

Lecture 2 Operational Amplifier and Application

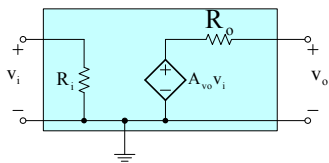
Present by : Thawatchai Thongleam
 Faculty of Science and Technology
 Nakhon Pathom Rajabhat University

Operational Amplifier and Applications

- Outline
 - Introduction of Op-Amp
 - Op-Amp Characteristic
 - Op-Amp Base Circuits
 - Nonlinear Function
 - Op Amp Nonidealities

Amplifier types

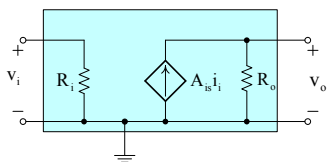
■ Voltage Amplifiers



- High input resistance
- Low output resistance

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

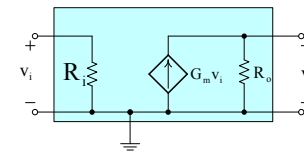
■ Current Amplifiers



- Low input resistance
- High output resistance

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

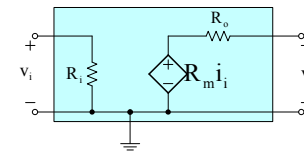
■ Transconductance Amplifiers



- High input resistance
- High output resistance

$$A_G = \frac{i_o}{v_i}$$

■ Transresistance Amplifiers

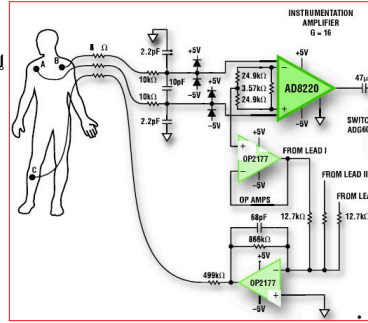


- Low input resistance
- Low output resistance

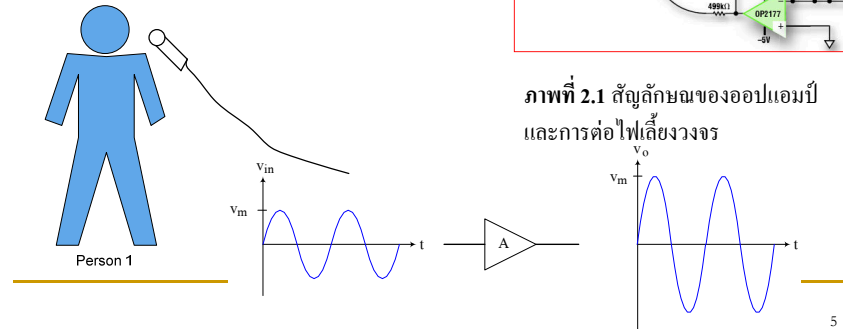
$$A_R = \frac{v_o}{i_i}$$

2.1 Introduction of Op-Amp

- ต้องการขยายสัญญาณคลื่นเสียงให้ดังมากขึ้น
- ต้องการขยายสัญญาณคลื่นหัวใจ
- วงจรคำนวณทางคณิตศาสตร์
- วงจรกรองสัญญาณ



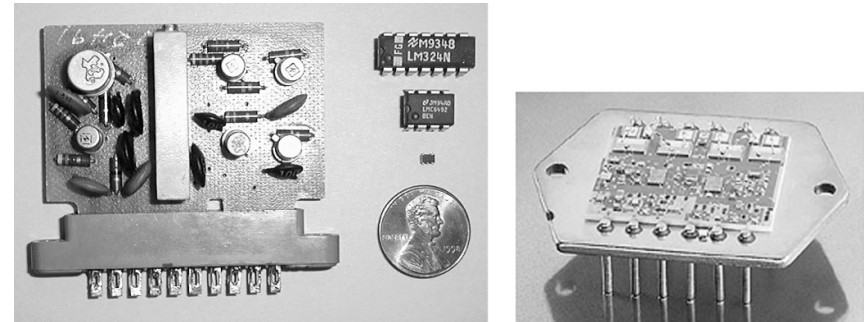
ภาพที่ 2.1 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ และการต่อไฟเลี้ยงวงจร



5

Op-Amp Circuit

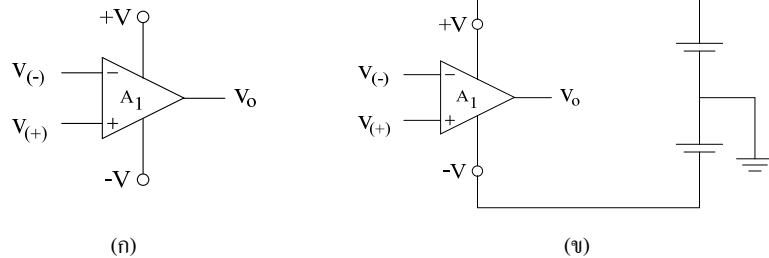
- The linearity of Op-Amp is due to the elaborate circuitry.



ภาพที่ 2.2 วงจรภายในของออปแอมป์

6

The Op-Amp Terminals

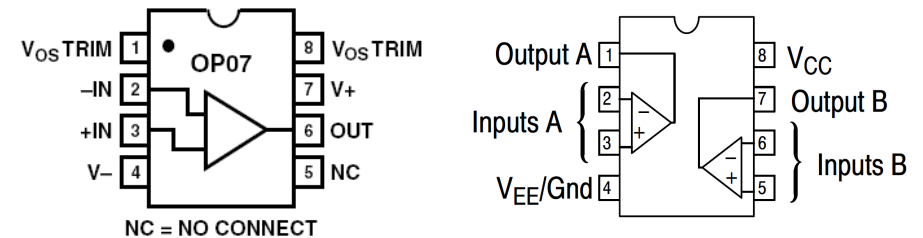


ภาพที่ 2.3 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ และการต่อไฟเลี้ยงวงจร

7

Op-Amp Device

- Dual in Line Packaging(DIP)

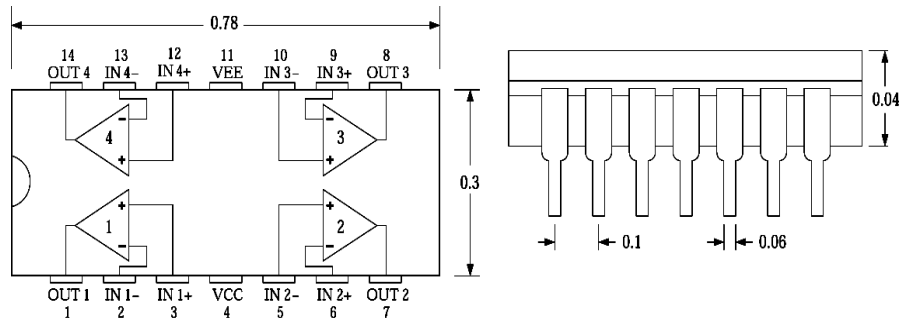


ภาพที่ 2.4 Packaging (DIP) Op-Amp

8

Op-Amp Packaging

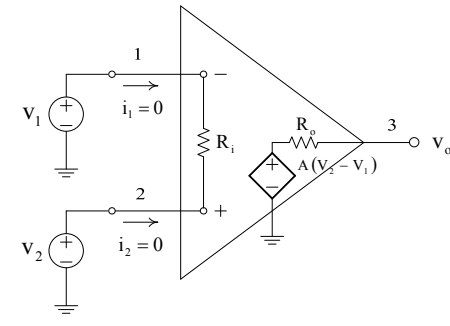
Pin outs



ภาพที่ 2.5 Packaging (DIP) Op-Amp

9

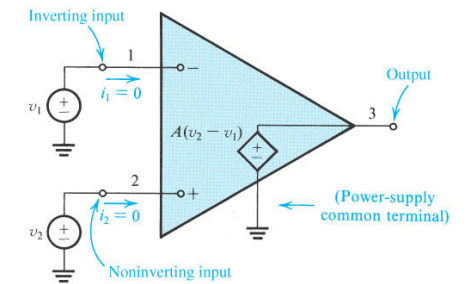
OP-AMP Circuit Model



ภาพที่ 2.6 Equivalent circuit of the op amp.

- แรงดันที่เอาต์พุตอุดมคติหาได้จากสมการ

$$v_o = A_o (v_{(+)} - v_{(-)})$$



ภาพที่ 2.7 Equivalent circuit of the ideal op amp_o

2.2 คุณลักษณะของออปแอมป์อุดมคติ (The Ideal Op-Amp Characteristic)

- อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขาบวกและลบมีค่าเท่ากับอนันต์
- กระแสที่ไหลเข้าขาบวกและลบมีค่าเท่ากับศูนย์
- ขาบวกและขาลบมีแรงดันเท่ากัน
- เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับศูนย์
- อัตราขยายแรงดันลูบเปิดมีค่าสูงมากๆ
- อัตราส่วนการขจัดโหมดร่วม (common-mode rejection) เท่ากับอนันต์
- มีแบนด์วิดธ์สูงมาก

11

2.3 Op-Amp Base Circuits

- Inverting amplifier
- Non-inverting amplifier
- Buffer or Voltage Follower
- Voltage Adder
- Difference amplifier
- Instrument amplifier
- Inverting integrator
- Differentiator

12

2.3.1 Inverting amplifier

■ หาอัตราขยาย A_v

□ ที่อินพุต $V_{(+)}$ กับ $V_{(-)}$ ของออปแอมป์เป็น virtual ground

■ เงื่อนไขของออปแอมป์อุดมคติ

1 $i_+ = i_- = 0$

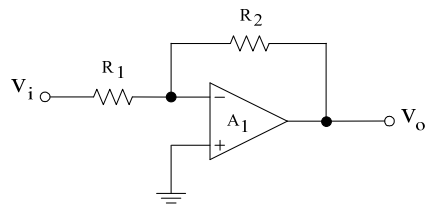
2 $v_+ = v_-$

$$\frac{v_i - v_a}{R_1} = \frac{v_a - v_o}{R_2}$$

$v_a = 0$

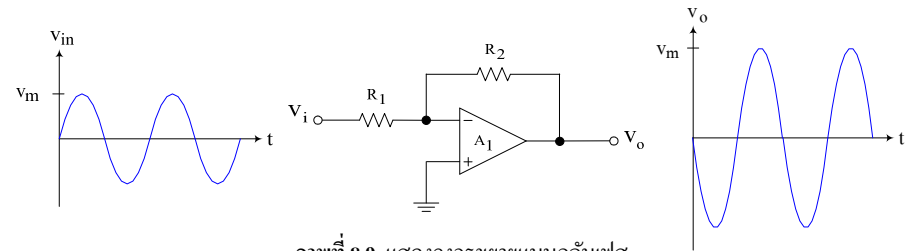
$$\frac{v_i}{R_1} = -\frac{v_o}{R_2}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟส

Inverting Amplifier



ภาพที่ 8.9 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟส

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i$$

2.3.2 Non-inverting amplifier

■ หาอัตราขยาย A_v

□ ที่อินพุต $V_{(+)}$ กับ $V_{(-)}$ ของออปแอมป์เป็น virtual ground

■ เงื่อนไขของออปแอมป์อุดมคติ

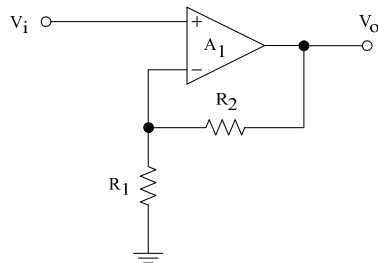
1 $i_+ = i_- = 0$

2 $v_+ = v_-$

$$v_o = \left(\frac{R_1 v_o}{R_1 + R_2} \right)$$

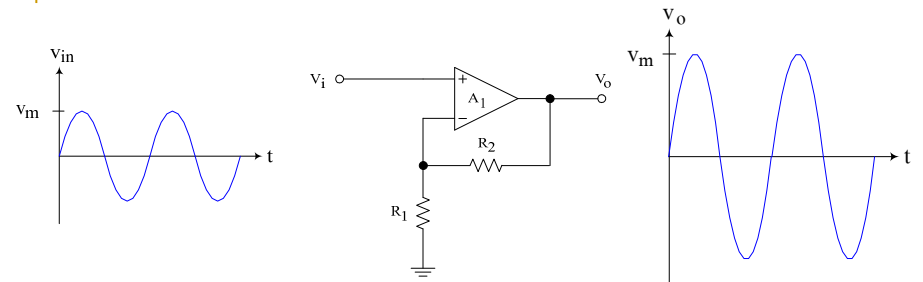
$$v_a = v_i \quad v_i = \left(\frac{R_1 v_o}{R_1 + R_2} \right)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



ภาพที่ 2.10 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

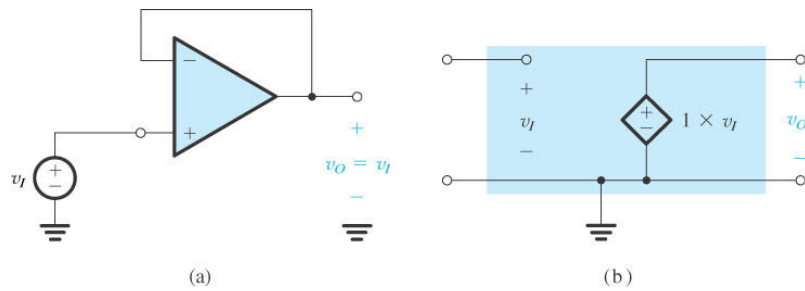
Non-inverting amplifier



ภาพที่ 2.11 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

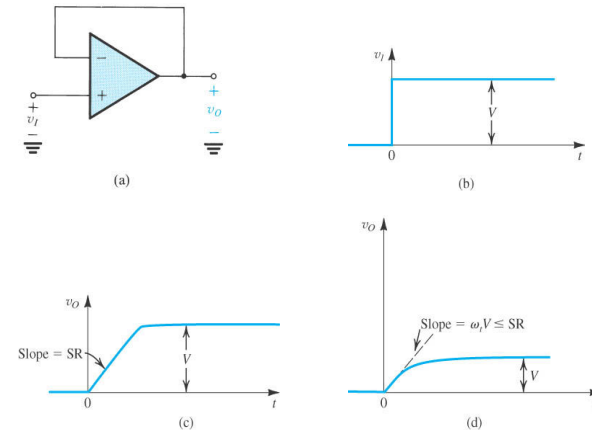
$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_i$$

2.3.3 Buffer or Voltage Follower



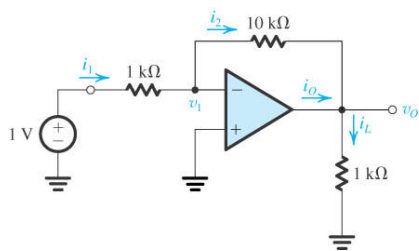
ภาพที่ 2.12 (a) The unity-gain buffer or follower amplifier. (b) Its equivalent circuit model.

Buffer Using Op-amp



ภาพที่ 2.13 (a) Unity-gain follower. (b) Input step waveform. (c) Linearly rising output waveform obtained when the amplifier is slew-rate limited. (d) Exponentially rising output waveform obtained when V is sufficiently small so that the initial slope ($\omega_c V$) is smaller than or equal to SR.

Ex 4 ให้หาค่ากระแสที่อินพุต กระแสที่ไหลผ่านโหลด และหาค่าแรงดันที่เอาต์พุต



ภาพที่ 2.14 วงจรขยายแบบกลับเฟส

Example 8.11

An electrical engineering student constructs the circuit shown in Fig. 8.28 to amplify the signal produced by a microphone. The targeted gain is 10^4 so that very low level sounds (i.e., microvolt signals) can be detected. Explain what happens if op amp A_1 exhibits an offset of 2 mV.

Solution

From Fig. 8.27, we recognize that the first stage amplifies the offset by a factor of 100, generating a dc level of 200 mV at node X (if the microphone produces a zero dc output). The second stage

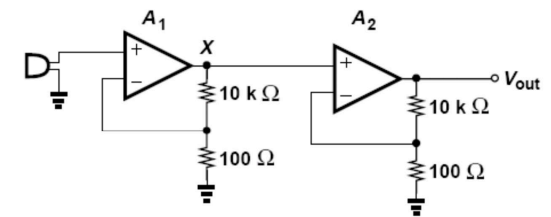
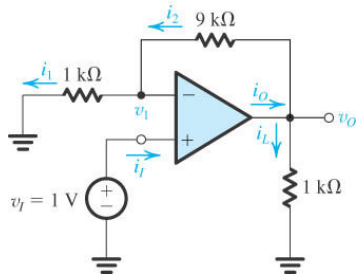


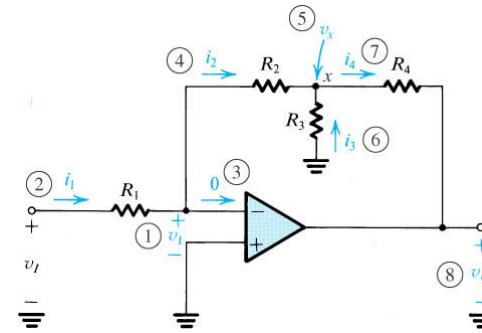
Figure 8.28 Two-stage amplifier.

Ex 6 ให้หาค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านโหลดของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส



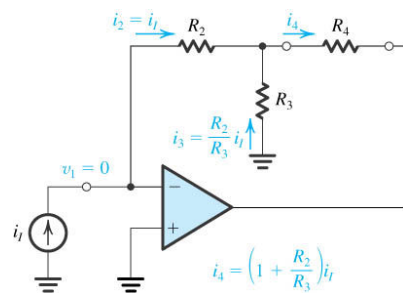
ภาพที่ 2.19 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

Ex 7 ให้หาสมการเอาต์พุตของวงจรขยายในภาพที่ 2.14



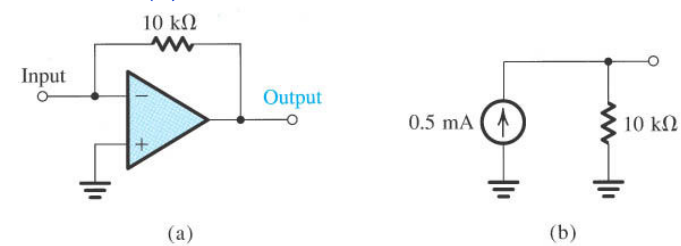
ภาพที่ 2.14

Current Amplifier



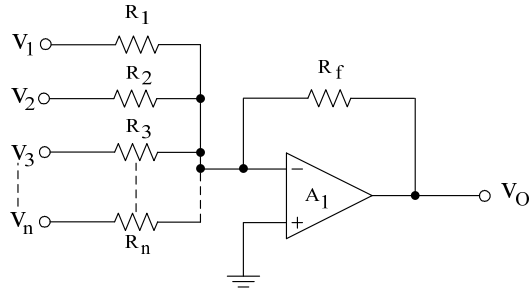
ภาพที่ 8.15 A current amplifier based on the circuit of Fig. 2.8. The amplifier delivers its output current to R_4 . It has a current gain of $(1 + R_2/R_3)$, a zero input resistance, and an infinite output resistance. The load (R_4), however, must be floating (i.e., neither of its two terminals can be connected to ground).

Ex 3 ให้หาแรงดันเอาต์พุตวงจรในภาพที่ 2.16 (a) เมื่อป้อนสัญญาณวงจรในภาพที่ 2.16 (b)



ภาพที่ 2.16

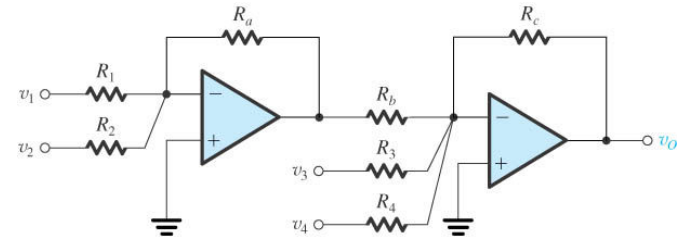
2.3.4 Voltage Adder



ภาพที่ 2.20 แสดงวงจรบวกแบบกลับเฟส

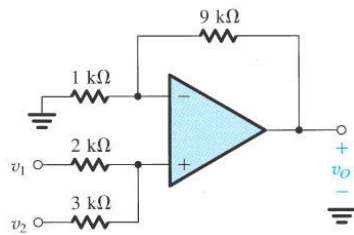
$$v_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} v_n \right)$$

Ex 8 ให้หาสมการเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณสองภาค



ภาพที่ 2.21 A weighted summer capable of implementing summing coefficients of both signs.

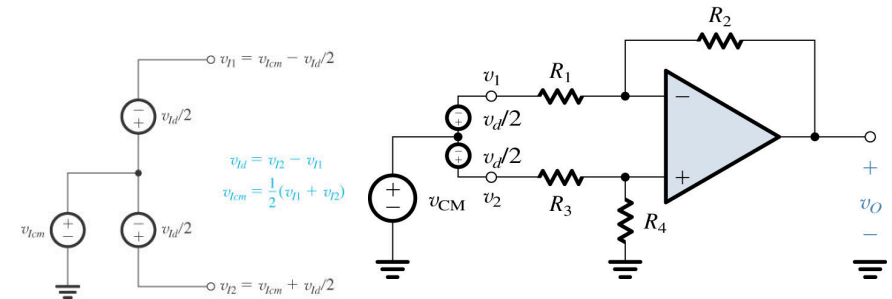
Ex 9 ให้หาสมการเอาต์พุตของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ



ภาพที่ 2.18 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

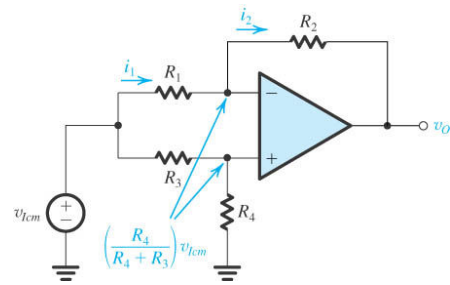
2.3.5 Difference Amplifier

Common and Differential Mode Inputs



ภาพที่ 2.22 The inverting closed-loop configuration.

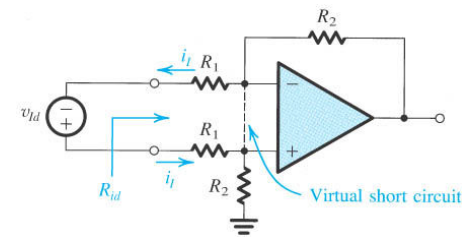
Common Mode Inputs



ภาพที่ 2.23 Analysis of the difference amplifier to determine its common-mode gain A_{cm} ; v_o / v_{icm}

29

Differential Mode Inputs



ภาพที่ 2.24 Finding the input resistance of the difference amplifier for the case $R_3 = R_1$ and $R_4 = R_2$.

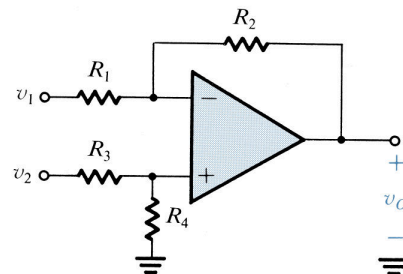
30

Difference Amplifier

- Use Kirchoff's Current Law
- Use Superposition

Ideal op-amp condition

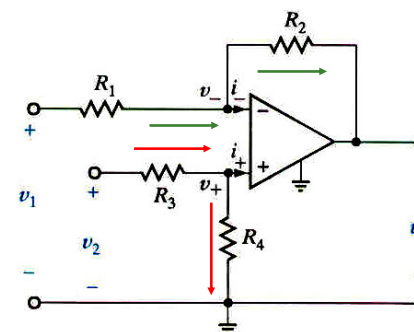
- 1 $i_+ = i_- = 0$
- 2 $v_+ = v_-$



ภาพที่ 2.25 A difference amplifier.

31

Op-amp Circuit using KCL



KCL : INVERTING TERMINAL

$$\frac{v_1 - v_-}{R_1} + \frac{v_o - v_-}{R_2} = i_-$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_- - \frac{R_2}{R_1}v_1$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)v_- - v_1 \right)$$

ภาพที่ 2.26 แสดงวงจรจรรยาผลต่าง

32

Op-amp Circuit using KCL

KCL : NON INVERTING TERMINAL

$$\frac{v_2 - v_+}{R_3} = \frac{v_+}{R_4} + i_+$$

$$i_+ = 0$$

$$v_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

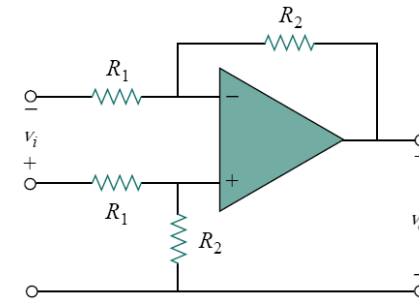
$$v_- = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

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

33

$$R_1 = R_3$$

$$R_2 = R_4$$

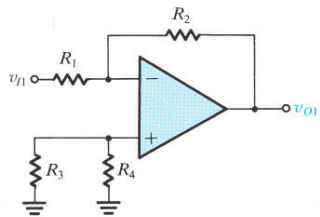


$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

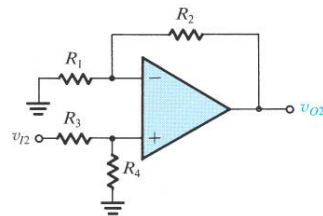
34

Op-amp Circuit using Superposition

1. REMOVE SOURCES



(a)



(b)

ภาพที่ 2.27 แสดงวงจรขยายผลต่าง

2. Superimpose

$$v_o = v_{o1} + v_{o2}$$

35

Find v_o and i_o in the differential amplifier of Fig. 5.68.

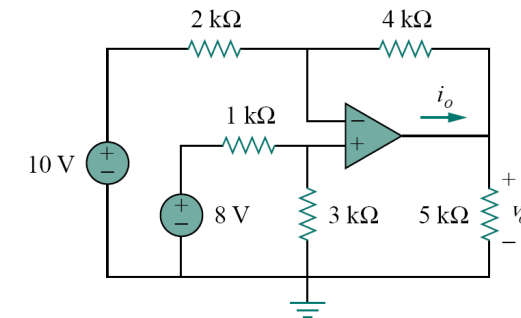


Figure 5.68 For Prob. 5.37.

36

If $v_1 = 1\text{ V}$ and $v_2 = 2\text{ V}$, find v_o in the op amp circuit of Fig. 5.31.

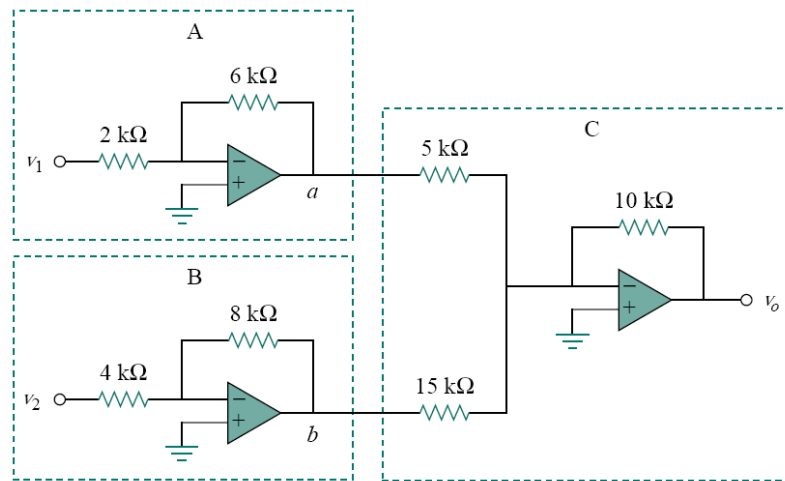


Figure 5.31 For Example 5.10.

Solution:

The circuit consists of two inverters A and B and a summer C as shown in Fig. 5.31. We first find the outputs of the inverters.

$$v_a = -\frac{6}{2}(v_1) = -3(1) = -3\text{ V}, \quad v_b = -\frac{8}{4}(v_2) = -2(2) = -4\text{ V}$$

These become the inputs to the summer so that the output is obtained as

$$v_o = -\left(\frac{10}{5}v_a + \frac{10}{15}v_b\right) = -\left[2(-3) + \frac{2}{3}(-4)\right] = 8.333\text{ V}$$

Design a difference amplifier to have a gain of 2 and a common mode input resistance of $10\text{ k}\Omega$ at each input.

The circuit in Fig. 5.69 is a differential amplifier driven by a bridge. Find v_o .

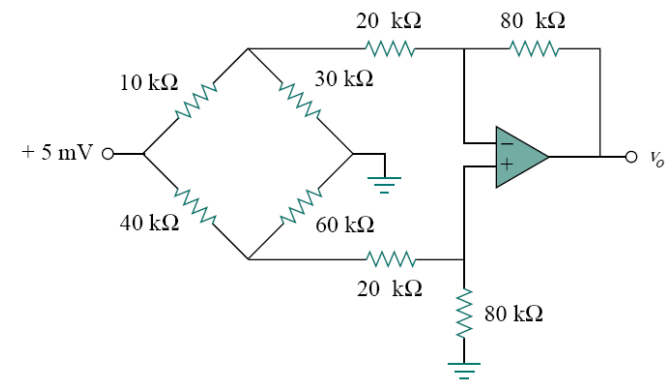
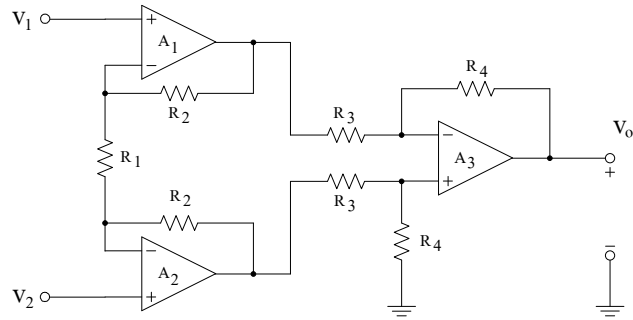


Figure 5.69 For Prob. 5.38.

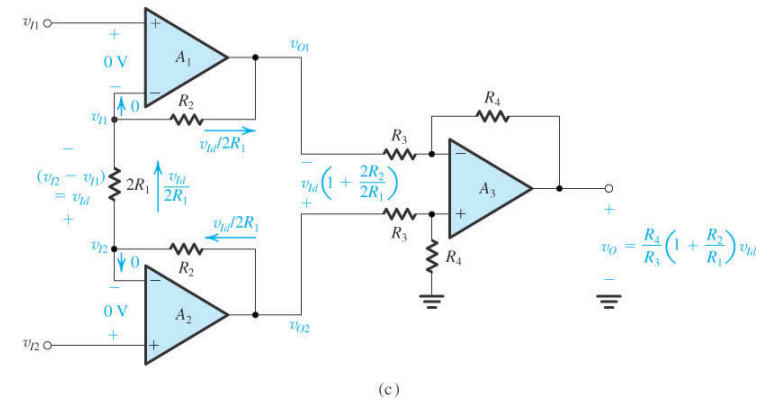
2.3.6 Instrument Amplifier



ภาพที่ 2.28 วงจร Instrument amplifier

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

41



42

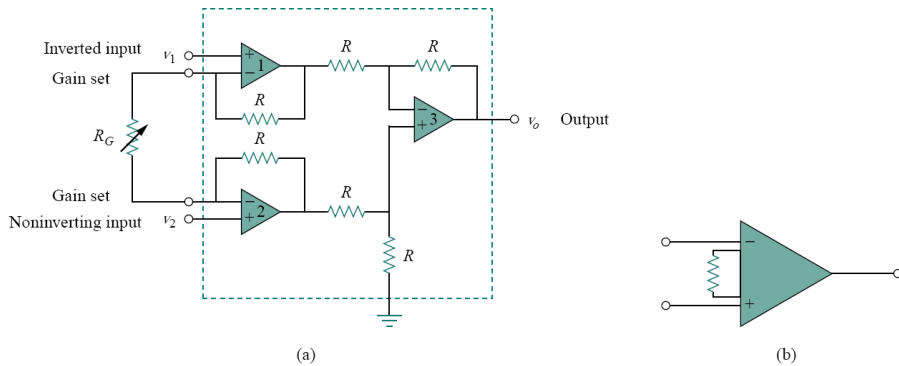


Figure 5.37 (a) The instrumentation amplifier with an external resistance to adjust the gain, (b) schematic diagram.

$$v_o = A_v(v_2 - v_1)$$

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_G}$$

43

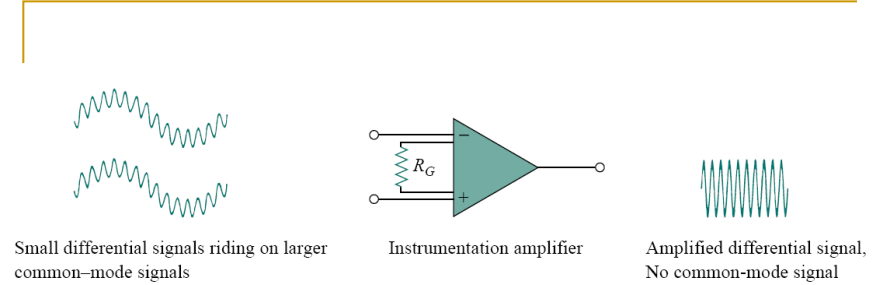


Figure 5.38 The IA rejects common voltages but amplifies small signal voltages. (Source: T. L. Floyd, *Electronic Devices, 2nd ed.*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996, p. 795.)

44

Ex 2

In Fig. 5.37, let $R = 10 \text{ k}\Omega$, $v_1 = 2.011 \text{ V}$, and $v_2 = 2.017 \text{ V}$. If R_G is adjusted to 500Ω , determine: (a) the voltage gain, (b) the output voltage v_o .

Solution:

(a) The voltage gain is

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_G} = 1 + \frac{2 \times 10,000}{500} = 41$$

(b) The output voltage is

$$v_o = A_v(v_2 - v_1) = 41(2.017 - 2.011) = 41(6) \text{ mV} = 246 \text{ mV}$$

45

Pro 2.

Determine the value of the external gain-setting resistor R_G required for the IA in Fig. 5.37 to produce a gain of 142 when $R = 25 \text{ k}\Omega$.

Answer: 354.6Ω .

46

Figure 5.90 shows an instrumentation amplifier driven by a bridge. Obtain the gain v_o/v_i of the amplifier.

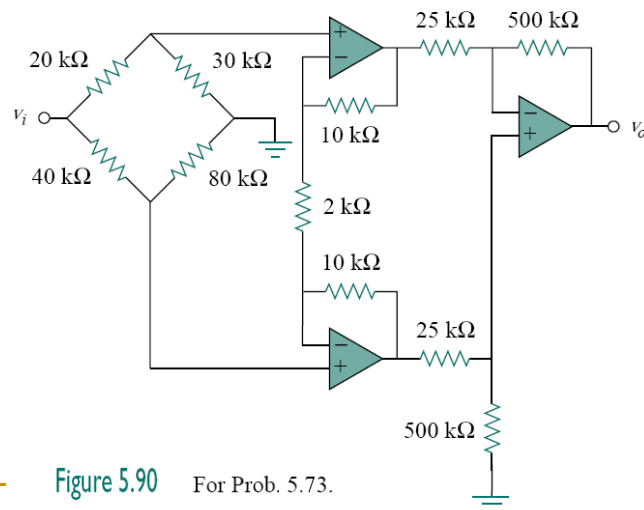


Figure 5.90 For Prob. 5.73.

47

Refer to the *bridge amplifier* shown in Fig. 5.93. Determine the voltage gain v_o/v_i .

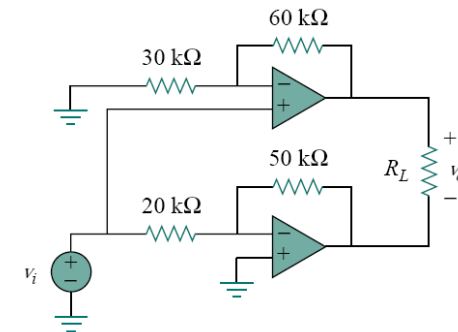
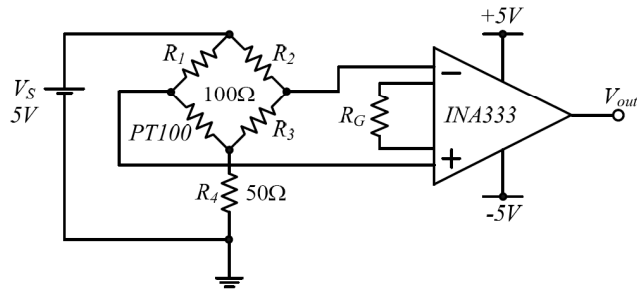


Figure 5.93 For Prob. 5.77.

48

แบบฝึกหัดที่ 3.5 กำหนดให้วงจรในรูปที่ p3.4 มีไฟเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 5 V และ $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega$ ที่อุณหภูมิ 0°C ค่าความต้านทาน PT100 เท่ากับ 100Ω จงออกแบบวงจรเพื่อขยายแรงดันอินพุตเมื่อค่าความต้านทานของ PT100 เพิ่มขึ้น 30Ω แล้ว v_{out} มีค่าเท่ากับ 3 V



รูปที่ p3.4 วงจรขยายสัญญาณวงจรตรวจวัดอุณหภูมิด้วย INA333

เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. Behzad Razavi “Fundamentals of Microelectronics”
2. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith “Microelectronic Circuit”
3. Pual R. Gray and Robert G. Mayer “Analysis and Design of Integrated Circuit”
4. รศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ “วิเคราะห์และการออกแบบวงจรรวมซีมอสแบบอนาล็อก”
5. ผศ.ศักดิ์รียา ชิตวงศ์ “วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์”

Thank you