



มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
Nakhon Pathom Rajabhat University

Lecture 8 Op-amp

Thawatchai Thongleam

Program in Electronics Engineering

Faculty of Science and Technology

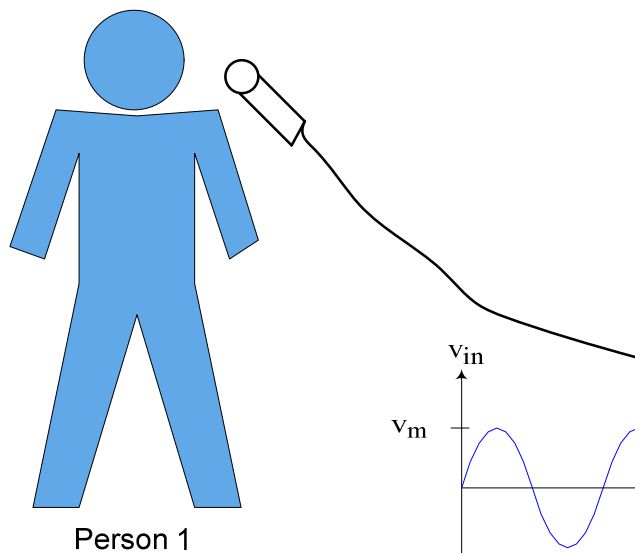
Nakhon Pathom Rajabhat University

Outline

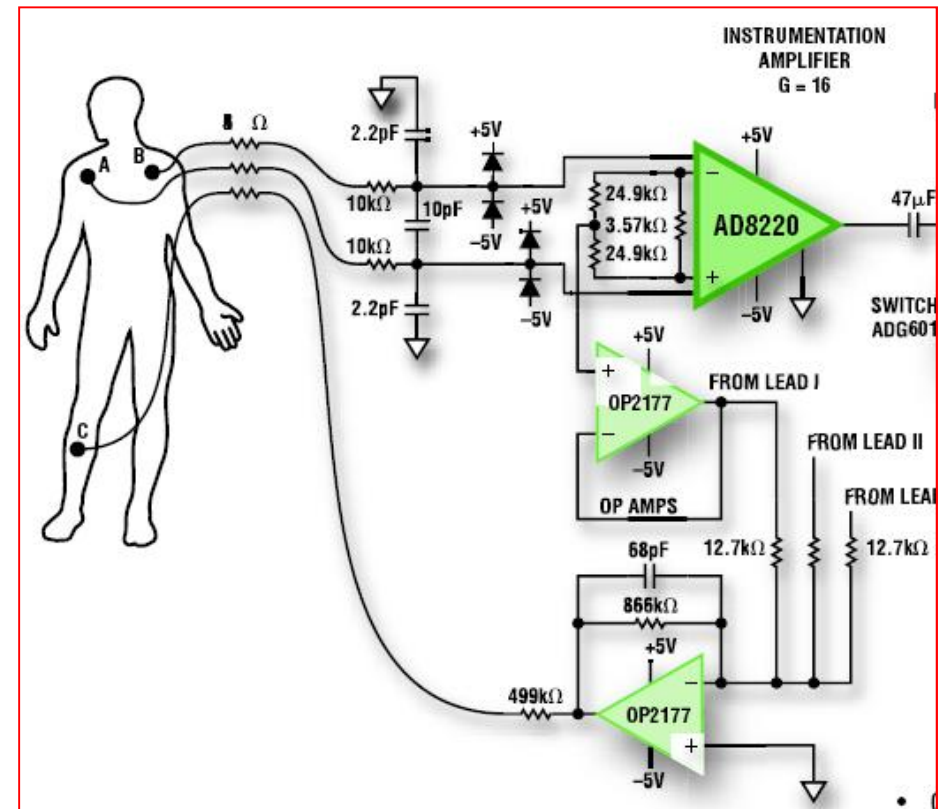
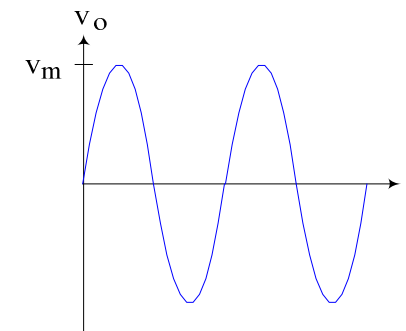
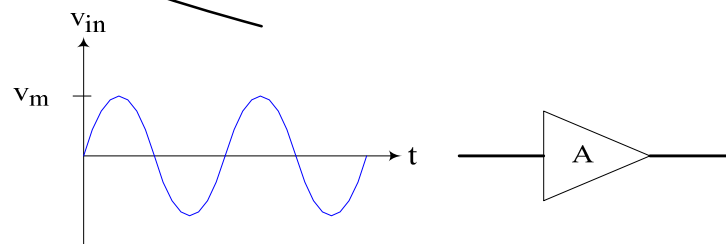
- Introduction of Op-Amp
- Op-amp device
- Op-amp terminals
- Op-amp equivalent circuit
- Op-amp characteristic
- Op-amp base Circuits
 - Inverting amplifier
 - Non-inverting amplifier
 - Buffer
 - Voltage adder
 - Differential amplifier
 - Instrument amplifier

8.1 Introduction

- Amplifier voice signal
- Amplifier heart signal
- Analog signal processing
- Active filter circuits



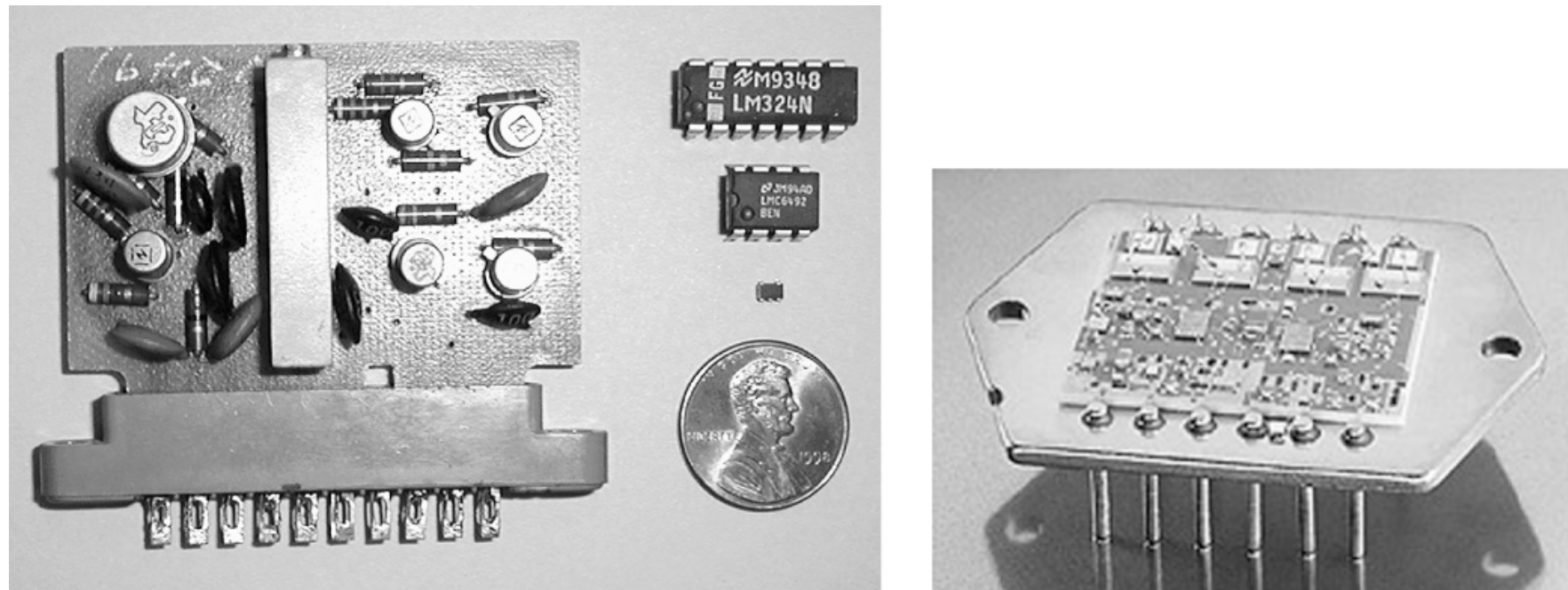
ภาพที่ 8.2 Amplifier voice signal



ภาพที่ 8.1 Amplifier body signal system

8.2 Op-amp device

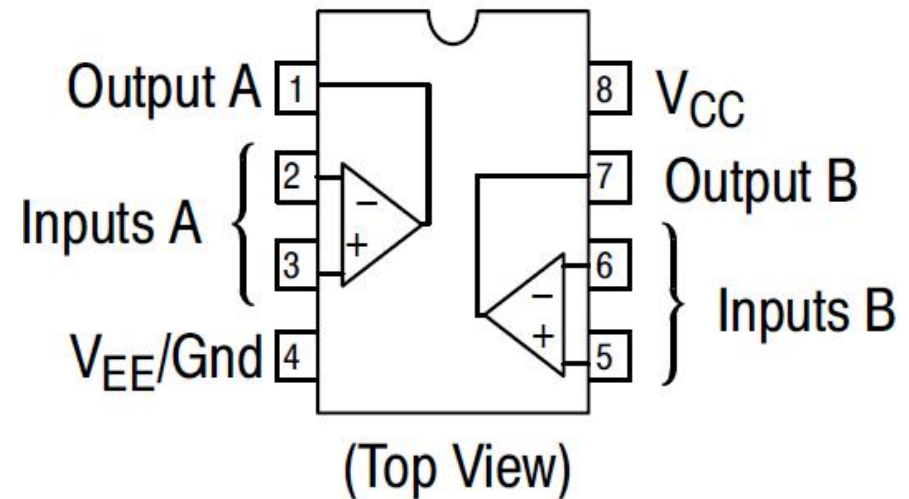
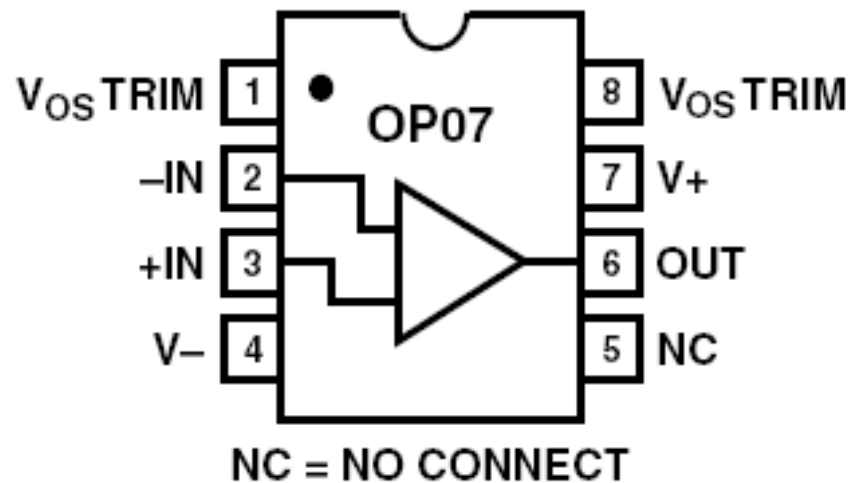
- The linearity of op-amp is due to the elaborate circuitry.



ภาพที่ 8.3 Internal of op-amp circuit

8.2 Op-amp devices (con)

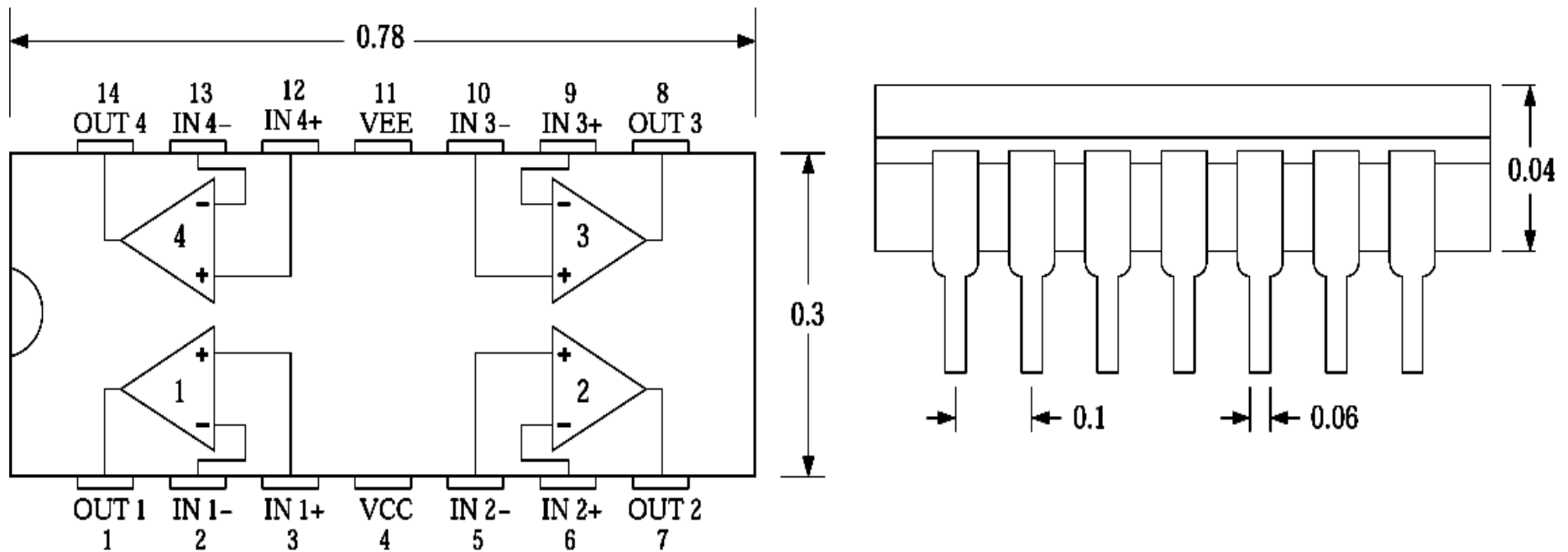
- Dual in Line Packaging (DIP)



ภาพที่ 8.4 Packaging (DIP) Op-Amp

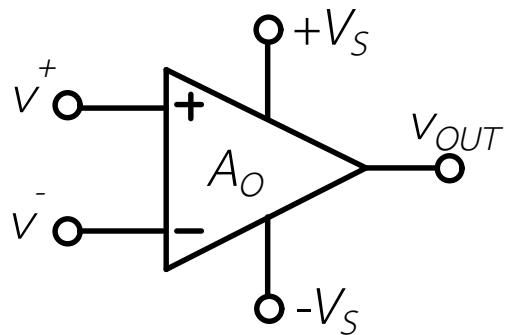
8.3 Op-amp device (con)

- Pin outs

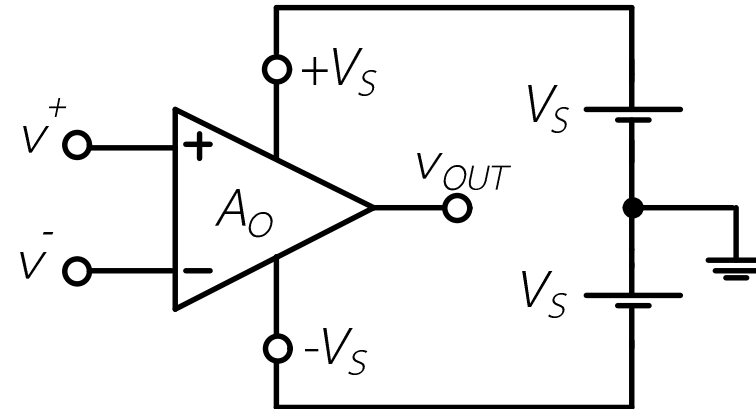


ภาพที่ 8.5 Packaging (DIP) op-amp

8.4 Op-amp terminals



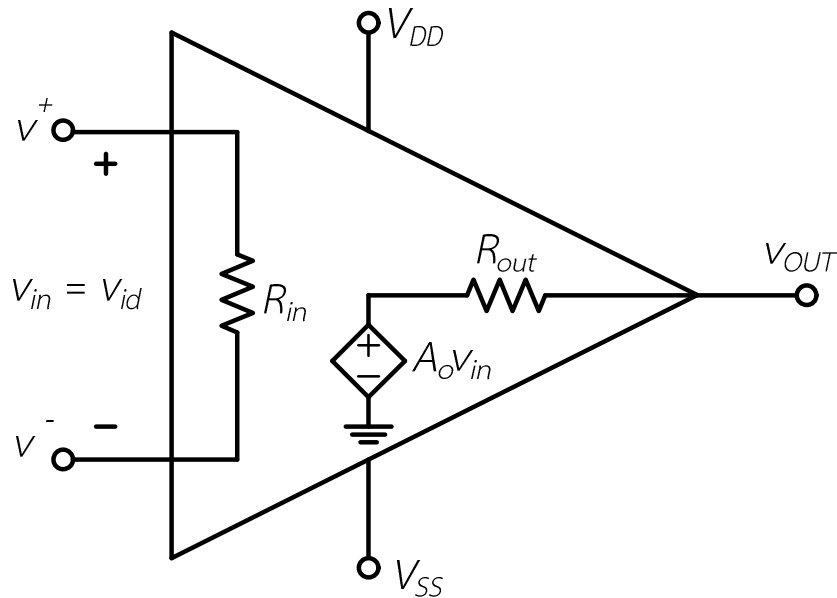
(ก)



(ข)

ภาพที่ 8.6 (ก) symbol และ (ข) supply connection

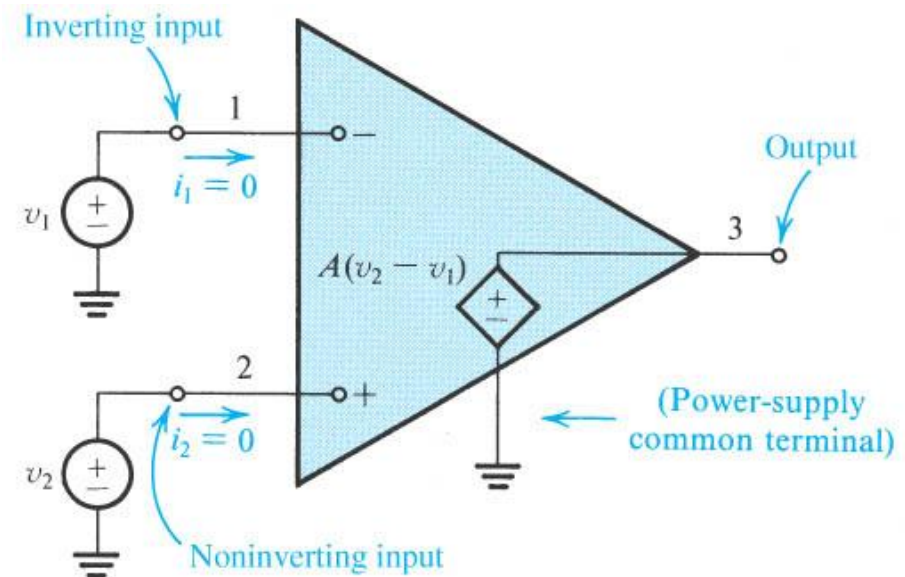
8.5 Op-amp equivalent circuit



ภาพที่ 8.7 Equivalent circuit of the op amp.

- Output voltage is given by

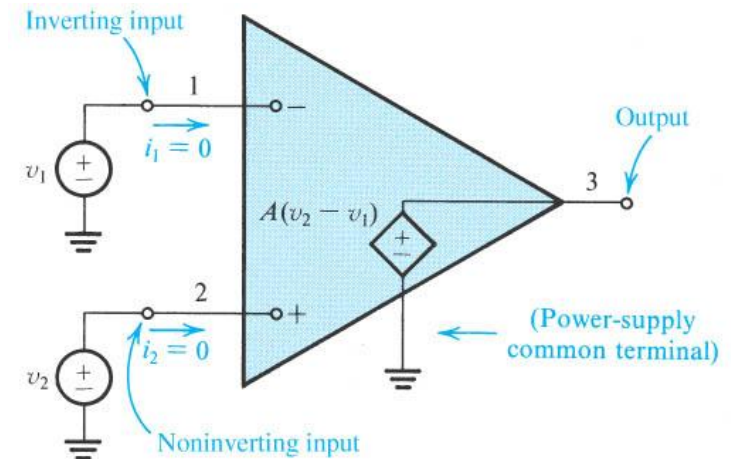
$$V_{OUT} = A_o \left(v^{(+)} - v^{(-)} \right)$$



ภาพที่ 8.8 Equivalent circuit of the ideal op-amp.

8.6 The Ideal op-amp characteristic

- High input impedance (R_{in})
- Input current is equal to zero
- Output impedance closed to zero (R_{out})
- Very high open loop gain (A_o)
- High common-mode rejection (CMRR)
- High gain bandwidth product (GBW)
- Since negative feedback, $v^{(+)} = v^{(-)}$



ภาพที่ 8.9 Equivalent circuit of the ideal op-amp

8.7 Op-Amp Base Circuits

- Inverting amplifier
- Non-inverting amplifier
- Buffer
- Voltage adder
- Difference amplifier
- Instrument amplifier

8.7.1 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting amplifier)

- หาค่าอัตราขยาย (A_V) ของวงจร
- เงื่อนไขออปแอมป์อุดมคติ

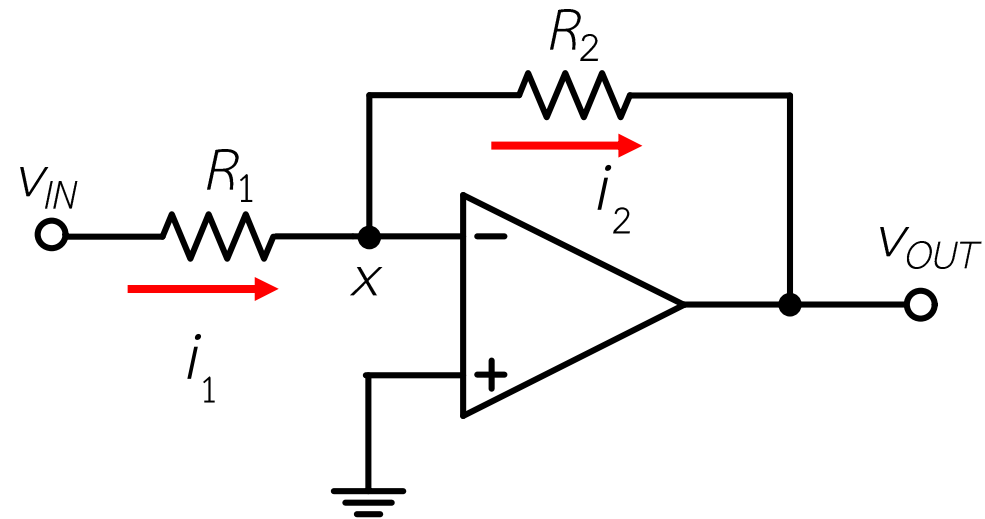
$$i_+ = i_- = 0$$

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{V_{IN} - V_{(-)}}{R_1} = \frac{V_{(-)} - V_{OUT}}{R_2}$$

$$V_+ = V_- = 0$$

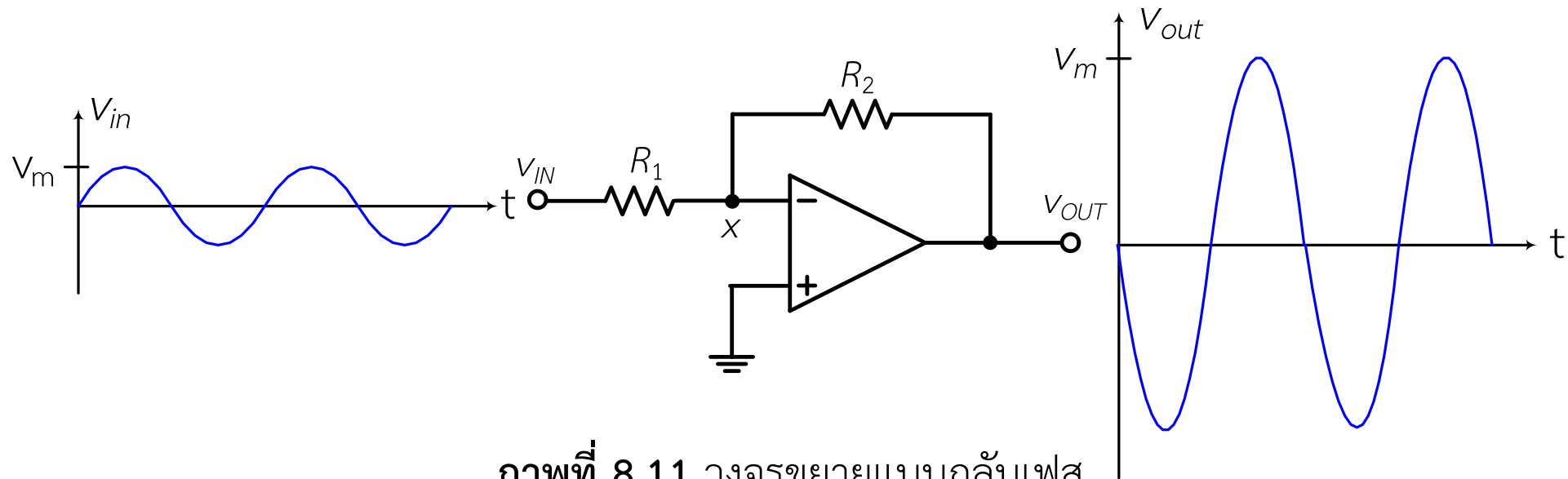
$$\frac{V_{IN}}{R_1} = -\frac{V_{OUT}}{R_2}$$



ภาพที่ 8.10 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

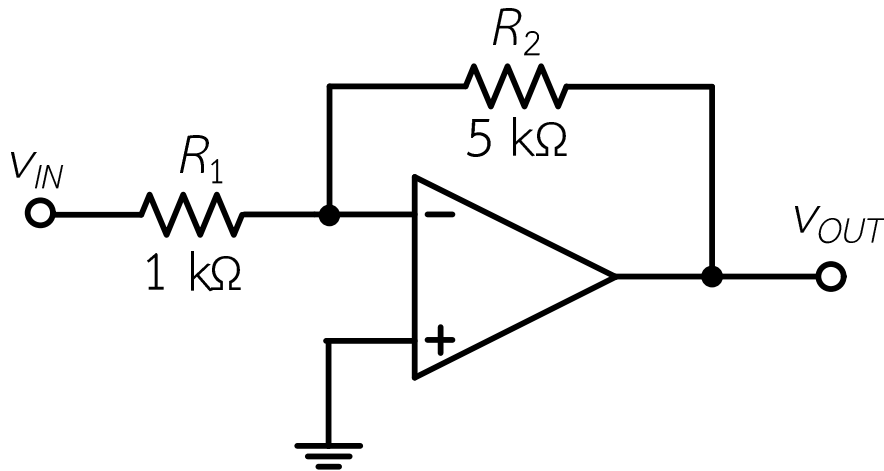
8.7.1 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting amplifier)



ภาพที่ 8.11 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$V_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} V_{IN}$$

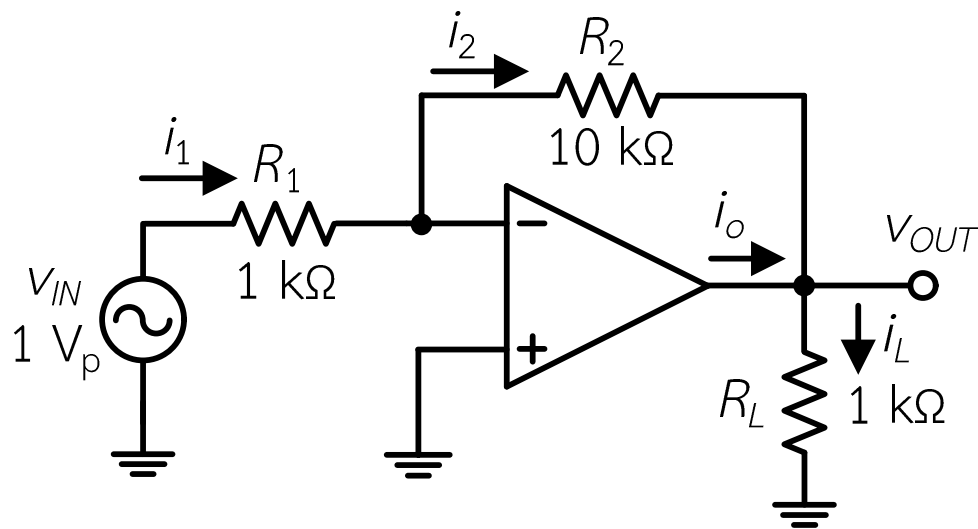
ตัวอย่างที่ 8.1 กำหนดให้ $v_{in} = 1 V_p$ ให้หาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายในภาพที่ 8.12



ภาพที่ 8.12 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= -\frac{R_2}{R_1} V_{IN} \\
 &= -\frac{5\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \times 1V_p \\
 &= -5V_p
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 8.2 ให้หาค่ากระแสที่อินพุต กระแสที่ไหลผ่านโหลด (i_L) และหาค่าแรงดันที่เอาต์พุต



ภาพที่ 8.13 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= -\frac{R_2}{R_1} V_{IN} \\
 &= -\frac{10\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \times 1\text{V}_p \\
 &= -10\text{V}_p
 \end{aligned}$$

$$i_L = \frac{-10\text{V}_p}{1\text{k}\Omega} = -10\text{mA}$$

8.7.2 วงจรขยายไม่กลับเฟส Non-inverting amplifier

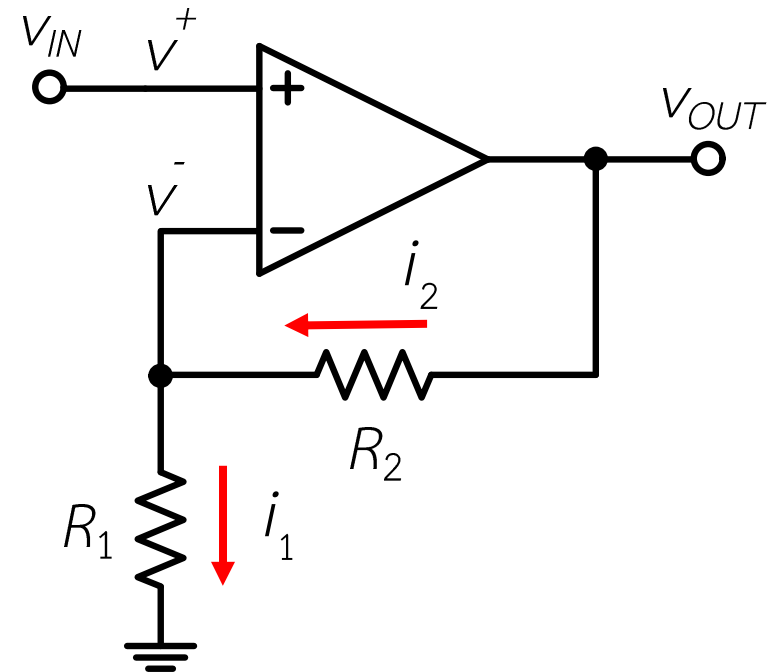
■ หาอัตราขยาย A_v

$$i_1 = i_2$$

$$V_{(-)} = \frac{R_1 V_{OUT}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{IN} = V_+ = V_-$$

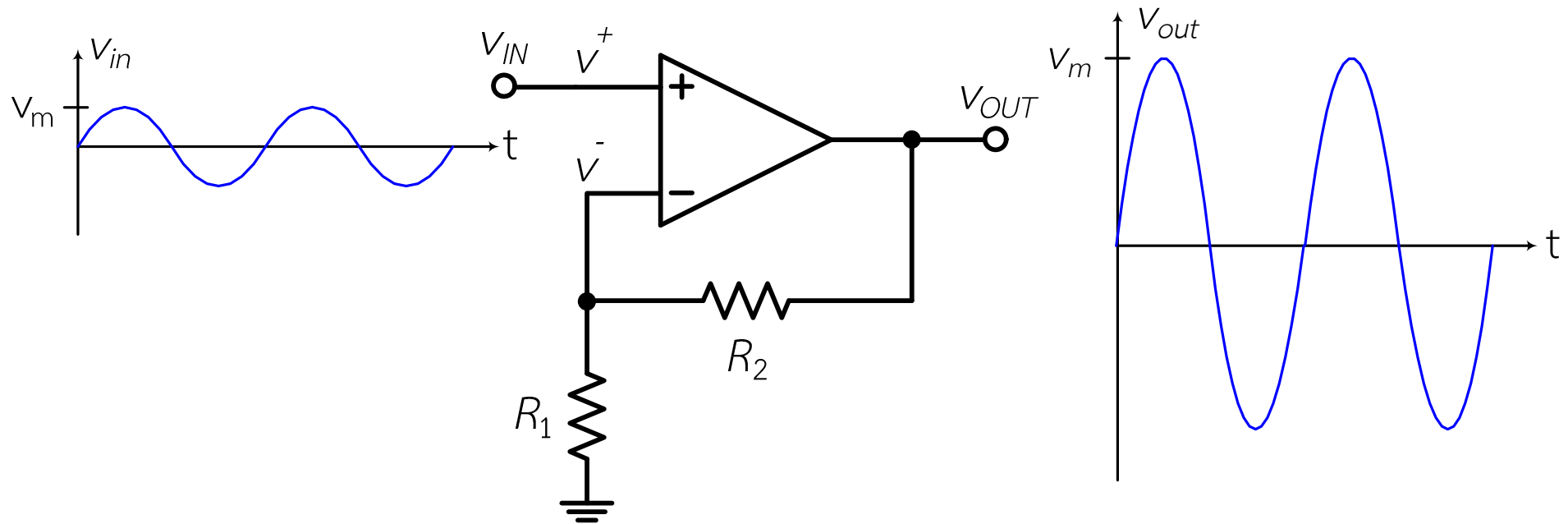
$$V_{IN} = \frac{R_1 V_{OUT}}{R_1 + R_2}$$



ภาพที่ 8.14 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

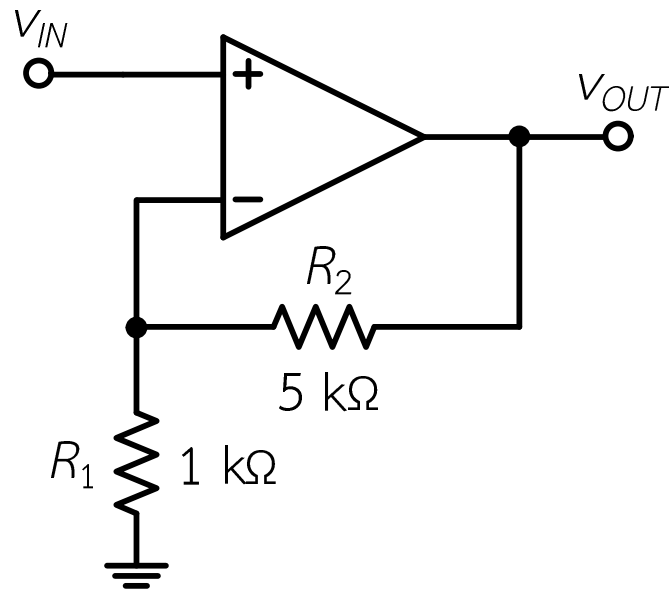
8.7.2 วงจรขยายไม่กลับเฟส (non-inverting amplifier)



ภาพที่ 8.15 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IN}$$

ตัวอย่างที่ 8.3 กำหนดให้ $v_{in} = 1 V_p$ ให้หาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายในภาพที่ 8.16



ภาพที่ 8.16 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IN} \\
 &= \left(1 + \frac{5\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \right) \times 1V_p \\
 &= 6V_p
 \end{aligned}$$

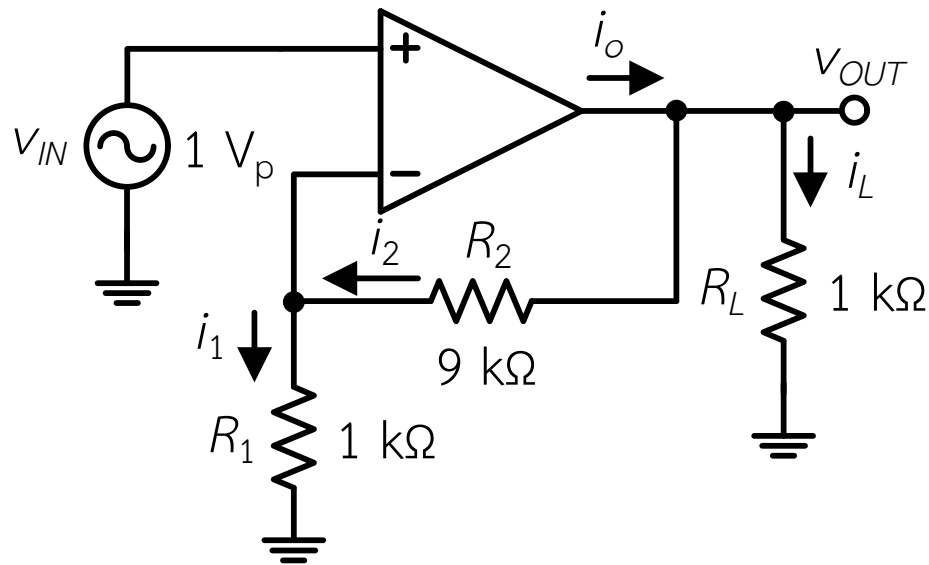


ตัวอย่างที่ 8.4 กำหนดให้ $v_{in} = 5 V_p$ และ $V_S = +/- 12 V$ ให้หาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายในภาพที่ 8.16

$$\begin{aligned}V_{OUT} &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IN} \\ &= \left(1 + \frac{5k\Omega}{1k\Omega} \right) \times 5V_p \\ &= 30V_p\end{aligned}$$

เนื่องจากไฟเลี้ยงของออปแอมป์มีเท่ากับ $+/- 12 V$ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์มีค่าประมาณ $12 V$

ตัวอย่างที่ 8.5 ให้หาค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด (i_L) และหาค่าแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

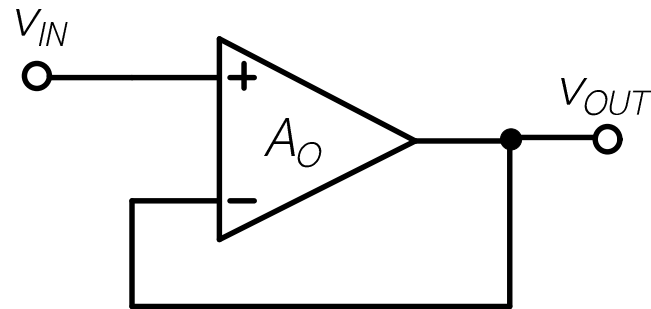


$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IN} \\
 &= \left(1 + \frac{9\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \right) \times 1V_p \\
 &= 10V_p
 \end{aligned}$$

ภาพที่ 8.17 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

$$i_L = \frac{10V_p}{1\text{k}\Omega} = 10\text{mA}$$

8.7.3 Buffer

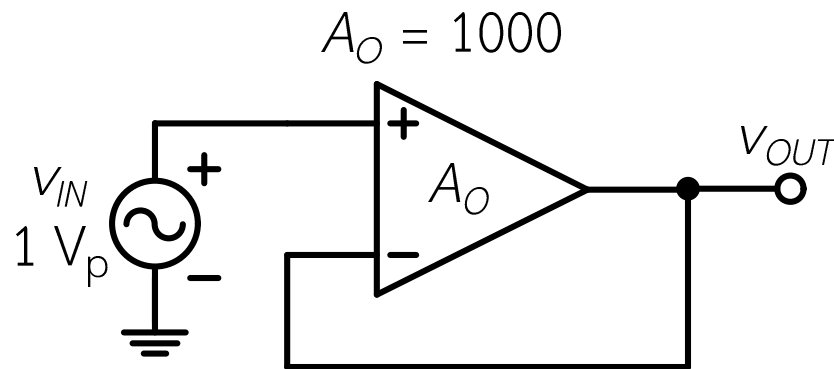


ภาพที่ 8.18 วงจรบัฟเฟอร์

- วงจรบัฟเฟอร์ (buffer) คือวงจรที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันอินพุตไปเอาต์พุต
- คุณสมบัติที่สำคัญของวงจรบัฟเฟอร์คือ อัตราขยายวงจรมีค่าเท่ากับหนึ่ง ค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก และค่าความต้านทานเอาต์พุตมีค่าน้อยมาก

$$V_{OUT} = V_{IN}$$

ตัวอย่างที่ 8.6 ภาพที่ 8.9 แสดงวงจรรีบัพเฟออร์ ทำการคำนวณหา
แรงดันเอาต์พุต ถ้า $v_{IN1} = 1 \text{ V}$ และ $A_O = 1000$

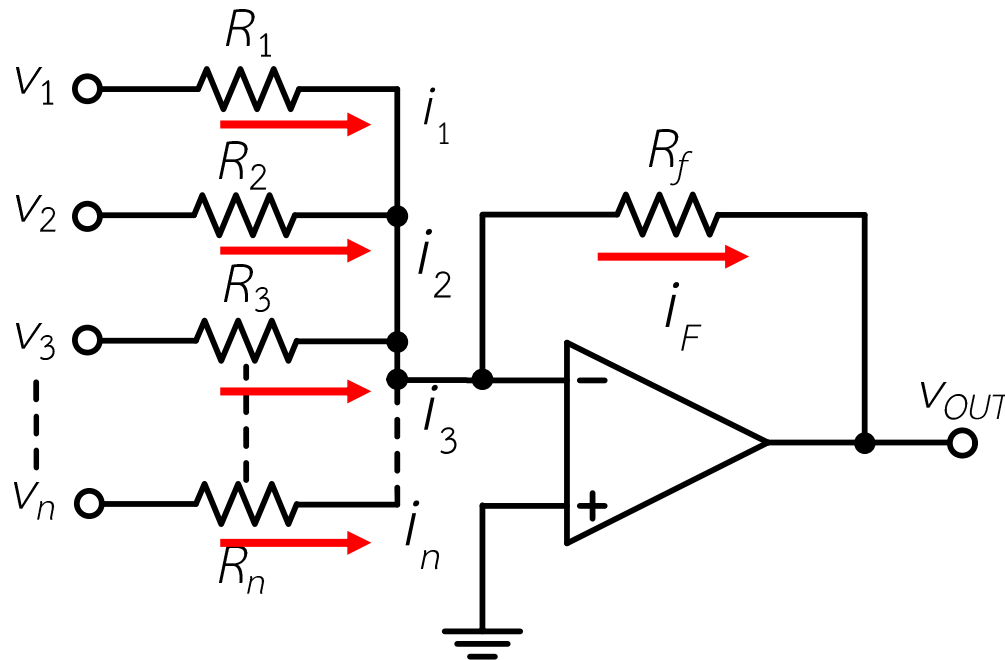


$$\begin{aligned} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} &= \frac{A_O}{1 + A_O} \\ &= \frac{1,000}{1 + 1,000} \\ &= 0.99 \end{aligned}$$

ภาพที่ 8.19 วงจรรีบัพเฟออร์กรณี A_O เท่ากับ 1,000 เท่า

- ถ้า $A_O = 1000$ $v_{IN} = 1 \text{ V}$ และ $v_{OUT} = 0.999$ และเนื่องจาก $v^+ - v^-$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต

8.7.4 วงจรรวมแรงดัน (Voltage adder)

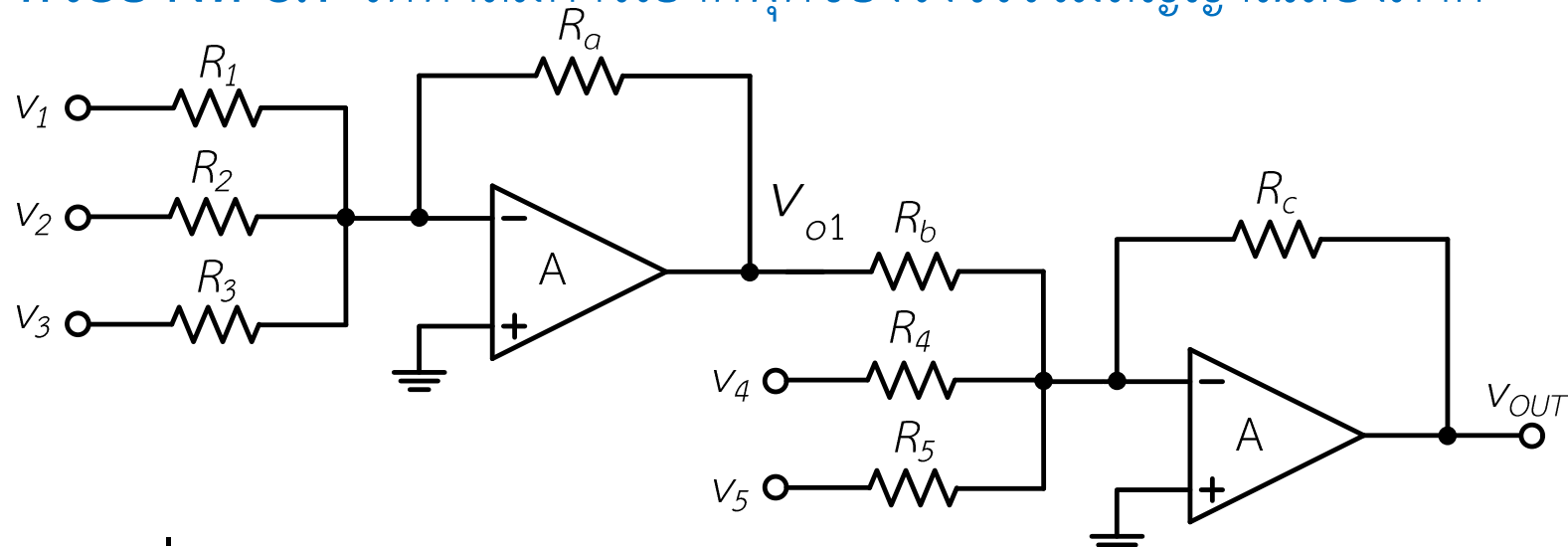


$$i_{R_F} = i_{R_1} + i_{R_2} + \dots + i_{R_n}$$

ภาพที่ 8.20 วงจรบวกแรงดันกลับเฟส

$$V_{OUT} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

ตัวอย่างที่ 8.7 ให้หาสมการเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณสองภาค



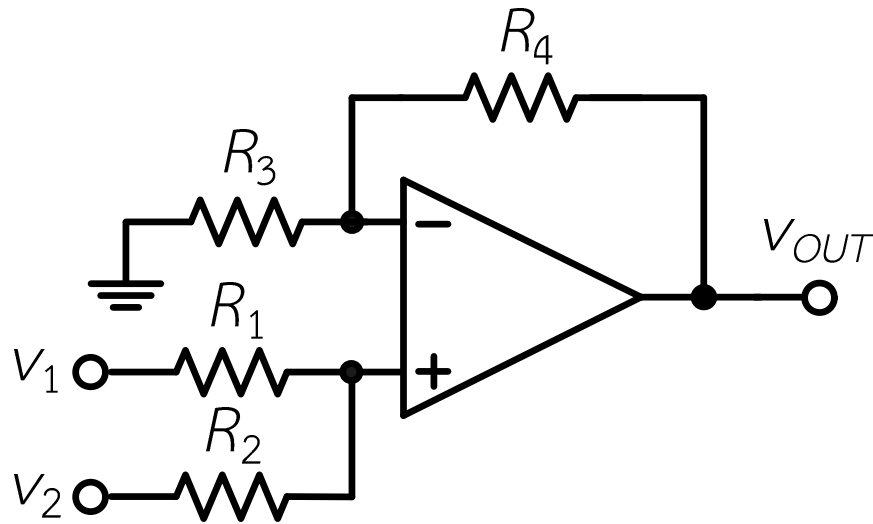
ภาพที่ 8.21 วงจรขยายรวมแรงดันสองภาค

$$V_{o1} = -R_a \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

$$V_{out} = -R_c \left[-\frac{R_a}{R_b} \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) + \frac{V_4}{R_4} + \frac{V_5}{R_5} \right]$$

ตัวอย่างที่ 8.8 จงหาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 8.23 กำหนดให้

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$$



ภาพที่ 8.22 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

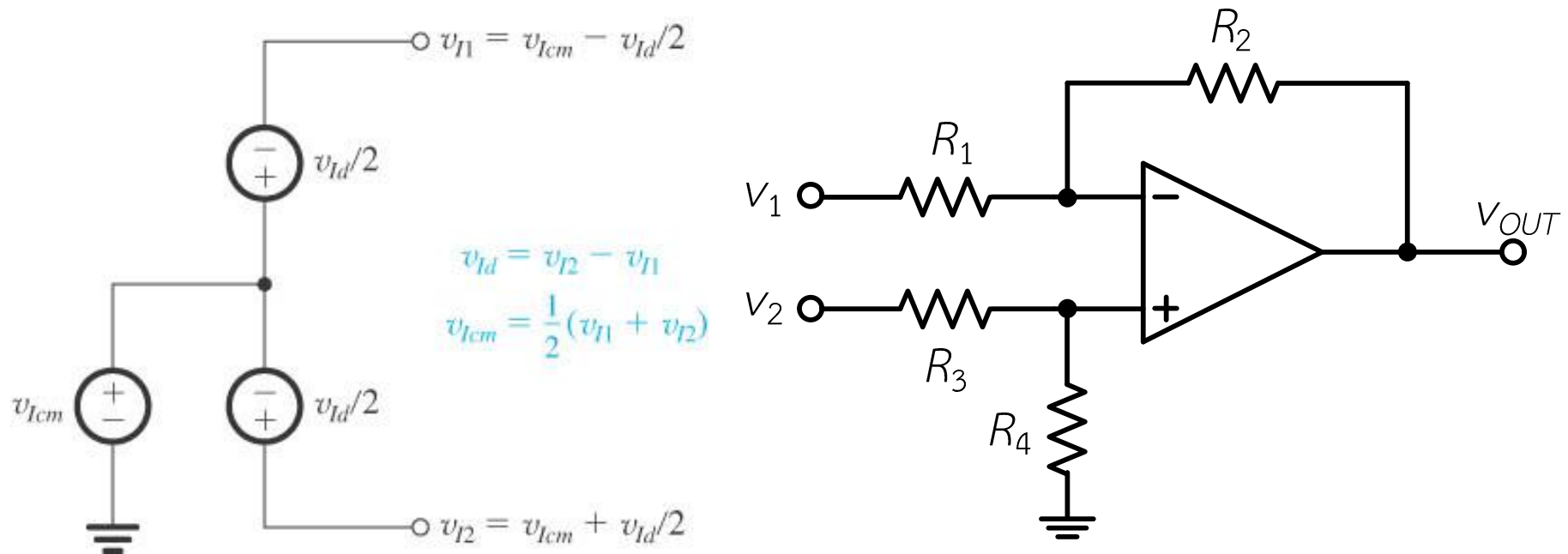
$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_1$$

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_2$$

$$V_{out} = V_{o1} + V_{o2}$$

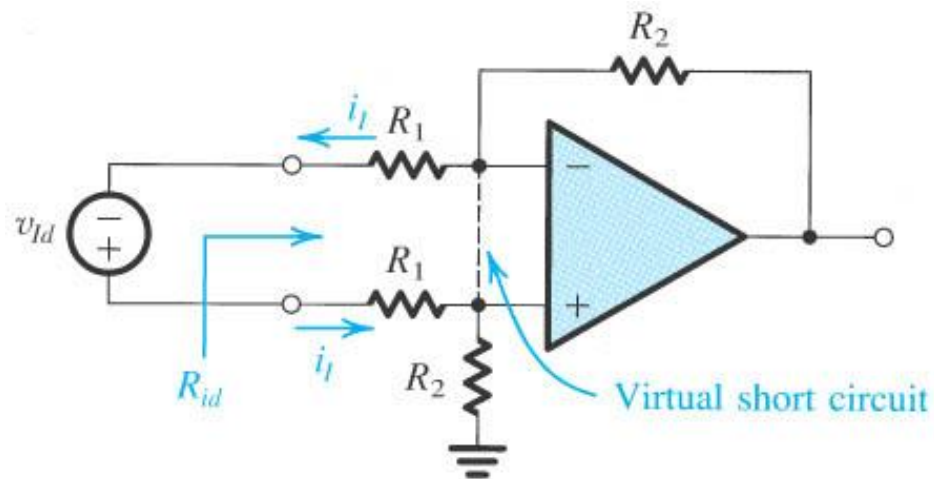
$$V_{out} = V_1 + V_2$$

8.7.5 Difference amplifier



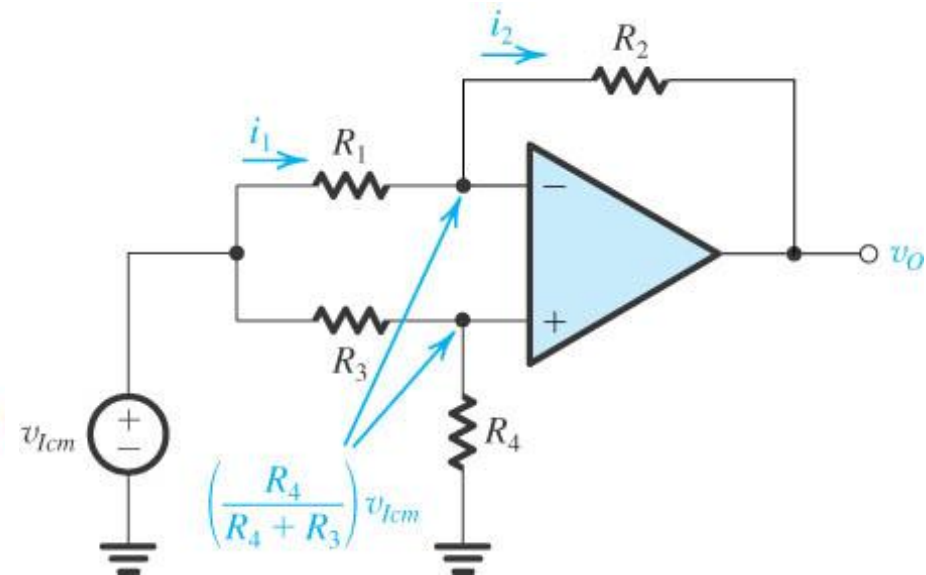
ภาพที่ 8.23 วงจรขยายความแตกต่าง

Differential mode inputs



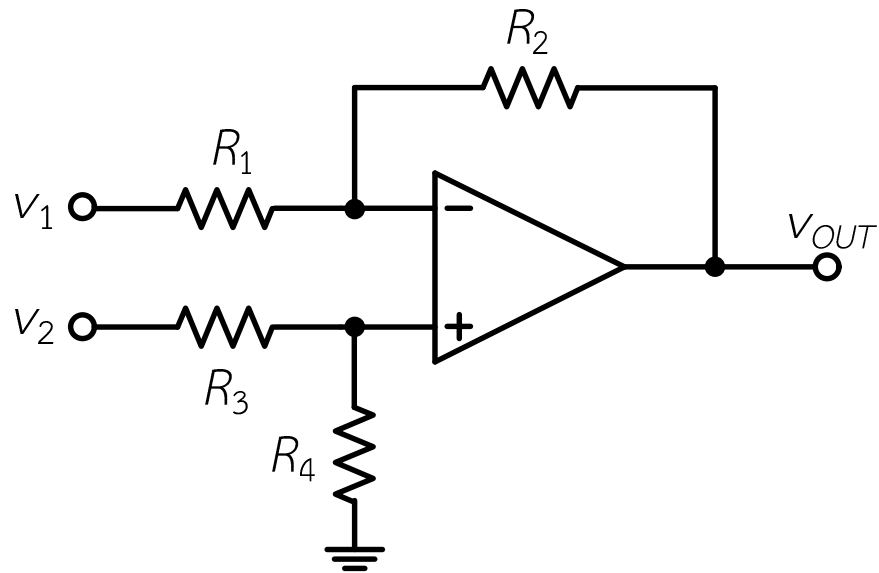
ภาพที่ 8.24 Finding the input resistance of the difference amplifier for the case $R_3 = R_1$ and $R_4 = R_2$.

Common mode inputs



ภาพที่ 8.25 Analysis of the difference amplifier to determine its common-mode gain A_{cm} ; v_O / v_{Icm} .

8.7.5 Difference amplifier (con)

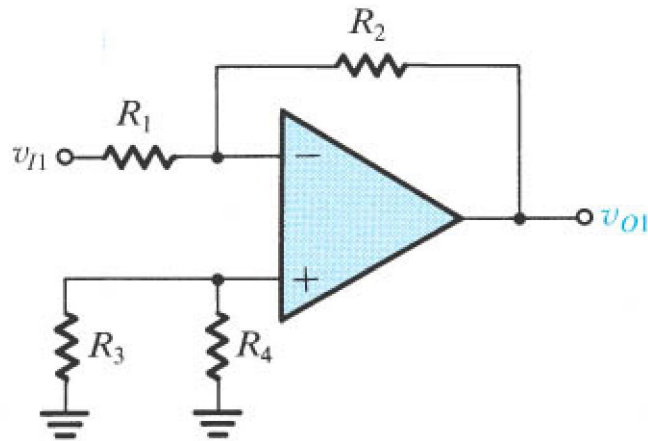


- Use Kirchoff's Current Law
- Use Superposition

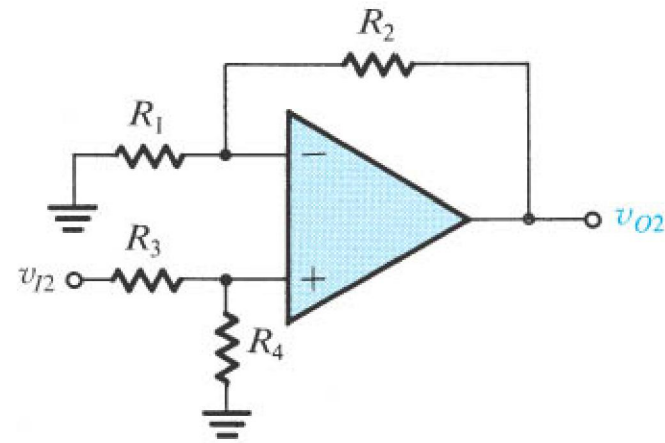
ภาพที่ 8.26 วงจรขยายความแตกต่าง

Op-amp circuit using superposition

1. Remove sources



(a)



(b)

ภาพที่ 8.27 วงจรขยายผลต่าง (ก) ขณะ $v_2 = 0$ และ (ข) ขณะ $v_1 = 0$

2. Superimpose

$$V_{out} = V_{o1} + V_{o2}$$

Find v_{o1}

$$V_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

Find v_{o2}

$$V_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) V_2$$

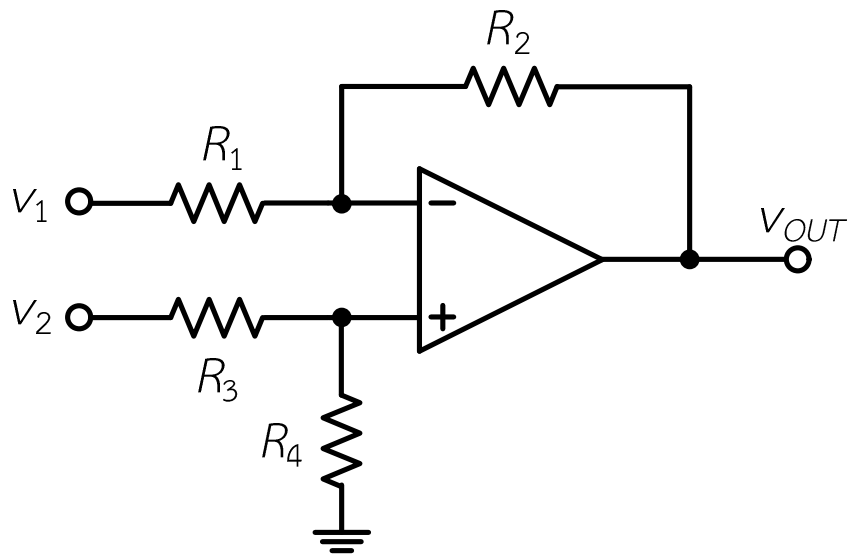
$$V_{out} = V_{o1} + V_{o2}$$

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}v_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right)v_2$$

- กำหนดให้ $R_1 = R_3$ และ $R_2 = R_4$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$$

ตัวอย่างที่ 8.9 จากวงจรขยายความแตกต่าง กำหนดให้ $V_1 = 100 \text{ mV}$ และ $V_2 = 200 \text{ mV}$ $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ $R_2 = R_4 = 20 \text{ k}\Omega$ จงหาแรงดันเอาต์พุต



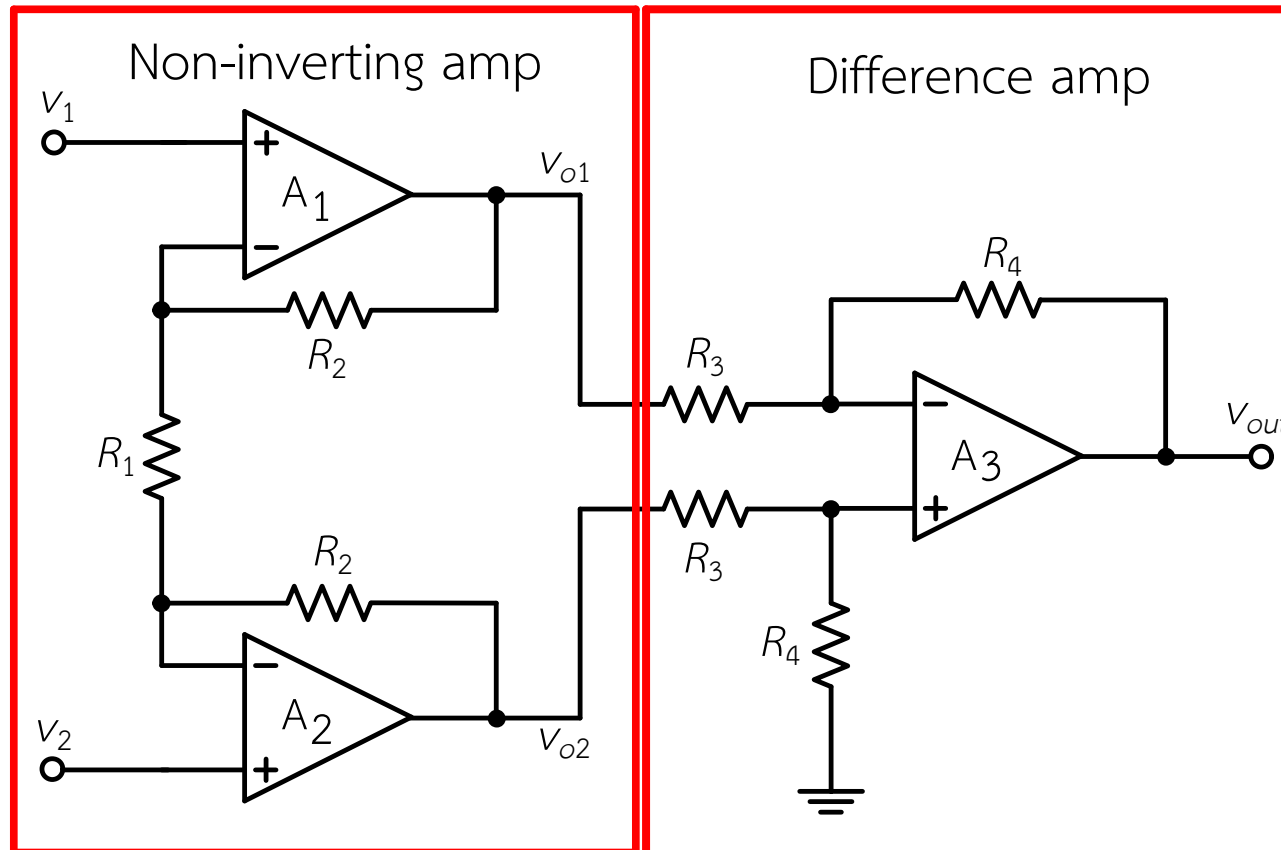
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

$$= \frac{20\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} (200\text{mV} - 100\text{mV})$$

$$= 2\text{V}$$

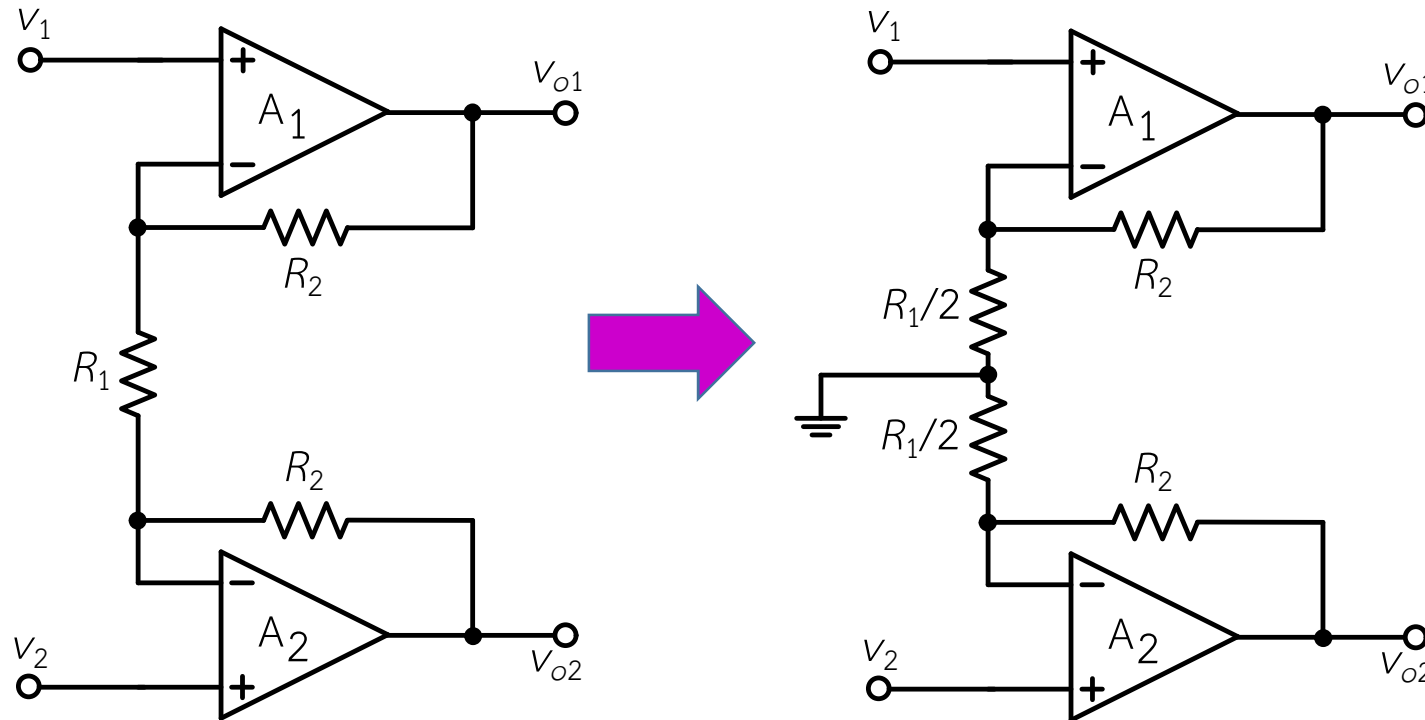
ภาพที่ 8.28 วงจรขยายความแตกต่าง

8.7.6 วงจรขยายอินสตรูमेंต์ (Instrument amplifier)



ภาพที่ 8.29 Instrument amplifier circuit

8.7.6 วงจรขยายอินสตรูमेंต์ (Instrument amplifier) (ต่อ)

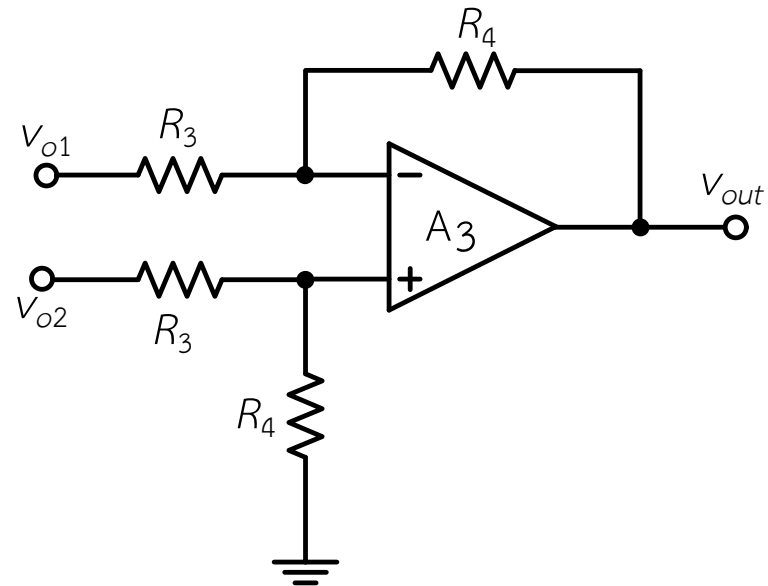


ภาพที่ 8.30 Instrument amplifier circuit first stag

$$V_{O1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) V_1$$

$$V_{O2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) V_2$$

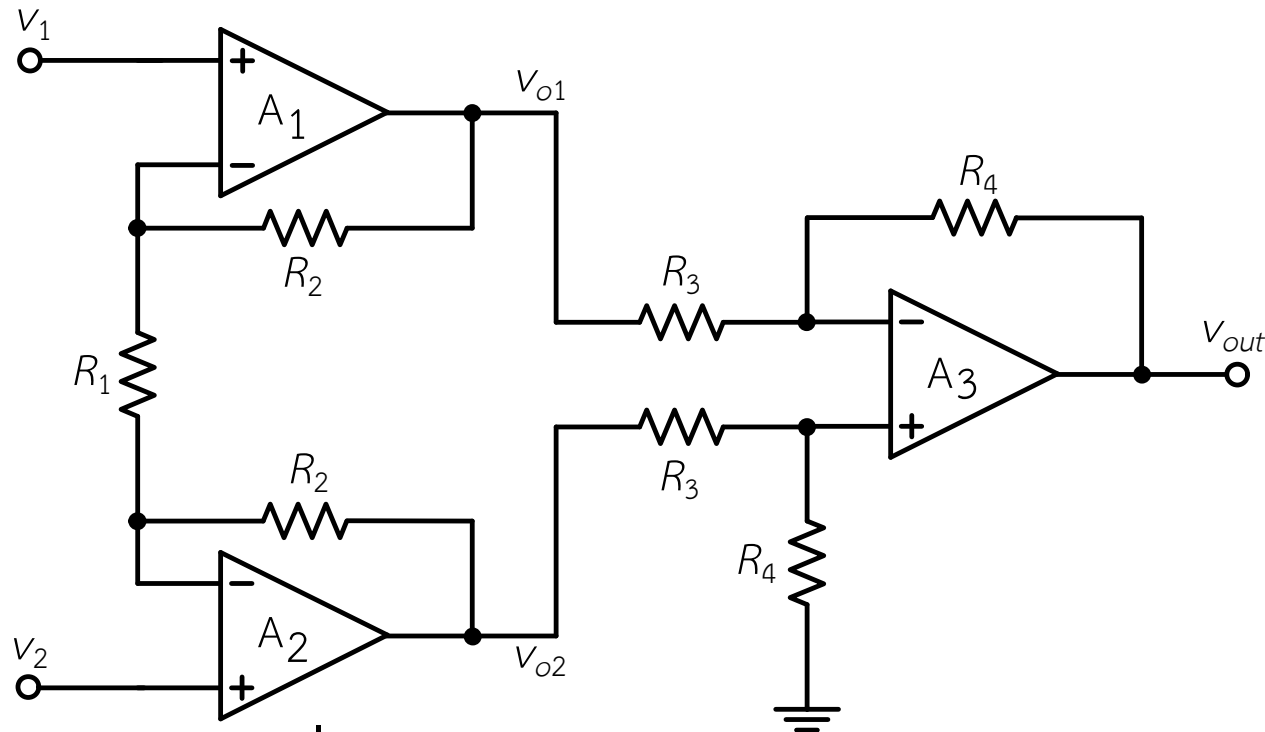
8.7.6 วงจรขยายอินสตรูमेंต์ (Instrument amplifier) (ต่อ)



ภาพที่ 8.31 วงจรขยายความแตกต่าง

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{o2} - V_{o1})$$

8.7.6 วงจรขยายอินสตรูमेंต์ (Instrument amplifier)



ภาพที่ 8.32 Instrument amplifier circuit

$$V_{out} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$$

ตัวอย่างที่ 8.10 จากวงจรขยายอินสตรูเมนต์ กำหนดให้ $V_1 = 100 \text{ mV}$ และ $V_2 = 200 \text{ mV}$ $R_1 = 2\text{k}\Omega$ $R_2 = R_3 = R_4 = 10\text{k}\Omega$ จงหาแรงดันเอาต์พุต

$$V_{OUT} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$$
$$= \frac{1\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} \left(1 + \frac{2 \times 9\text{k}\Omega}{2\text{k}\Omega} \right) (200\text{mV} - 100\text{mV})$$

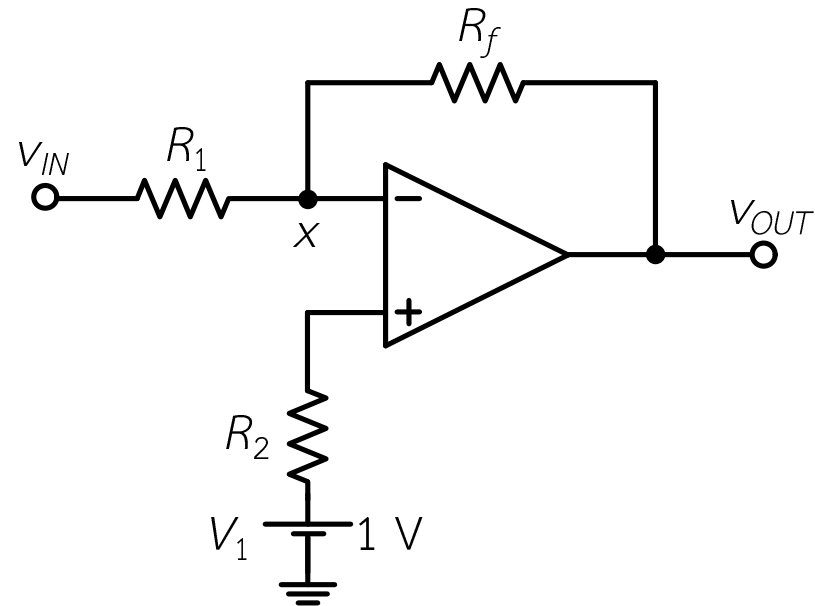
$$V_{OUT} = 1\text{V}$$

บทสรุป

- ออปแอมป์ คืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญ และถูกนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก
- ออปแอมป์ถูกนำไปออกแบบระดับประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส และไม่กลับเฟส และวงจรคำนวณคณิตศาสตร์ เช่น วงจรบวก วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จากวงจรในภาพที่ 8.33 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) เมื่อ กำหนดให้ $V_{IN} = 2\text{ V}$ $R_1 = R_2 = 1\text{ k}\Omega$ และ $R_f = 5\text{ k}\Omega$



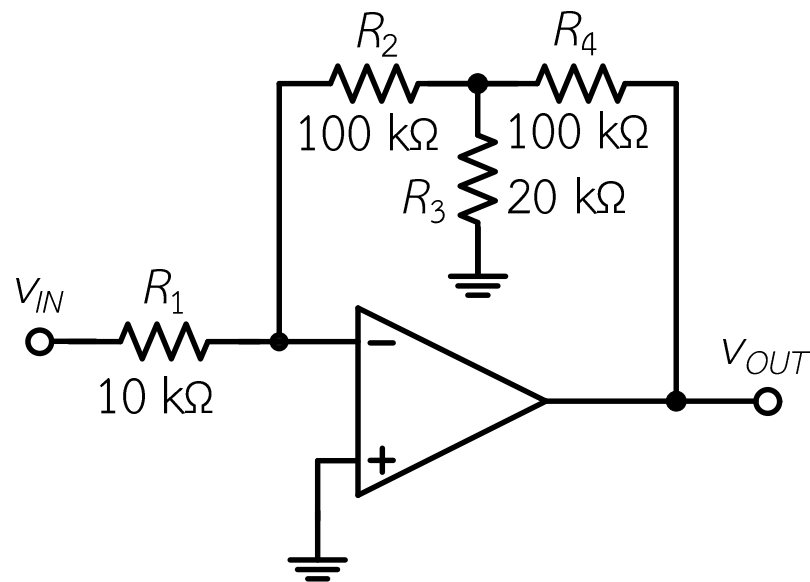
ภาพที่ 8.33 วงจรขยายแบบมีแรงดันออฟเซต

แบบฝึกหัดท้ายบท (ต่อ)

- จากตัวอย่างที่ 8.1 ถ้าไฟเลี้ยงเท่ากับ $\pm 12\text{ V}$ แล้วป้อนสัญญาณอินพุต 4 V_p แรงดันเอาต์พุตเท่ากับเท่าไร พร้อมอธิบายผลแรงดันเอาต์พุต
- จงออกแบบให้วงจรขยายแบบกลับเฟสมีค่า $A_v = 12\text{ dB}$ กำหนดให้ $R_1 = 100\text{ k}\Omega$
- จงออกแบบให้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสมีค่า $A_v = 12\text{ dB}$ กำหนดให้ $R_1 = 100\text{ k}\Omega$
- จงออกแบบให้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสมีค่า $A_v = 12\text{ dB}$ กำหนดให้ $R_1 = 100\text{ k}\Omega$

แบบฝึกหัดท้ายบท (ต่อ)

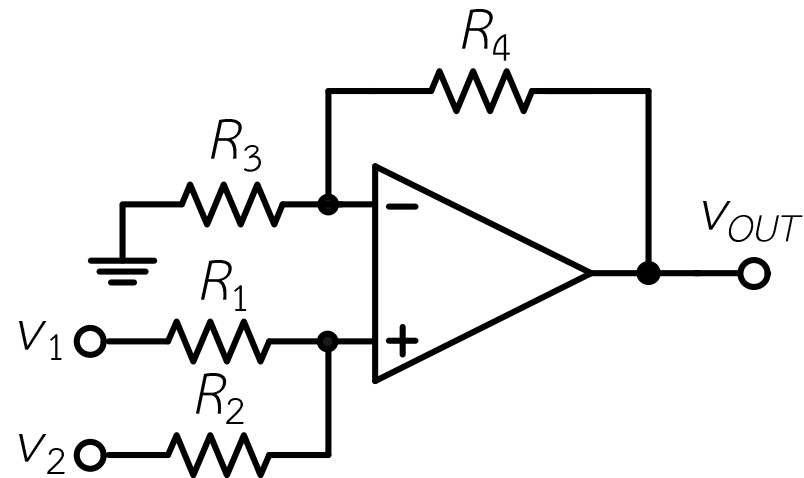
6. ภาพที่ 8.34 แสดงวงจรขยายรวมสัญญาณ กำหนดให้ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 20 \text{ k}\Omega$ และ $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ จงแสดงวิธีการหาสมการเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับอินพุต



ภาพที่ 8.34 วงจรขยายแบบกลับเฟส

แบบฝึกหัดท้ายบท (ต่อ)

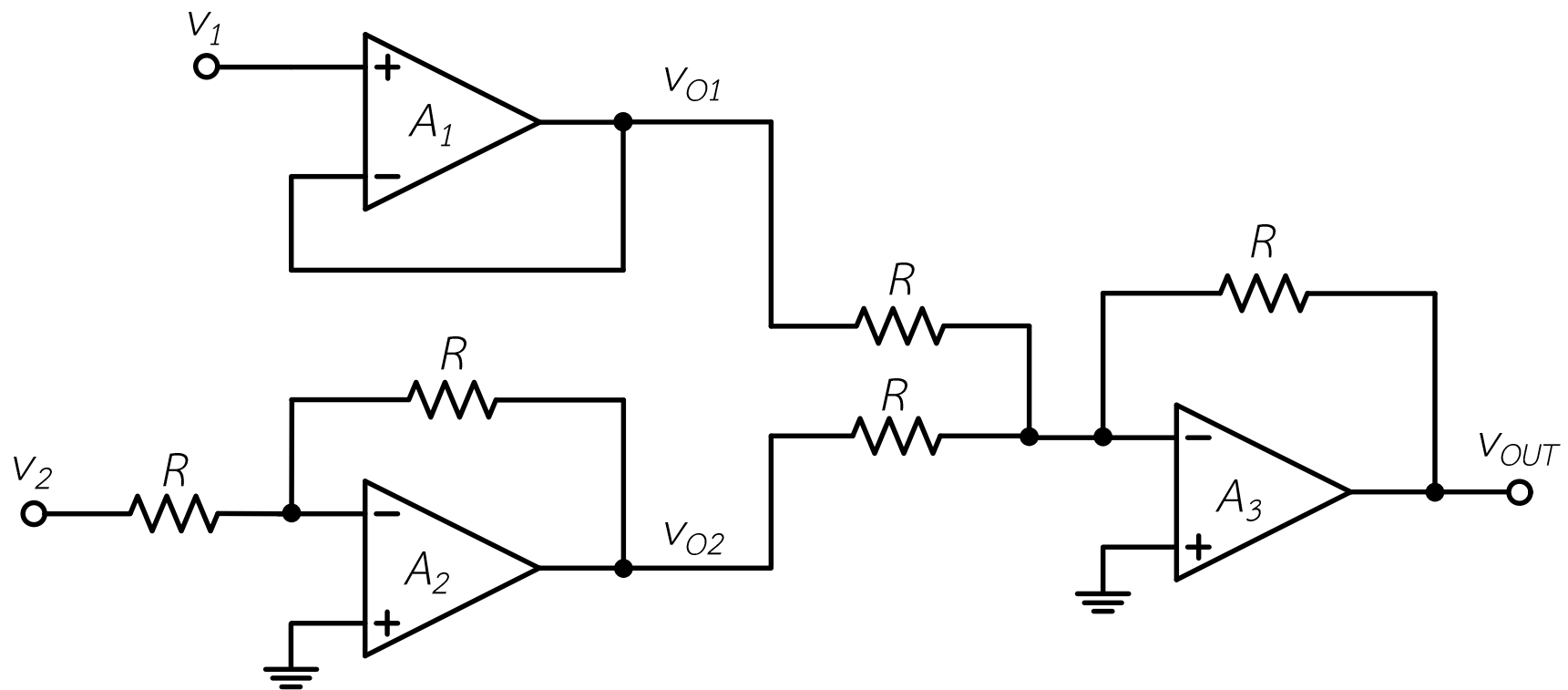
7. จงหาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 8.35 กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$



ภาพที่ 8.35 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

แบบฝึกหัดท้ายบท (ต่อ)

8. จงหาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 8.36 กำหนดให้ $R = 10 \text{ k}\Omega$



ภาพที่ 8.36 วงจรขยายสองภาค

จบการนำเสนอ