

บทที่ 8

วงจรรขยายเชิงปฏิบัติการ และการประยุกต์ใช้ออปแอมป์ (Operational Amplifier and Applications)

8.1 บทนำ

ออปแอมป์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ออปแอมป์ถูกนำไปใช้ขยายสัญญาณชีพ แรงดันจากอุปกรณ์ตรวจจับ และสัญญาณหรือแรงดันอื่น ๆ อีกจำนวนมาก การจะนำออปแอมป์ไปใช้ขยายสัญญาณชนิดต่างต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะที่สำคัญของออปแอมป์ ได้แก่ อัตราขยายรูปเปิด อัตราสล็อต อัตราการกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว การศึกษาคุณลักษณะของออปแอมป์มีความสำคัญมาก

วงจรรออปแอมป์ ที่มีบทบาทสำคัญมากในการนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรอานาล็อกกับวงจรรดิจิตอล ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบวงจรรขยายแบบต่าง ๆ เช่น วงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส, วงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส, วงจรรตามแรงดัน, วงจรรรองความถี่, วงจรรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล หรือวงจรรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก เป็นต้น

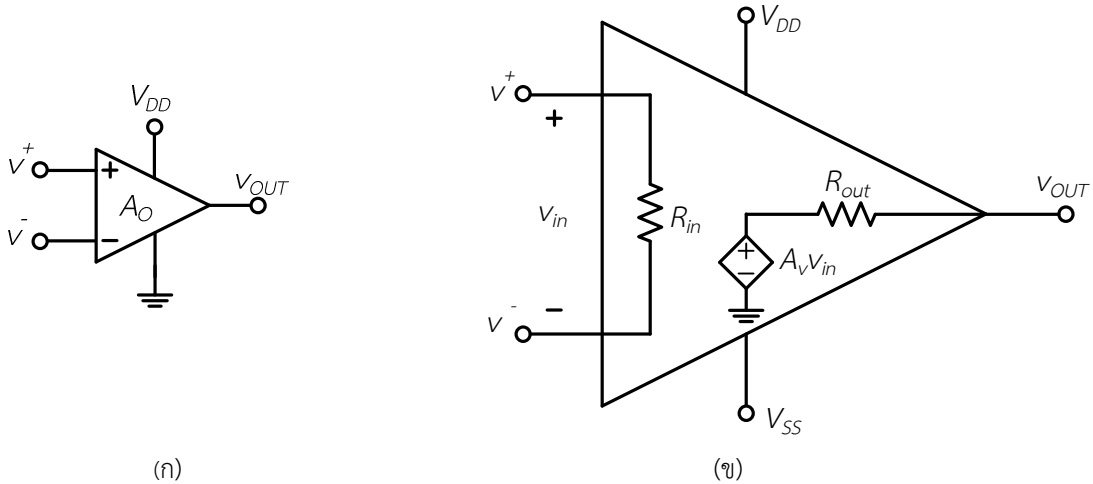
ตารางที่ 8.1 แสดงชนิดของวงจรรขยาย

Type	Circuit Model	Gain Parameter	Ideal Characteristic
Voltage Amplifier		Open-Circuit Voltage Gain $A_{VO} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \Big _{i_O=0} \quad (V/V)$	$R_{in} = \infty$ $R_{out} = 0$
Current Amplifier		Short-Circuit Current Gain $A_i = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}} \Big _{V_{OUT}=0} \quad (A/A)$	$R_{in} = 0$ $R_{out} = \infty$
Transconductance Amplifier		Short-Circuit Transconductance $G_m = \frac{i_{OUT}}{V_{IN}} \Big _{V_{OUT}=0} \quad (A/V)$	$R_{in} = \infty$ $R_{out} = \infty$
Transresistance Amplifier		Open-Circuit Transresistance $R_m = \frac{V_{OUT}}{i_{IN}} \Big _{i_{OUT}=0} \quad (V/A)$	$R_{in} = 0$ $R_{out} = 0$

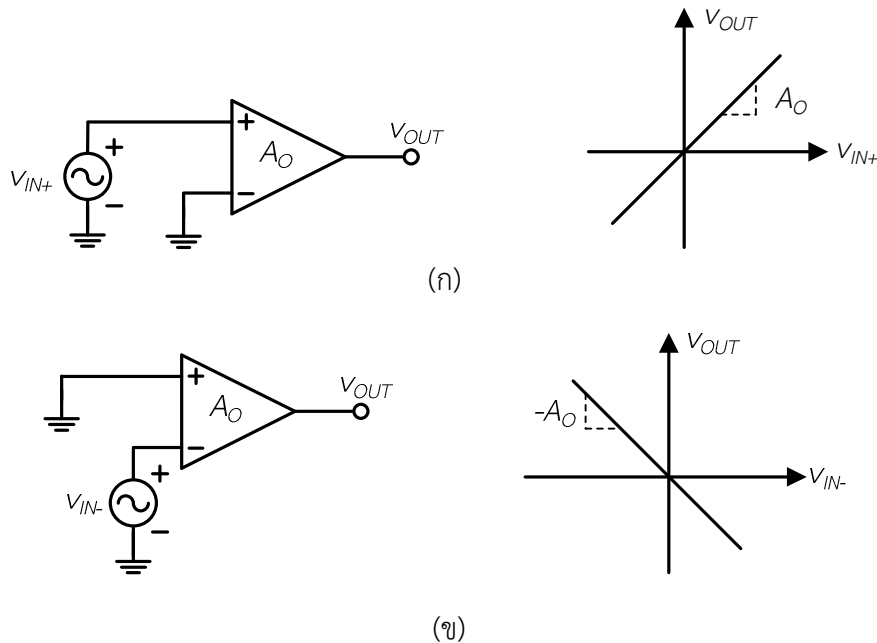
8.2 The Ideal Op-Amp

รูปที่ 8.1 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ ซึ่งมีขั้วต่อไฟเลี้ยง V_{DD} และ V_{SS} ซึ่งอินพุตของออปแอมป์คือ v^+ และ v^- และมีเอาต์พุตคือ v_{OUT} รูปที่ 8.1 (ข) แสดงวงจรเทียบเคียงของออปแอมป์ ซึ่งมีคุณสมบัติอุดมคติที่สำคัญดังนี้

- 1) ค่าความต้านทานอินพุต (R_{in}) มีค่าสูงมาก (ประมาณค่าเท่ากับอนันต์)
- 2) ค่าความต้านทานเอาต์พุต (R_{out}) มีค่าน้อยมาก (ประมาณค่าเท่ากับศูนย์)
- 3) อัตราขยายรูปเปิด (A_v) มีค่าสูงมาก (ประมาณ 200,000 เท่า)



รูปที่ 8.1 (ก) สัญลักษณ์ของออปแอมป์ (ข) แสดงวงจรเทียบเคียงของออปแอมป์

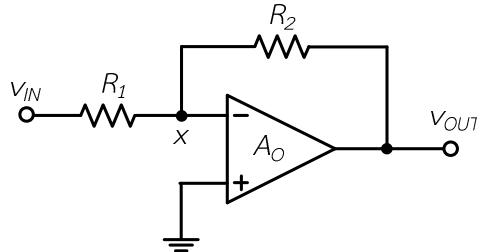


รูปที่ 8.2 (ก) $v_{IN+} > v_{IN-}$ (ข) $v_{IN+} < v_{IN-}$

รูปที่ 8.2 (ก) แสดงการต่อออปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณในลักษณะรูปเปิด เมื่อแรงดัน $v_{IN+} > v_{IN-}$ แรงดันผลต่างที่อินพุตซึ่งมีค่าบวกคูณกับอัตราขยายที่สูงมาก ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าบวกสูงมาก และรูปที่ 8.2 (ข) แสดงการต่อออปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณในลักษณะรูปเปิด เมื่อ $v_{IN+} < v_{IN-}$ แรงดันผลต่างที่อินพุตซึ่งมีค่าลบคูณกับอัตราขยายที่สูงมาก ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลบมาก

8.3 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting amplifier)

รูปที่ 8.3 แสดงวงจรถ่ายแบบกลับเฟส ซึ่งเฟสของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกขยายมีลักษณะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา การวิเคราะห์หาอัตราขยายของวงจรถ่ายแบบกลับเฟสสามารถพิจารณาได้กระแส $i_{R1} = i_{R2}$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการกระแสได้ดังนี้



รูปที่ 8.3 วงจรถ่ายแบบกลับเฟส

$$\frac{V_{IN} - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - V_{OUT}}{R_2} \quad (8.1)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์คือ $v^- = v^+ = 0$ ดังนั้น แรงดันที่โหนด x มีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อแทนค่า $v_x = 0$ ในสมการที่ (8.1) เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = -\frac{V_{OUT}}{R_2} \quad (8.2)$$

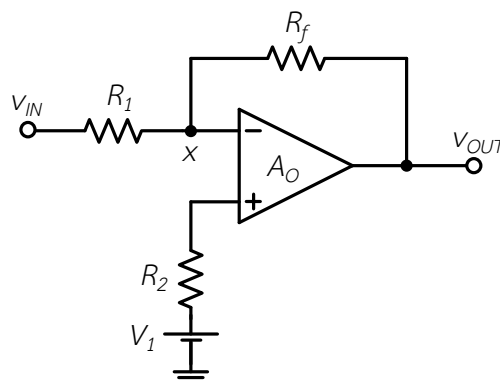
เมื่อจัดรูปสมการเพื่อหาอัตราขยาย เราสามารถเขียนสมการอัตราขยาย $A_v = V_{OUT}/V_{IN}$ มีค่าเท่ากับ

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (8.3)$$

จากสมการอัตราขยายของวงจร แสดงให้เห็นว่าเราสามารถออกแบบอัตราขยายของวงจรได้จากค่าความต้านทาน R_1 และ R_2

แบบฝึกหัดที่ 8.1 จงออกแบบวงจรถ่ายแบบกลับเฟสที่แสดงในรูปที่ 8.3 เพื่อให้วงจรมีอัตราขยาย 4 เท่า

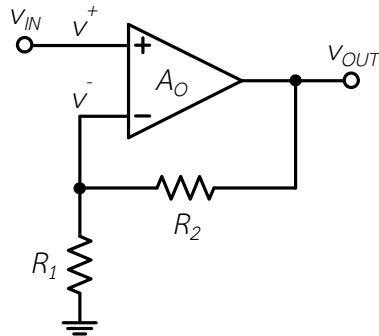
แบบฝึกหัดที่ 8.2 จากวงจรในรูปที่ p8.1 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) เมื่อกำหนดให้ $V_{IN} = 2 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R_f = 5 \text{ k}\Omega$



รูปที่ p8.1

8.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier)

รูปที่ 8.4 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยมีออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุตที่ถูกขยายมีเฟสตรงกับเฟสของสัญญาณอินพุต การวิเคราะห์หาอัตราขยายของวงจรสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 8.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

แรงดัน v^- ถูกแบ่งแรงดันมาจากเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v^- = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad \text{สำหรับ } A = \infty \quad (8.4)$$

ผลต่างของแรงดันอินพุตออปแอมป์มีค่าน้อยมาก ซึ่งเราสามารถประมาณค่าได้เท่ากับศูนย์ ดังนั้น แรงดัน $v^+ \approx v^-$ เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$v^+ = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad (8.5)$$

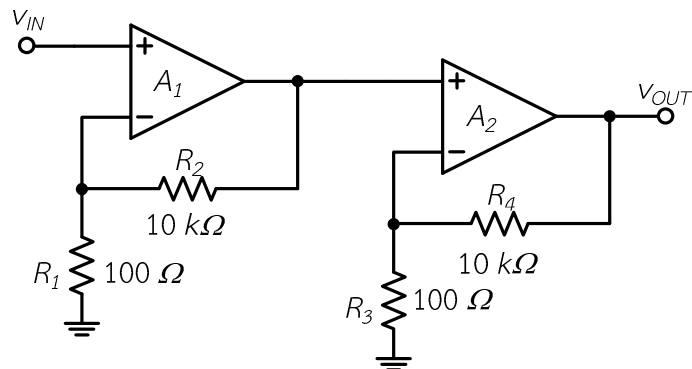
จากวงจรในรูปที่ 8.4 แรงดัน $v_{IN} = v^+$ ดังนั้น แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{IN} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad (8.6)$$

ดังนั้น อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A_V = \frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (8.7)$$

แบบฝึกหัดที่ 8.3 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายที่แสดงในรูปที่ p8.3 ถ้าไมโครโฟนจ่ายสัญญาณที่มีแรงดัน 1 mV



รูปที่ p8.3 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส 2 ภาค

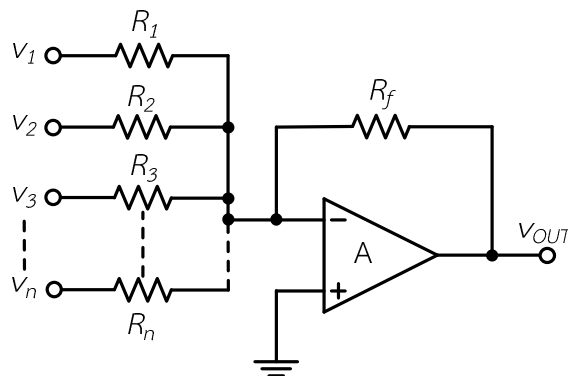
8.6 วงจรรวมแรงดัน (Voltage Adder)

วงจรรวมแรงดันที่แสดงในรูปที่ 8.5 มีอินพุตได้หลายอินพุตซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้ เมื่อมีแรงดันอินพุตเข้ามาที่อินพุตของวงจรรวมแรงดัน แรงดันดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นกระแส แล้วมารวมกัน ดังที่แสดงในสมการ (8.11) และ (8.12)

$$i_{R_1} = \frac{V_1}{R_1}, i_{R_2} = \frac{V_2}{R_2}, \dots, i_{R_n} = \frac{V_n}{R_n} \quad (8.11)$$

ผลรวมของกระแสที่ไหลผ่าน R_f มีค่าเท่ากับ

$$i_{R_f} = i_{R_1} + i_{R_2} + \dots + i_{R_n} \quad (8.12)$$



รูปที่ 8.5 แสดงวงจรรวมแรงดัน

เราทราบแล้วว่า แรงดัน $v^+ = v^- = 0$ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = 0 - i_{R_f} = -i_{R_f} \quad (8.13)$$

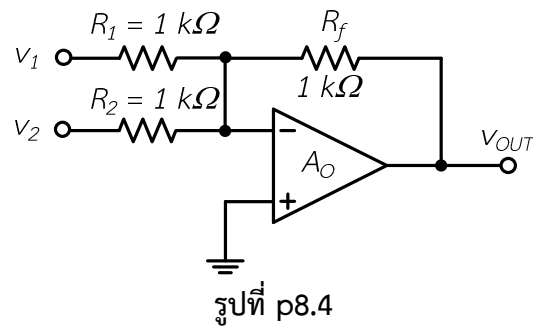
ดังนั้น เมื่อนำกระแสจากสมการ (8.12) มาแทนในสมการ (8.13) เราสามารถแสดงได้ว่า

$$V_{OUT} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) \quad (8.14)$$

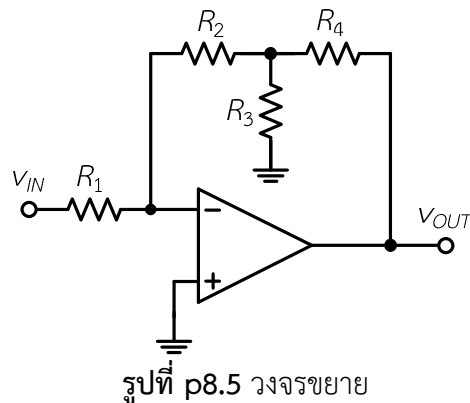
ถ้า กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R$ แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n) \quad (8.15)$$

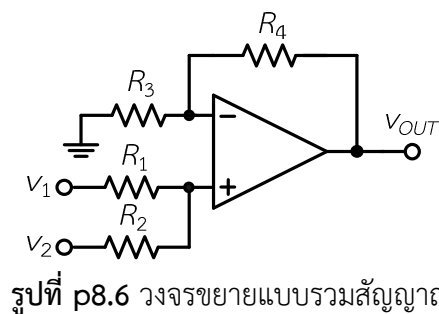
แบบฝึกหัดที่ 8.4 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ของวงจรในรูปที่ p8.4 กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_f = 1 \text{ k}\Omega$



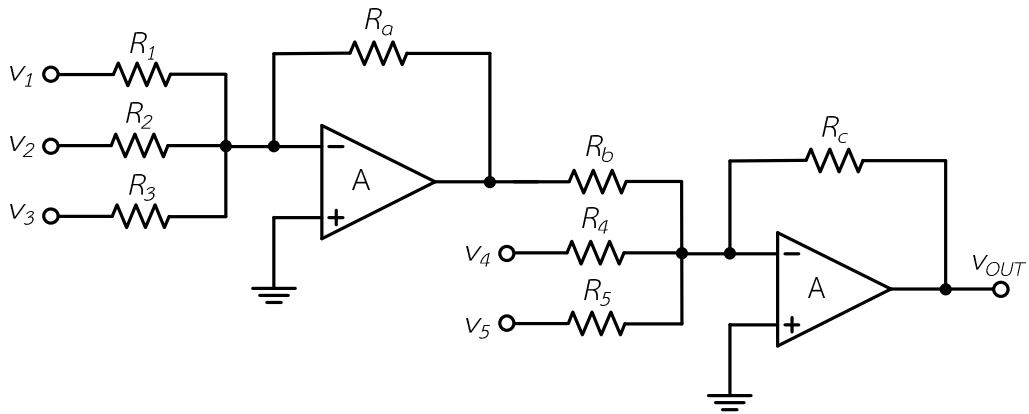
แบบฝึกหัดที่ 8.5 รูปที่ p8.5 แสดงวงจรขยาย จงวิธีการหาสมการเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับอินพุต



แบบฝึกหัดที่ 8.6 รูปที่ p8.6 แสดงวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ กำหนดให้ $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, และ $R_4 = 9 \text{ k}\Omega$ จงวิธีการหาสมการเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับอินพุต



แบบฝึกหัดที่ 8.7 จงหาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ p8.6 กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_a = R_b = R_c = 10\text{ k}\Omega$

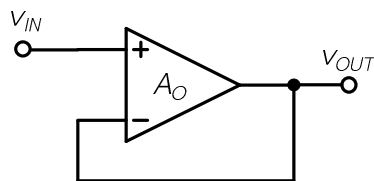


รูปที่ p8.7

8.7 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)

รูปที่ 8.6 แสดงวงจรตามแรงดันที่มีการต่อแรงดัน v^- กับแรงดันเอาต์พุต ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

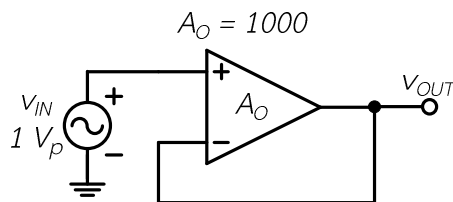
$$V_{OUT} = V_{IN} \tag{8.16}$$



รูปที่ 8.6 วงจรบัฟเฟอร์ หรือวงจรตามแรงดัน

จากสมการที่ 8.16 เราพบว่า อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต

ตัวอย่างที่ 8.1 รูปที่ p8.1 แสดงวงจรบัฟเฟอร์ จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุต ถ้า $V_{IN1} = +1\text{ V}$ และ $A_O = 1000$



รูปที่ p8.8 วงจรตามแรงดัน

วิธีทำ ถ้ากำหนดออปแอมป์มีอัตราขยายเท่ากับอนันต์ แรงดันผลต่างที่อินพุตของออปแอมป์มีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ และ $V_{OUT} = V_{IN}$ ดังนั้น อัตราขยายของวงจรตามแรงดันหาได้ดังนี้

$$V_{OUT} = A_O(v^+ - v^-) \tag{8.17}$$

$$= A_O(v_{IN} - v_{OUT}) \quad (8.18)$$

ดังนั้น

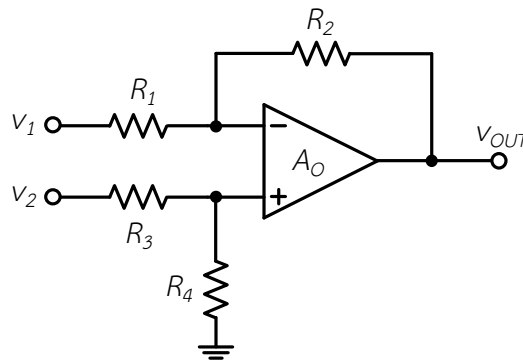
$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = \frac{A_O}{1 + A_O} \quad (8.19)$$

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

แบบฝึกหัดที่ 8.8 จงวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันที่แสดงในรูปที่ 8.6 ถ้ากำหนดให้ $A_O = 100$

8.8 วงจรขยายความแตกต่าง (Difference amplifier)

รูปที่ 8.7 แสดงวงจรขยายความแตกต่าง ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ขยายสัญญาณความแตกต่างสองสัญญาณ เช่น สัญญาณคลื่นหัวใจ สัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับ แรงดันที่ถูกแปลงจากการตรวจจับกระแส



รูปที่ 8.7 วงจรขยายความแตกต่าง

จากวงจรขยายความแตกต่าง เราสามารถวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ละแหล่งจ่าย หรือซูเปอร์โพสิชัน สามารถวิเคราะห์โดยการกำหนดให้แรงดัน v_2 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดัน v_1 มีค่าเท่ากับ

$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (8.20)$$

และแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดัน v_2 โดยกำหนดให้แรงดัน v_1 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{O2} = v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (8.21)$$

จากสมการ (8.20) และ (8.21) แรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่างแสดงได้ดังนี้

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1}v_1 + \frac{1+R_2/R_1}{1+R_3/R_4}v_2 \quad (8.22)$$

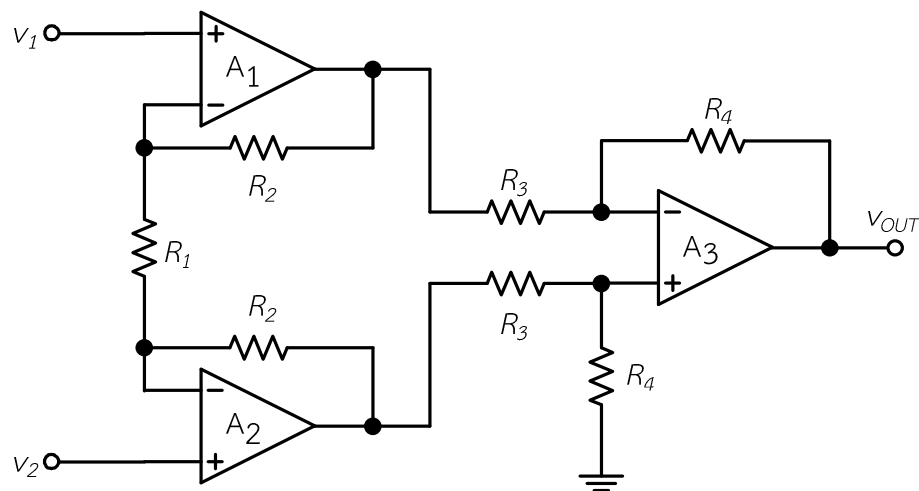
ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_3$ และ $R_2 = R_4$ แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1) \quad (8.23)$$

แบบฝึกหัดที่ 8.9 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่างที่แสดงในรูปที่ 8.7 ถ้า $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_2 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$

8.9 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation amplifier)

รูปที่ 8.8 แสดงวงจรขยายอินสตรูเมนต์ประกอบด้วยวงจรขยายแรงดันผลต่างภาคที่ 1 ซึ่งมีออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบไม่กลับเฟส และวงจรภาคที่ 2 มีออปแอมป์ A_3 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบ ข้อดีของวงจรขยายอินสตรูเมนต์คือ 1) อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่ามากซึ่งเหมาะสมกับการขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็ก เช่น สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor signal) สัญญาณชีวภาพ (Biosignal) สัญญาณจากวงจรบริดจ์ และสัญญาณจากวงจรส่วนหน้า (Front end) ที่มีขนาดเล็ก และ 2) อัตราการกำจัดสัญญาณโหมดร่วมสูง (Common mode rejection ratio) ซึ่งโดยปกติแล้วสัญญาณชีวภาพหรือสัญญาณรบกวนซึ่งซับซ้อนและลบมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นวงจรขยายอินสตรูเมนต์เหมาะสมที่ใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็กและมีสัญญาณโหมดร่วมที่เราไม่ต้องการ



รูปที่ 8.8 วงจรขยายอินสตรูเมนต์

การวิเคราะห์วงจรขยายอินสตรูเมนต์สามารถอธิบายได้ดังนี้ แรงดันผลต่าง $v_{O1}-v_{O2}$ มีค่าเท่ากับ

$$v_{O1} - v_{O2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2) \quad (8.24)$$

แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_3 มีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = -\frac{R_4}{R_3}(v_{O1} - v_{O2}) \quad (8.25)$$

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_2 - v_1) \quad (8.26)$$

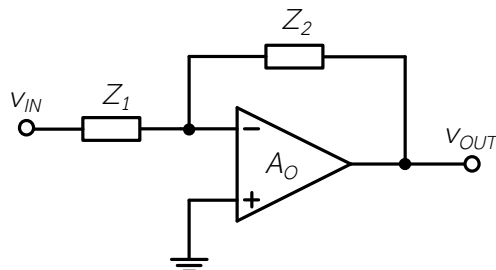
อัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A_{vd} = \frac{v_{OUT}}{v_2 - v_1} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (8.27)$$

แบบฝึกหัดที่ 8.10 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายที่แสดงในรูปที่ 8.7 ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$

8.10 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator)

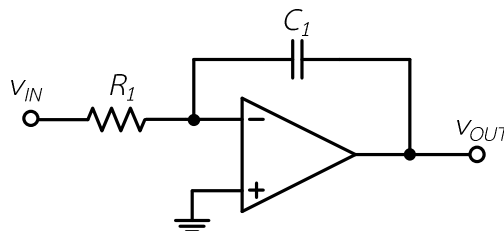
รูปที่ 8.9 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟสประกอบด้วยตัวความต้านทาน Z_1 และ Z_2 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานเชิงความถี่ เมื่อวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 8.9 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}}(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (8.28)$$

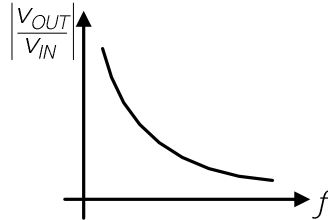
รูปที่ 8.10 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้



รูปที่ 8.10 วงจรอินทิเกรเตอร์

$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}}(s) = -\frac{1/sC_2}{R_1} \tag{8.29}$$

$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}}(s) = -\frac{1}{sR_1C_1} \tag{8.30}$$

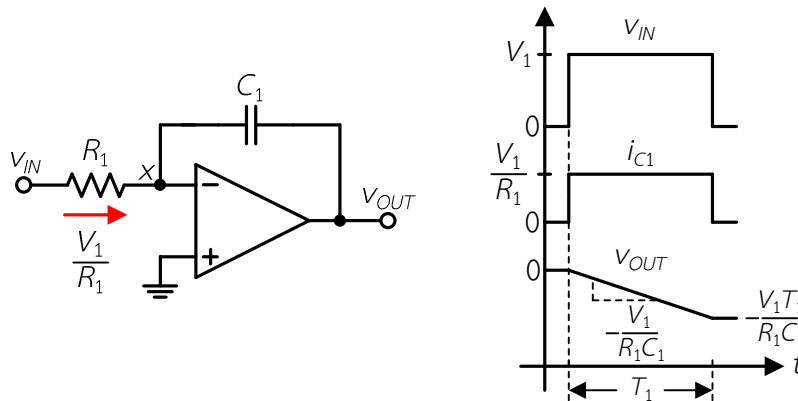


รูปที่ 8.11 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรอินทิเกรเตอร์

$$\frac{v_{IN}}{R_1} = -C_1 \frac{dv_{OUT}}{dt} \tag{8.31}$$

$$v_{OUT} = -\frac{1}{R_1C_1} \int v_{IN} dt \tag{8.32}$$

ตัวอย่างที่ 8.2 จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p8.9 สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อม C_1 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ และออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ



รูปที่ p8.9 (ก) วงจรอินทิเกรเตอร์ และ (ข) สัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจร

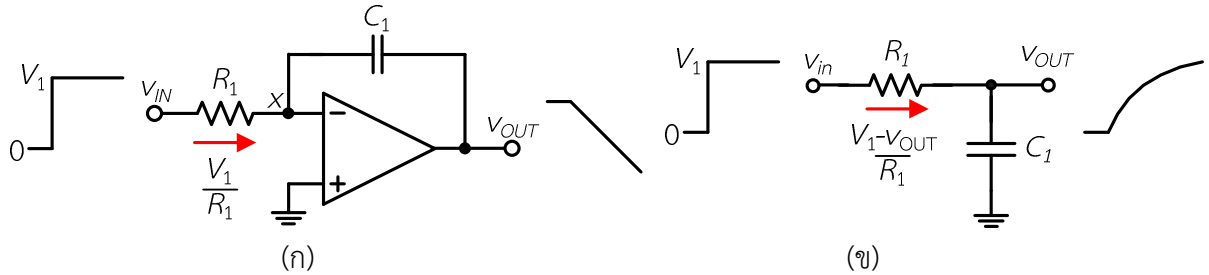
วิธีทำ

$$v_{OUT} = -\frac{1}{R_1C_1} \int v_{IN} dt \tag{8.33}$$

$$= -\frac{v_1}{R_1C_1} t \quad 0 < t < T_b \tag{8.34}$$

ตัวอย่างที่ 8.3 จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p8.2 สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อม C_1 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ แรงดัน V_1 มีค่าเป็นลบ และออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ

$$\frac{V_{IN} - V_X}{R_1} = \frac{V_X - V_{OUT}}{1 / sC_1} \tag{8.35}$$



รูปที่ p8.10 ผลการตอบสนองสัญญาณทางเวลา

และ

$$V_X = \frac{V_{OUT}}{-A_o} \tag{8.36}$$

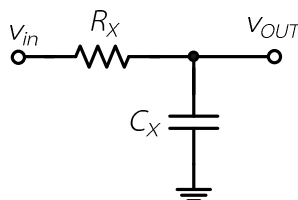
ดังนั้น

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-1}{1 / A_o + (1 + 1 / A_o) s R_1 C_1} \tag{8.37}$$

และความถี่โพลที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งศูนย์ไปยังค่า

$$s_p = \frac{-1}{(A_o + 1) R_1 C_1} \tag{8.38}$$

ตัวอย่างที่ 8.4 จากพื้นฐานวงจรกรองแบบ R_C ที่แสดงในภาพที่ p8.3 ความถี่โพลมีค่าเท่ากับ $-1/(R_X C_X)$ จงหาค่า R_X และ C_X ที่ทำให้ความถี่โพล



รูปที่ p8.11 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

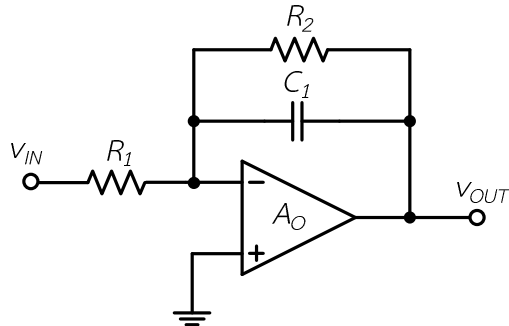
วิธีทำ จากสมการที่ 8.38 ค่า $C_X R_X$ มีค่าเท่ากับ

$$C_X R_X = (A_o + 1) R_1 C_1 \tag{8.39}$$

ทำการเลือกค่า $R_X = R_1$ และค่า $C_X = (A_o + 1) C_1$ ถ้ามีการต่อกับออปแอมป์ ออปแอมป์จะทำให้ค่า C_1 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย $A_o + 1$ เท่า

แบบฝึกหัดที่ 8.11 ถ้ากำหนดให้ $C_x = C_1$ ค่า R_x มีค่าเท่าไร

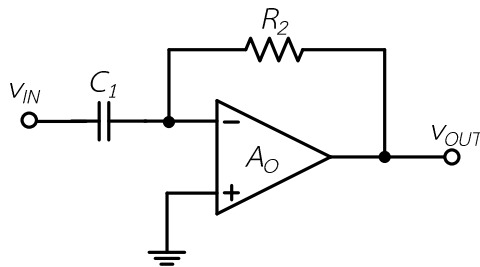
ตัวอย่างที่ 8.5 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโบเดพร้อมของวงจรรีโตนีเกรเตอร์ในรูปที่ p8.12



รูปที่ p8.12 วงจรรีโตนีเกรเตอร์แบบมีอัตราขยาย

8.12 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiator)

รูปที่ 8.13 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียล ประกอบด้วยออปแอมป์ A_{o1} ตัวต้านทาน R_1 ซึ่งต่อลักษณะป้อนกลับแบบลบ และตัวเก็บประจุต่อระหว่างอินพุตของวงจรรีโตนีเกรเตอร์กับขาลบของออปแอมป์

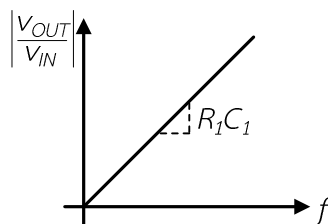


รูปที่ 8.13 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = - \frac{R_2}{1 / sC_1} \quad (8.40)$$

$$= -sR_2C_1 \quad (8.41)$$

รูปที่ 8.14 แสดงกราฟขนาดของผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

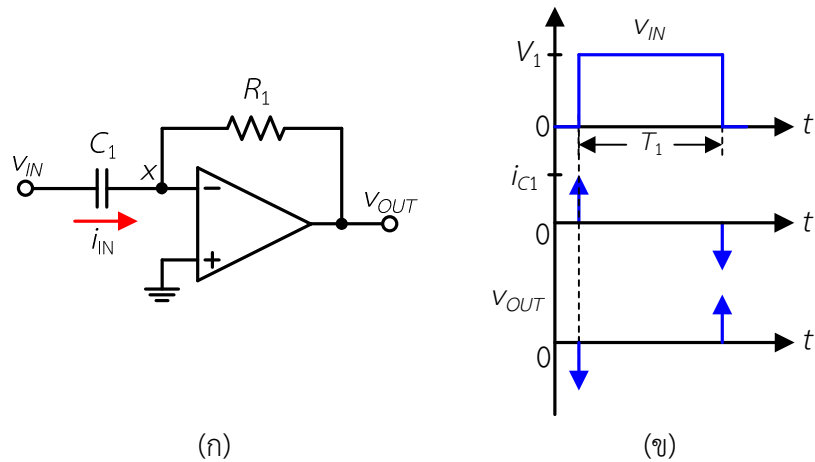


รูปที่ 8.14

$$C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} = -\frac{v_{OUT}}{R_1} \quad (8.42)$$

$$v_{OUT} = -R_1 C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (8.43)$$

ตัวอย่างที่ 8.6 จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p8.13 สมมุติให้ออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ



รูปที่ p8.13

วิธีทำ ขณะเป็นเวลา $t = 0^-$, แรงดัน $v_{IN} = 0$ และ $v_{OUT} = 0$ เมื่อสัญญาณอิมพัลส์ V_1 ป้อนเข้า v_{IN} กระแสจะไหลผ่าน C_1 เนื่องจาก V_X ของออปแอมป์มีค่าเท่ากับกราวด์ กระแส i_{IN} หาได้จาก

$$i_{IN} = C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (8.44)$$

$$= C_1 V_1 \delta(t) \quad (8.45)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 จะทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$v_{OUT} = -i_{IN} R_1 \quad (8.46)$$

$$= -R_1 C_1 V_1 \delta(t) \quad (8.47)$$

เมื่อเวลาเวลา $t = T_1$, แรงดัน $v_{IN} = 0$

$$i_{IN} = C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (8.48)$$

$$= C_1 V_1 \delta(t) \quad (8.49)$$

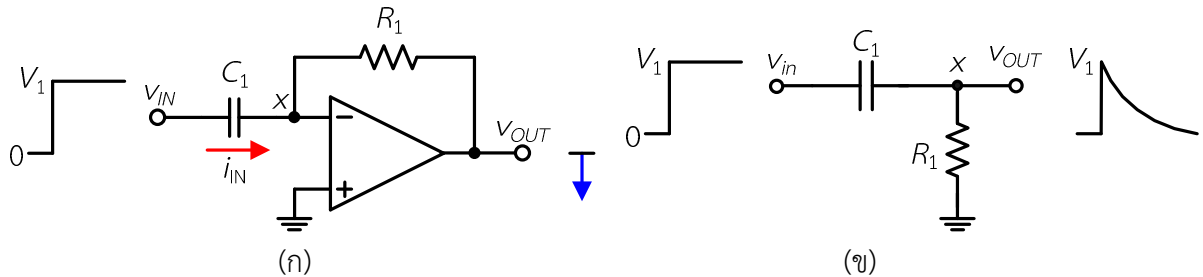
แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$v_{OUT} = -i_{IN} R_1 \quad (8.50)$$

$$= R_1 C_1 V_1 \delta(t) \tag{8.51}$$

C_1 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย $A_o + 1$ เท่า

แบบฝึกหัดที่ 8.12 ถ้า V_1 มีค่าเป็นลบ จงวาดแรงดันเอาต์พุตของวงจร



รูปที่ p8.14

รูปที่ p8.14 (ก) แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้โอปแอมป์ต่อในลักษณะกลับเฟส ถ้าเวลาดีเลย์ซึ่งเท่ากับ $R_1 C_1$ มีค่าน้อยมาก เราสามารถวาดวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเรซินเตอร์ได้ดังรูปที่ 8.14(ข) ซึ่งแสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลแบบอุดมคติได้ที่ใช้ RC

$$\frac{V_{IN} - V_X}{1 / sC_1} = \frac{V_X - V_{OUT}}{R_1} \tag{8.52}$$

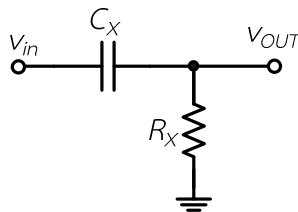
แทนค่า V_X ด้วย $-V_{OUT}/A_o$ เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรดังนี้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-sR_1 C_1}{(1 + 1/A_o) + (sR_1 C_1 / A_o)} \tag{8.53}$$

ค่าความถี่โพลของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับ

$$s_p = -\frac{A_o + 1}{R_1 C_1} \tag{8.54}$$

ตัวอย่างที่ 8.7 จงหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในรูปที่ p8.7 และเลือกค่า R_X และ C_X ซึ่งเป็นค่าโพลของวงจร



รูปที่ p8.15 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วิธีทำ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ RC ได้ดังนี้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_X}{R_X + (1 / sC_X)} \tag{8.55}$$

$$= \frac{sR_X C_X}{1 + sR_X C_X} \quad (8.56)$$

วงจรมีค่าซีโรที่จุดศูนย์กลาง ($s = 0$) และค่าโพลที่ $-1/(R_X C_X)$ เพื่อให้ได้ค่าโพลตามสมการ 8.56 ดังนั้น

$$\frac{1}{R_X C_X} = \frac{1 + A_o}{R_1 C_1} \quad (8.57)$$

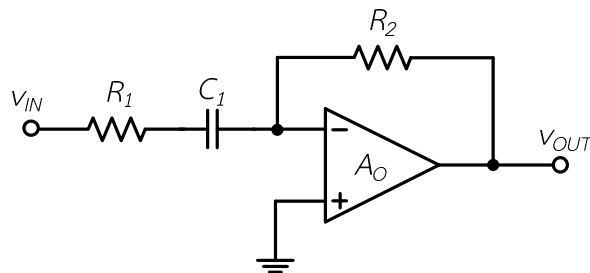
ทำการเลือกค่า R_X และ C_X

$$R_X = \frac{R_1}{1 + A_o} \quad (8.58)$$

$$C_X = C_1 \quad (8.59)$$

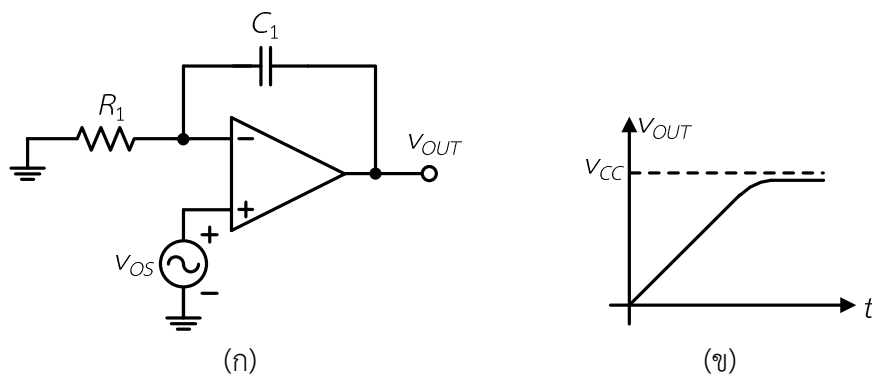
แบบฝึกหัดที่ 8.13 ถ้ากำหนดให้ $R_X = R_1$ ค่า C_X มีค่าเท่าไร

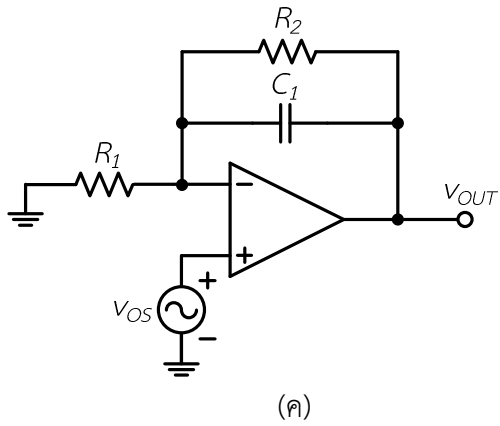
แบบฝึกหัดที่ 8.14 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโพลเดร็อดของวงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ในรูปที่ p8.16



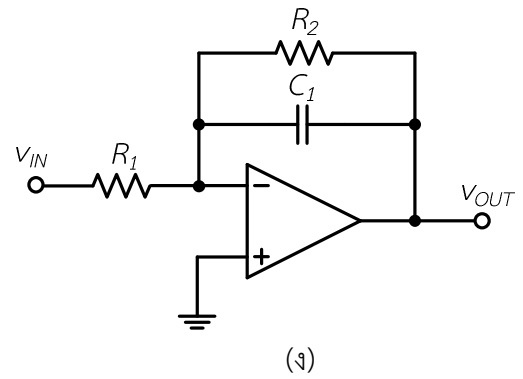
รูปที่ p8.16 วงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์แบบมีอัตราขยาย

แบบฝึกหัดที่ 8.15 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโพลเดร็อดของวงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ในรูปที่ p2.17





(ค)



(ง)

รูปที่ p8.17 วงจรดีฟเฟอเรนเชียล

เอกสารอ้างอิง

1. Behzad Razavi "Fundamental of Microelectronics"
2. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith "Microelectronic Circuit"
3. Donald A. Neamen "Microelectronic Circuit Analysis and Design"