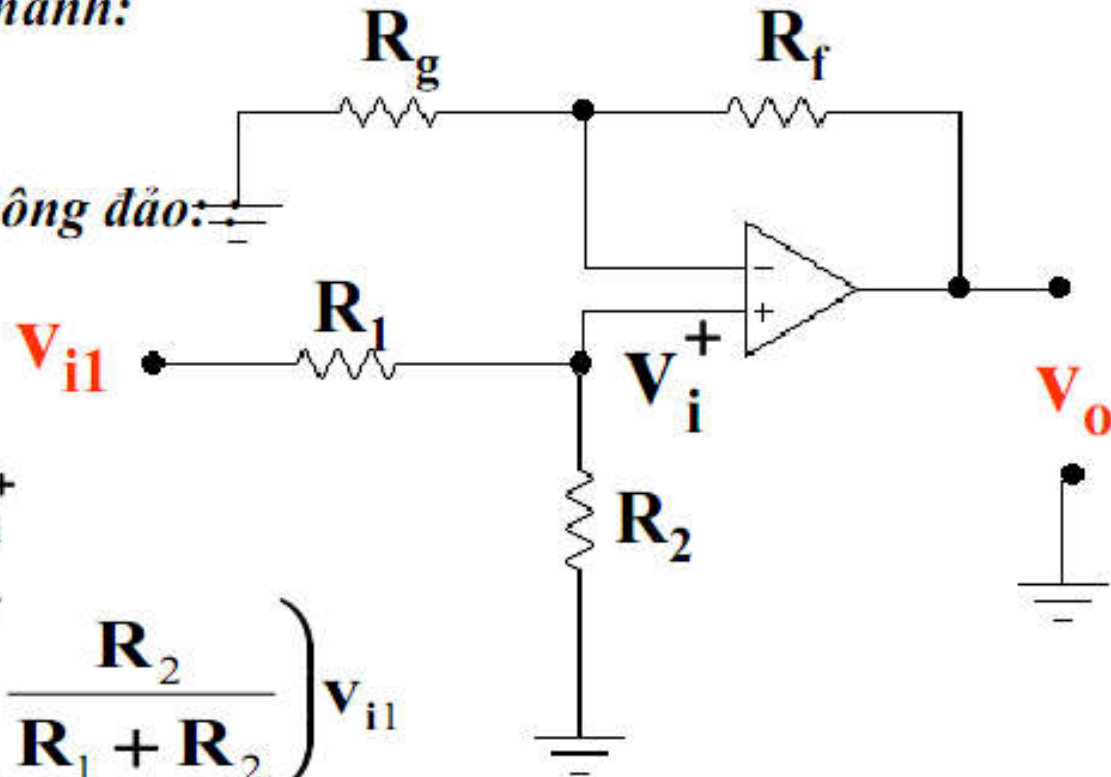
## 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng

### Mạch khuếch đại cộng không đảo dấu

Khi  $v_{i2} = 0$ , mạch trở thành:

Áp dụng công thức

của mạch khuếch đại không đảo:



$$V_{o1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) v_i^+$$

$$V_{o1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) v_{i1}$$

Tương tự:

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) v_{i2}$$

### 5.2.3. Mạch khuếch đại cộng

Mạch khuếch đại cộng không đảo dấu

$$\begin{aligned} V_o &= V_{o1} + V_{o2} \\ \Rightarrow v_o &= \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{i2} \right) \end{aligned}$$

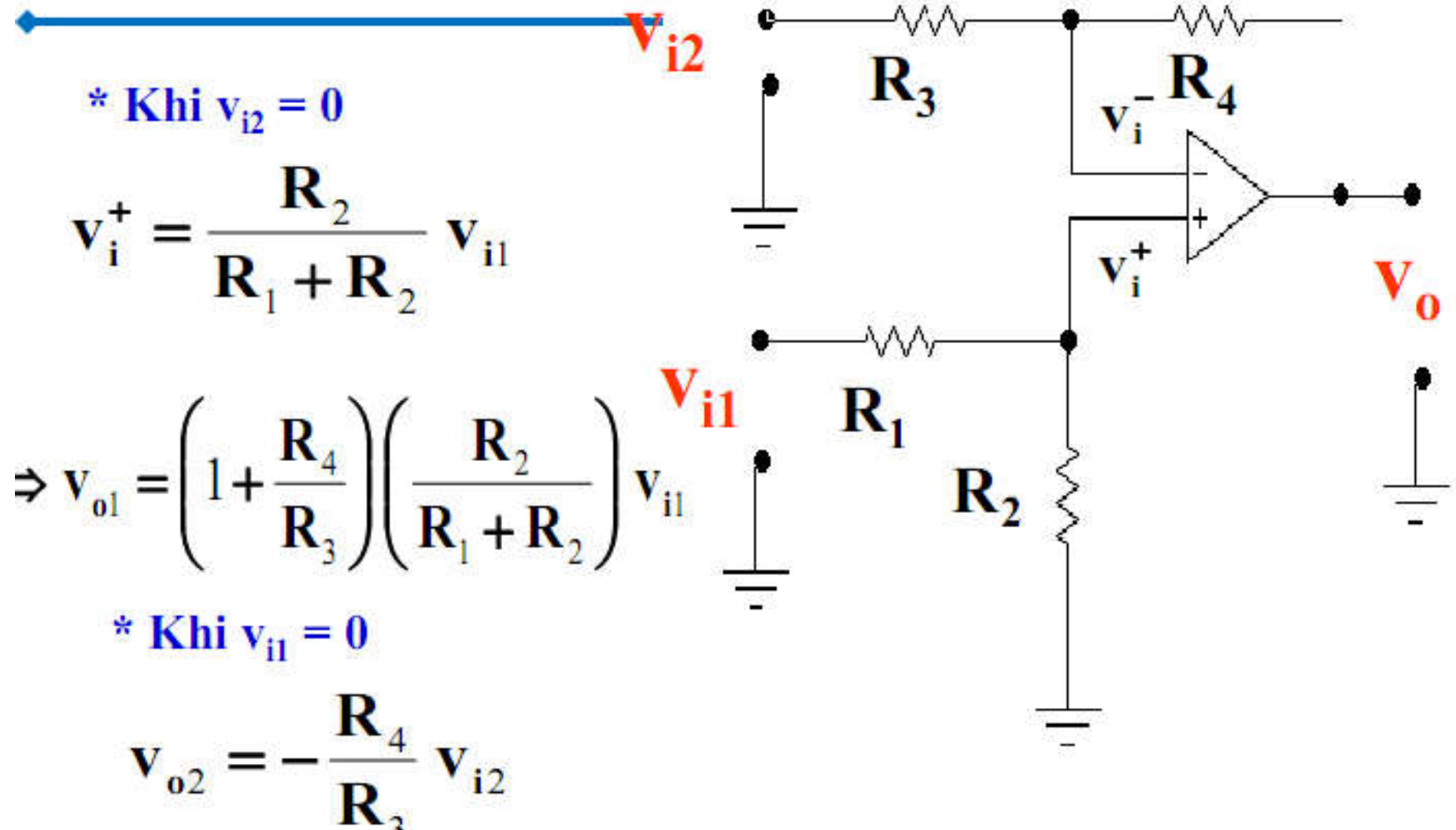
Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R$ , ta có:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left( \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} \right)$$

Và nếu  $R_f = R$ , ta có:

$$v_o = (v_{i1} + v_{i2})$$

### 5.2.3. Mạch khuếch đại trừ



### 5.2.3. Mạch khuếch đại trừ

Điện áp ở ngõ ra:  $V_o = V_{i1} + V_{i2}$

$$\Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) v_{i1} - \frac{R_4}{R_3} v_{i2}$$

$V_o$  có dạng:  $V_o = a_1 v_{i1} - a_2 v_{i2}$ , với:

$$a_1 = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) ; a_2 = \frac{R_4}{R_3}$$

$$\text{Hay : } a_1 = (1 + a_2) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) ; a_2 = \frac{R_4}{R_3}$$

$\Rightarrow$  Điều kiện để thực hiện được mạch này:  $(1 + a_2) > a_1$

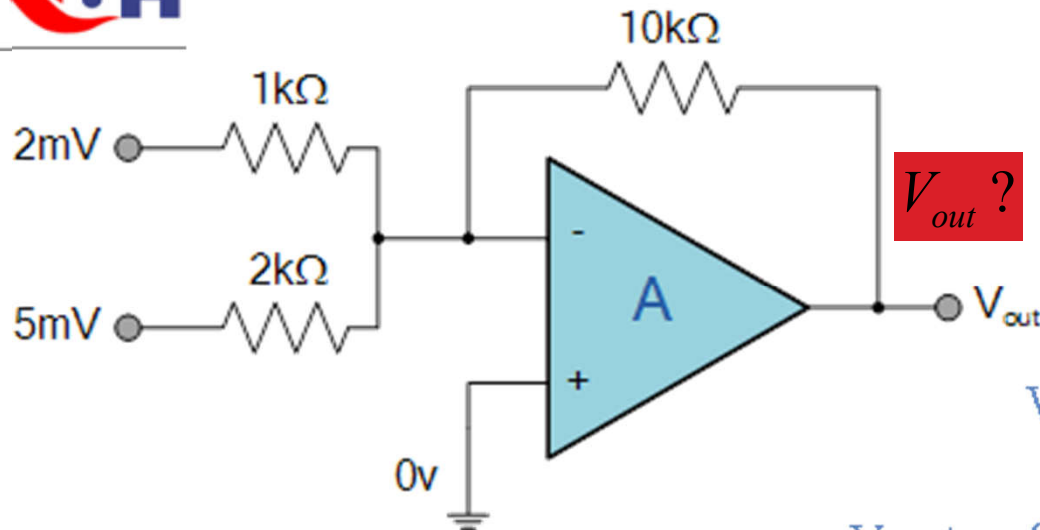
Nếu chọn  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , ta có:

$$V_o = V_{i1} - V_{i2}$$





## Example



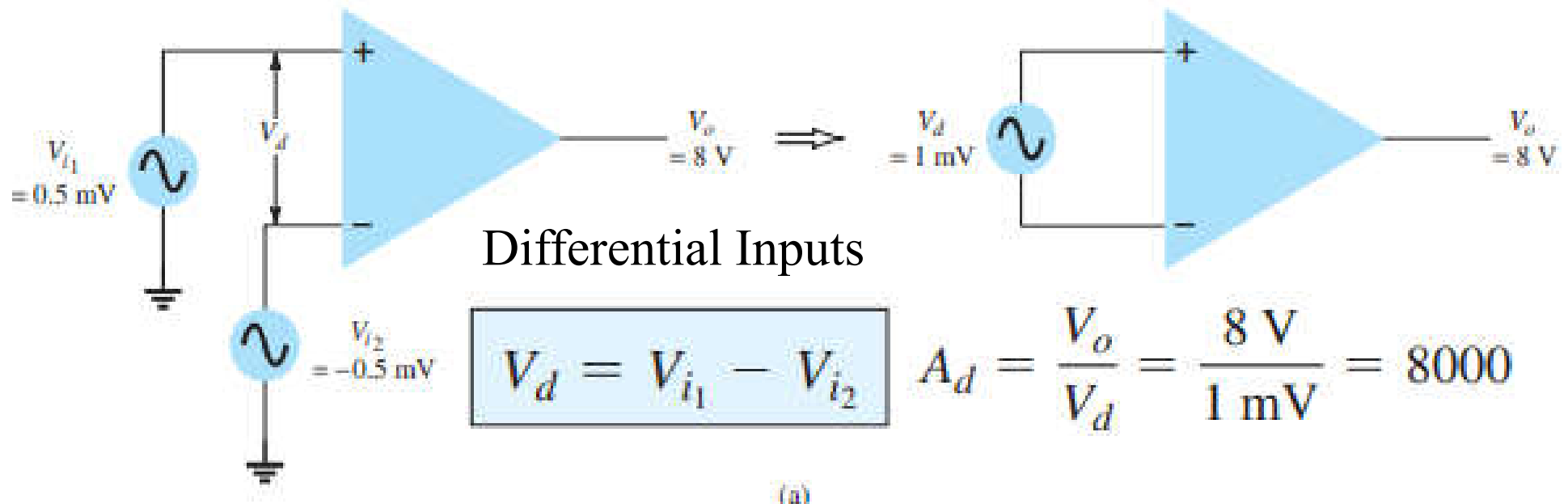
$$A_1 = \frac{10\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} = -10$$

$$A_2 = \frac{10\text{k}\Omega}{2\text{k}\Omega} = -5$$

$$V_{out} = (A_1 \times V_1) + (A_2 \times V_2)$$

$$V_{out} = (-10(2\text{mV})) + (-5(5\text{mV})) = -45\text{mV}$$

Tính toán CMRR cho các phép đo mạch được hiển thị trong Hình.

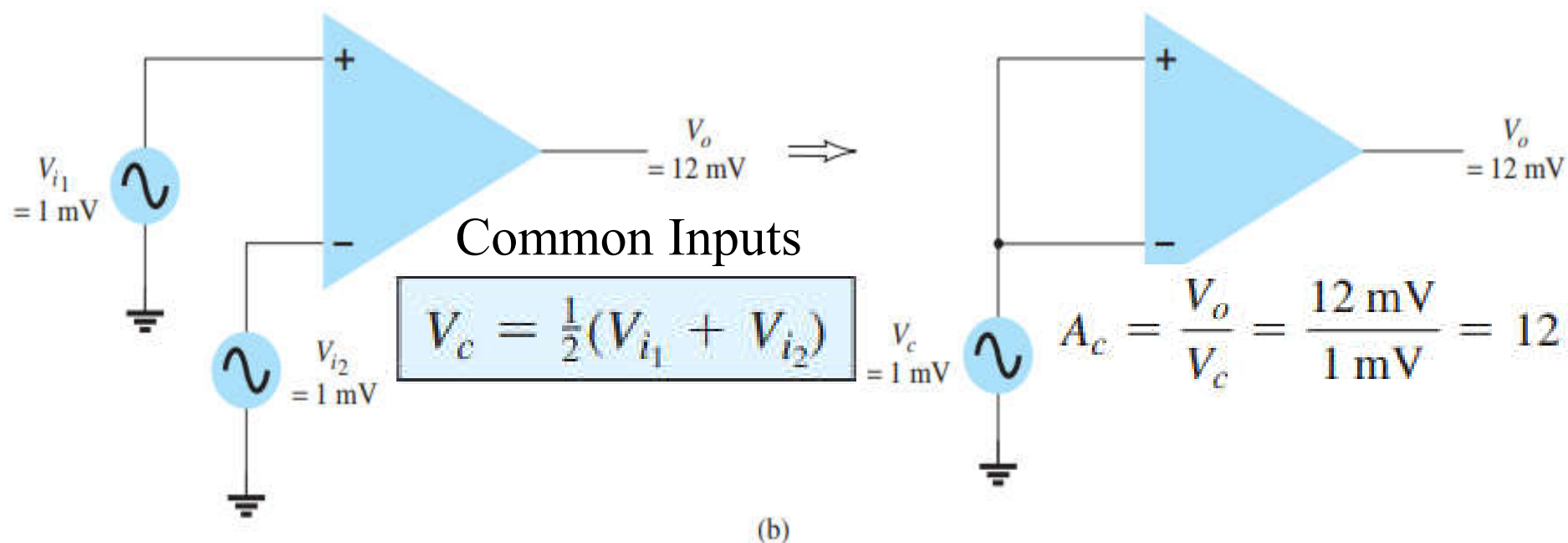






## Example

Tính toán CMRR cho các phép đo mạch được hiển thị trong Hình.



$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c} = \frac{8000}{12} = 666.7$$

$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} = 20 \log_{10} 666.7 = 56.48 \text{ dB}$$



## Output Voltage

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c$$

$V_d$  : Điện áp chênh lệch

$V_c$  : Điện áp chung

$A_d$  : Khuếch đại vi sai của bộ khuếch đại

$A_c$  : Khuếch đại chế độ chung của bộ khuếch đại

Chúng ta có thể biểu thị điện áp đầu ra theo giá trị của CMRR như sau:

$$V_o = A_d V_d \left( 1 + \frac{1}{\text{CMRR}} \frac{V_c}{V_d} \right)$$

EXAMPLE: Determine the output voltage of an op-amp for input voltages of  $V_{i_1} = 150 \mu\text{V}$  and  $V_{i_2} = 140 \mu\text{V}$ .  $A_d = 4000$  and the value of CMRR is: 100.

$$V_d = V_{i_1} - V_{i_2} = (150 - 140) \mu\text{V} = 10 \mu\text{V}$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = \frac{150 \mu\text{V} + 140 \mu\text{V}}{2} = 145 \mu\text{V}$$

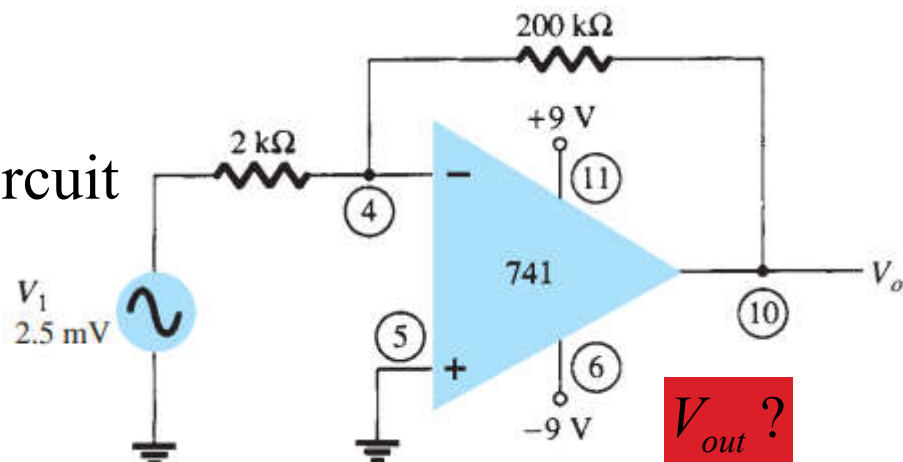
$$V_o = A_d V_d \left( 1 + \frac{1}{\text{CMRR}} \frac{V_c}{V_d} \right) = (4000)(10 \mu\text{V}) \left( 1 + \frac{1}{100} \frac{145 \mu\text{V}}{10 \mu\text{V}} \right) = 40 \text{ mV}(1.145) = 45.8 \text{ mV}$$



## Example

Determine the output voltage for the circuit

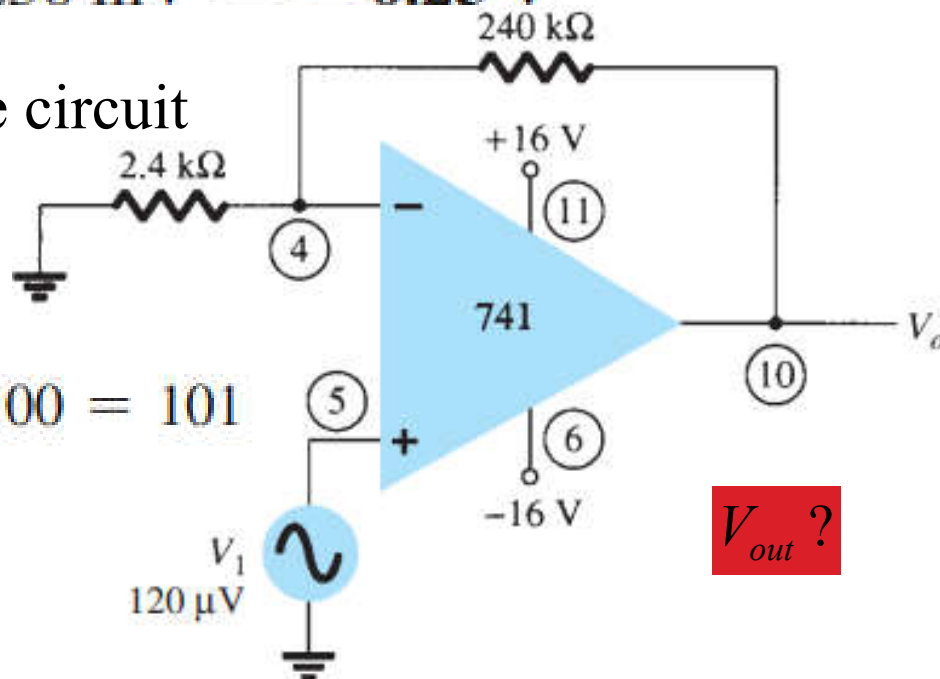
$$A = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{200 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega} = -100$$



$$V_o = AV_i = -100(2.5 \text{ mV}) = -250 \text{ mV} = -0.25 \text{ V}$$

Calculate the output voltage from the circuit

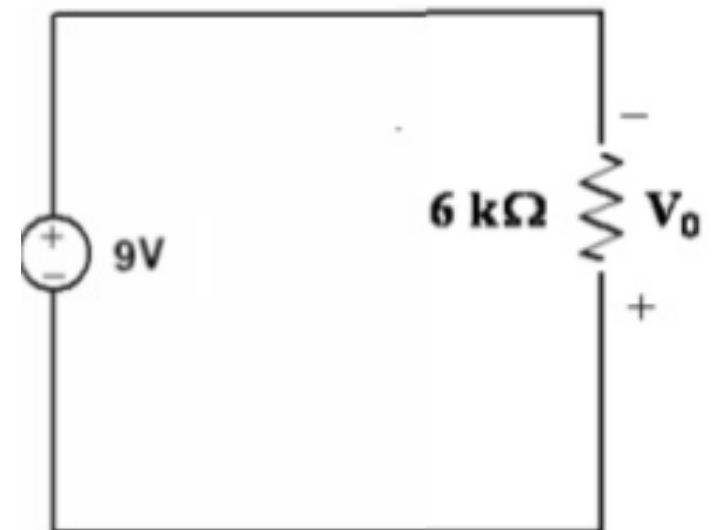
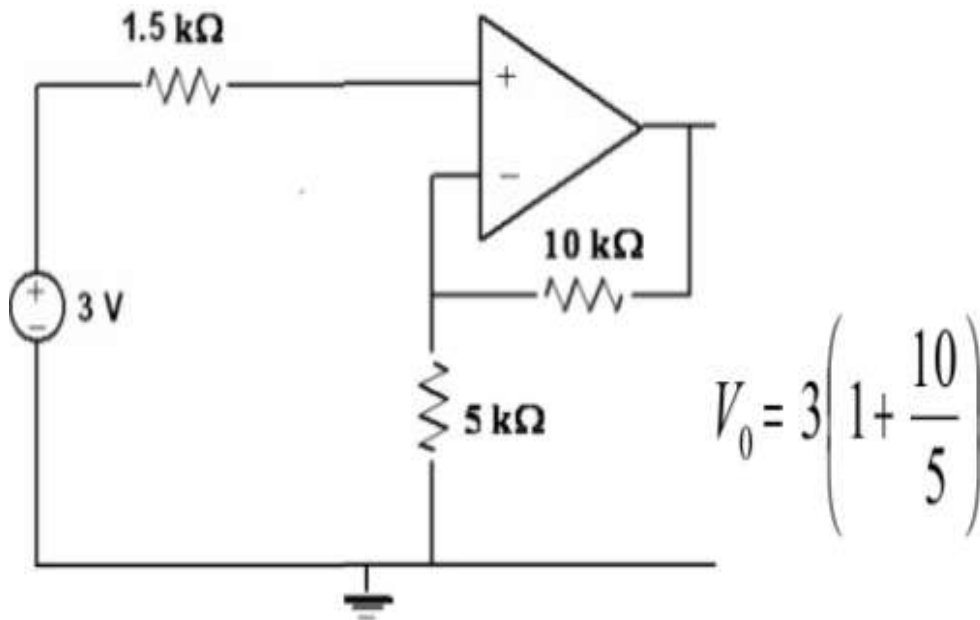
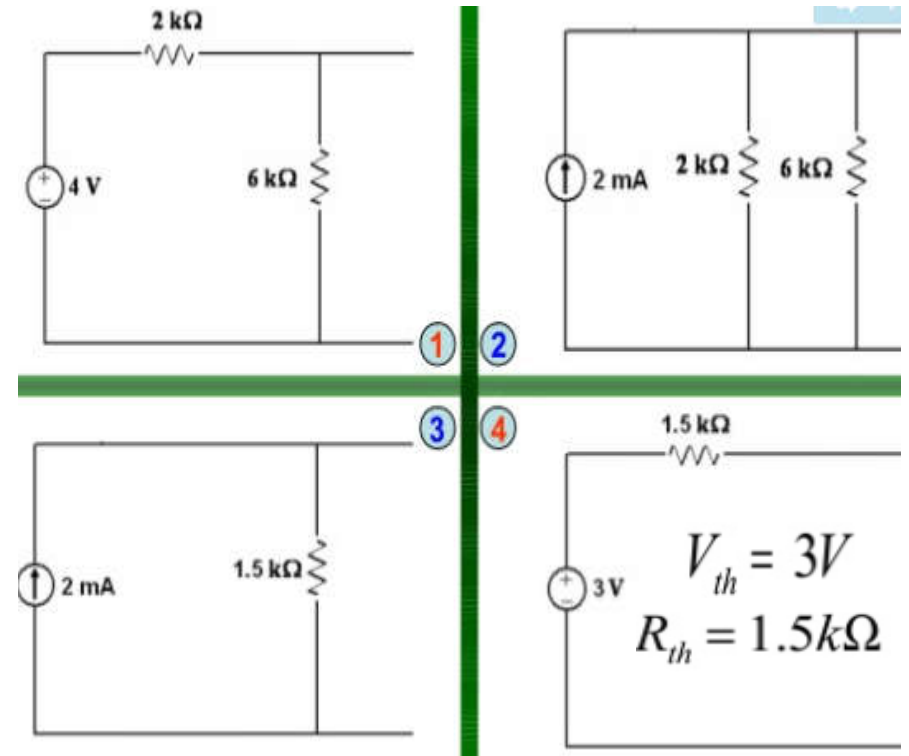
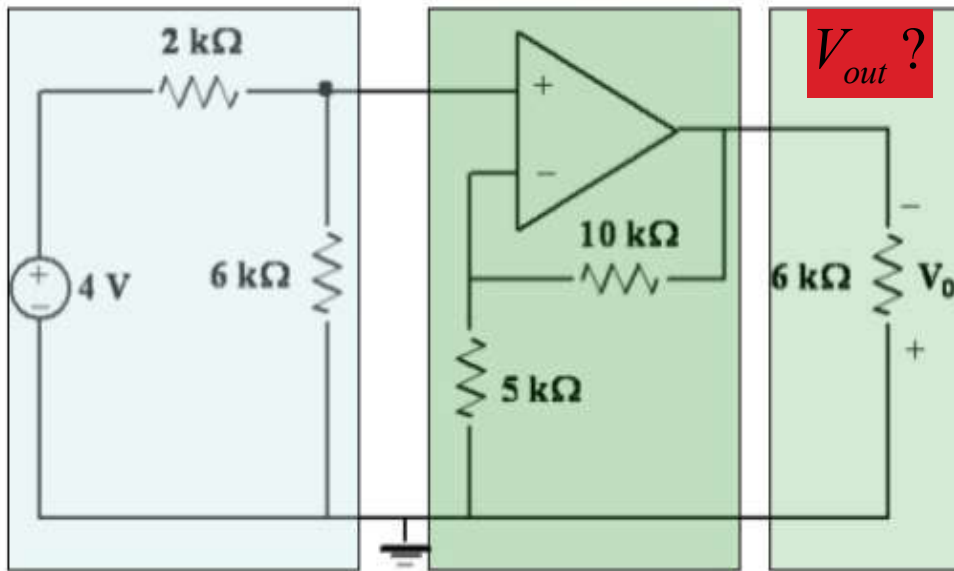
$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{240 \text{ k}\Omega}{2.4 \text{ k}\Omega} = 1 + 100 = 101$$



$$V_o = AV_i = 101(120 \mu\text{V}) = 12.12 \text{ mV}$$



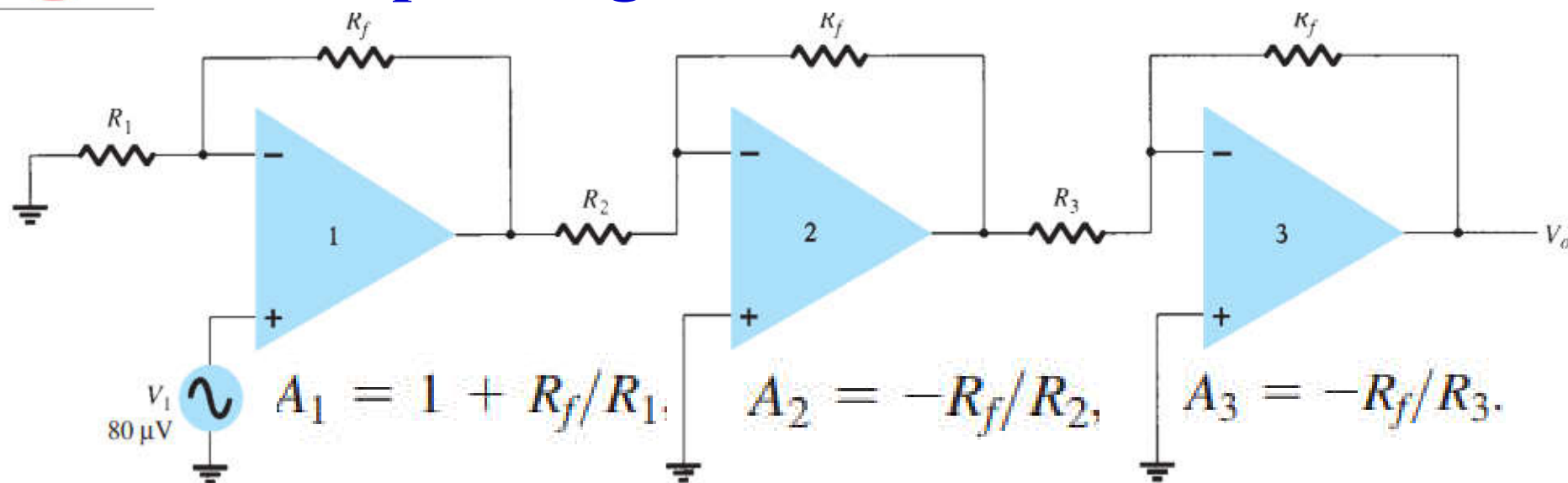
# Example





## Multiple-Stage Gains

$$A = A_1 A_2 A_3$$



Calculate the output voltage using the circuit of Fig

$R_f = 470 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 4.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$ , and  $R_3 = 33 \text{ k}\Omega$

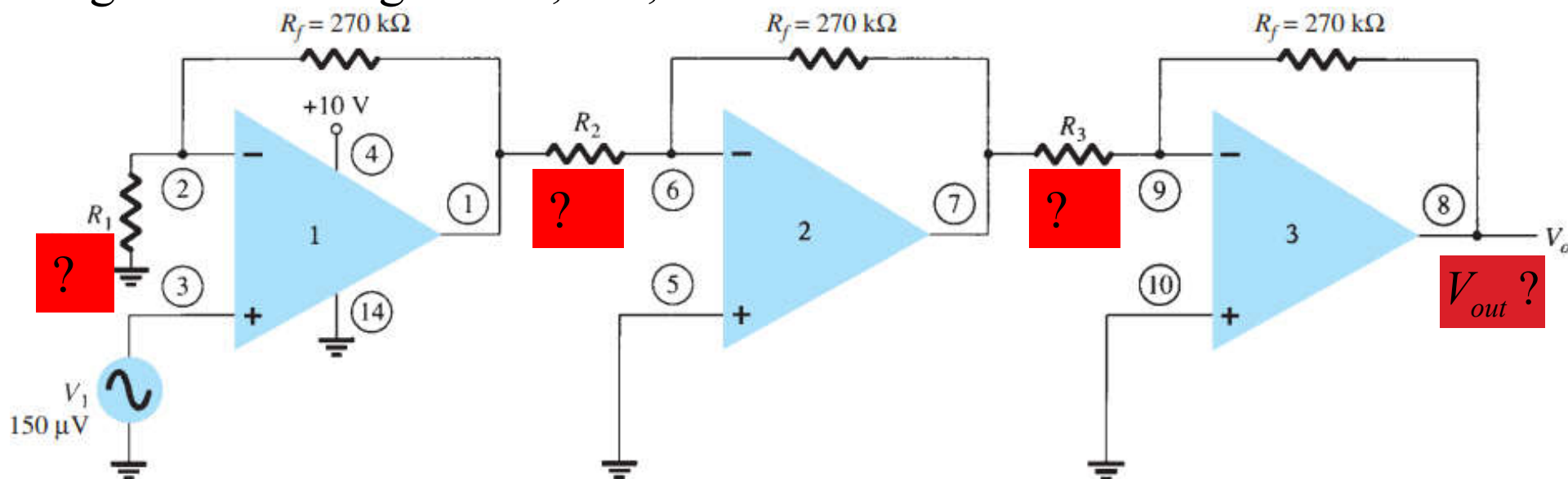
$$\begin{aligned} A &= A_1 A_2 A_3 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(-\frac{R_f}{R_2}\right) \left(-\frac{R_f}{R_3}\right) \\ &= \left(1 + \frac{470 \text{ k}\Omega}{4.3 \text{ k}\Omega}\right) \left(-\frac{470 \text{ k}\Omega}{33 \text{ k}\Omega}\right) \left(-\frac{470 \text{ k}\Omega}{33 \text{ k}\Omega}\right) \\ &= (110.3)(-14.2)(-14.2) = 22.2 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$V_o = A V_i = 22.2 \times 10^3 (80 \mu\text{V}) = \mathbf{1.78 \text{ V}}$$



## Multiple-Stage Gains

Hiện thị kết nối của một bộ ba op-amp LM124 như một bộ khuếch đại ba tầng với mức tăng là +10, -18, and -27.



$$A_1 = 1 + \frac{R_f}{R_1} = +10$$

$$\frac{R_f}{R_1} = 10 - 1 = 9$$

$$R_1 = \frac{R_f}{9} = \frac{270 \text{ k}\Omega}{9} = 30 \text{ k}\Omega$$

$$A_2 = -\frac{R_f}{R_2} = -18$$

$$R_2 = \frac{R_f}{18} = \frac{270 \text{ k}\Omega}{18} = 15 \text{ k}\Omega$$

$$A_3 = -\frac{R_f}{R_3} = -27$$

$$R_3 = \frac{R_f}{27} = \frac{270 \text{ k}\Omega}{27} = 10 \text{ k}\Omega$$

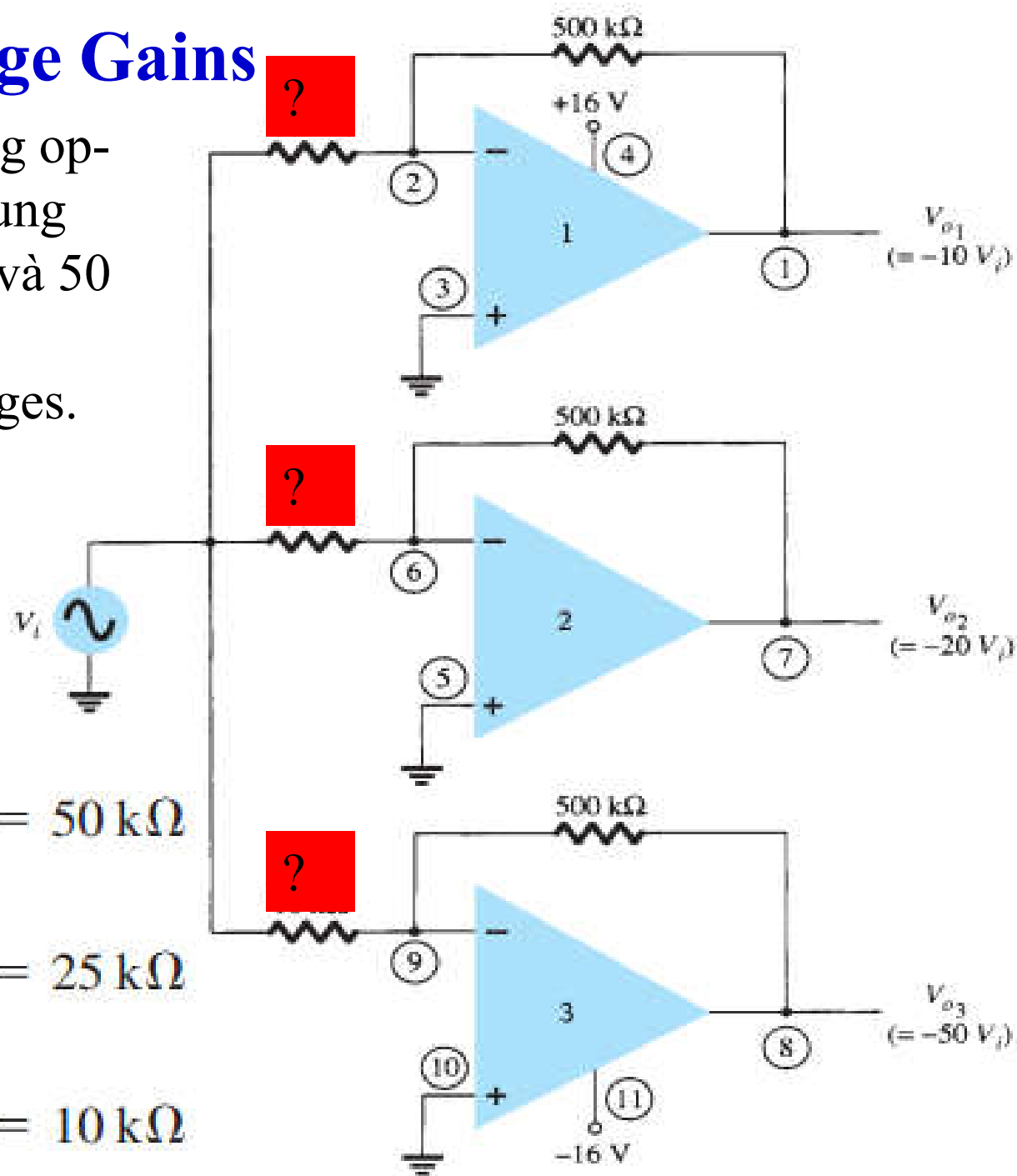
$$V_o = A_1 A_2 A_3 V_1$$
$$= \mathbf{0.729 \text{ V}}$$



## Multiple-Stage Gains

Hiện thị kết nối của ba tầng op-amp bằng IC LM348 để cung cấp đầu ra lớn hơn 10, 20 và 50 lần so với đầu vào. Use a feedback resistor in all stages.

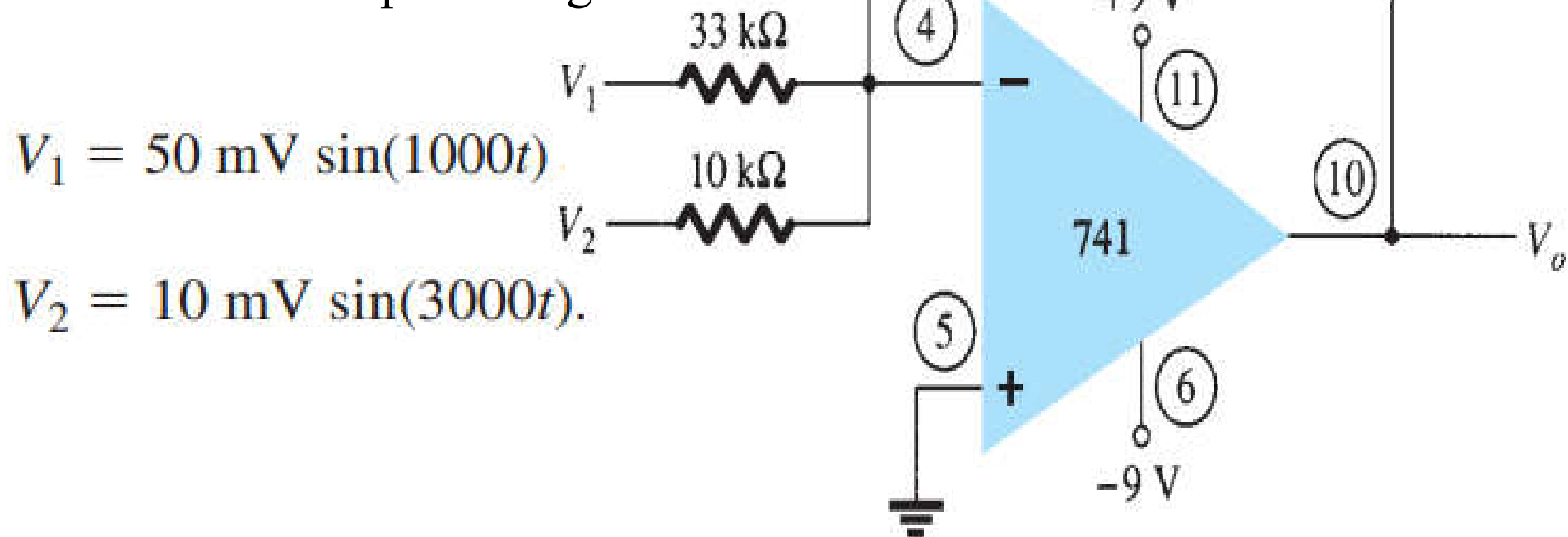
$$R_1 = -\frac{R_f}{A_1} = -\frac{500 \text{ k}\Omega}{-10} = 50 \text{ k}\Omega$$
$$R_2 = -\frac{R_f}{A_2} = -\frac{500 \text{ k}\Omega}{-20} = 25 \text{ k}\Omega$$
$$R_3 = -\frac{R_f}{A_3} = -\frac{500 \text{ k}\Omega}{-50} = 10 \text{ k}\Omega$$





## VOLTAGE SUMMING

Calculate the output voltage.



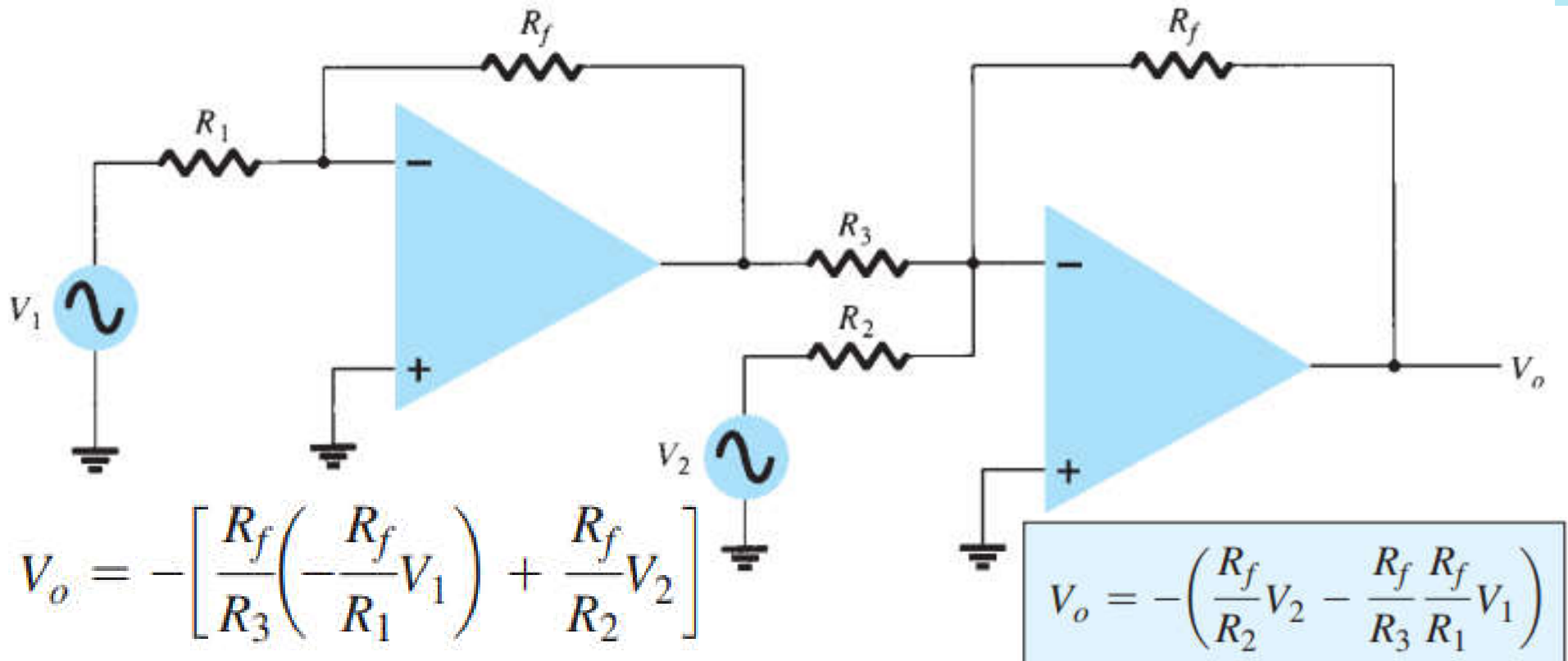
$$\begin{aligned} V_o &= -\left( \frac{330 \text{ k}\Omega}{33 \text{ k}\Omega} V_1 + \frac{330 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} V_2 \right) = -(10 V_1 + 33 V_2) \\ &= -[10(50 \text{ mV}) \sin(1000t) + 33(10 \text{ mV}) \sin(3000t)] \\ &= -[0.5 \sin(1000t) + 0.33 \sin(3000t)] \end{aligned}$$





## Voltage Subtraction

Phép trừ điện áp: Hai tín hiệu có thể được trừ với nhau theo một số cách.



Determine the output for the circuit

$R_f = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ , and  $R_3 = 500 \text{ k}\Omega$ .

$$V_o = -\left(\frac{1 \text{ M}\Omega}{50 \text{ k}\Omega}V_2 - \frac{1 \text{ M}\Omega}{500 \text{ k}\Omega} \frac{1 \text{ M}\Omega}{100 \text{ k}\Omega}V_1\right) = -(20 V_2 - 20 V_1) = -20(V_2 - V_1)$$

