

บทที่ 2

วงจรออปแอมป์

(Op-Amp Circuits)

2.1 บทนำ

วงจรออปแอมป์ ที่มีบทบาทสำคัญมากในการนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรอนาล็อกกับวงจรดิจิทัล ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบวงจรขยายแบบต่าง ๆ เช่น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส, วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส, วงจรตามแรงดัน, วงจรกรองความถี่, วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก เป็นต้น

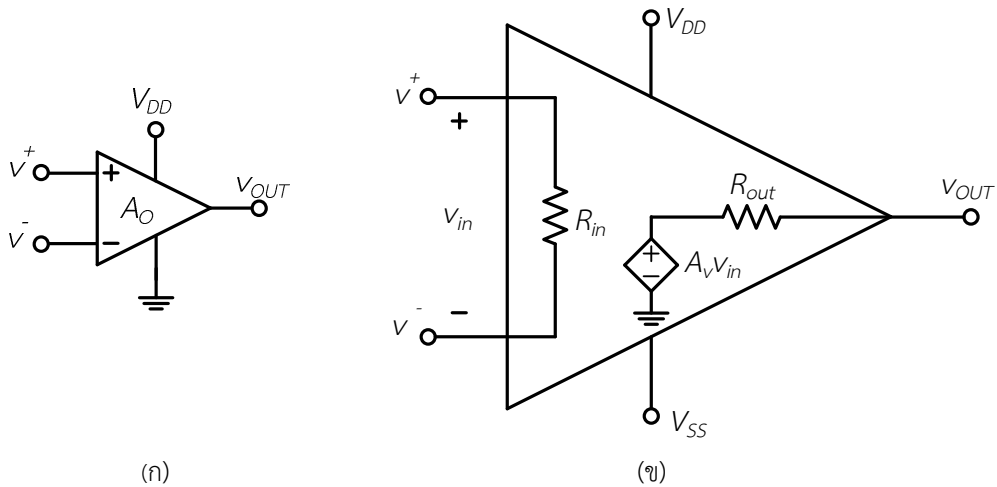
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของวงจรขยาย

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

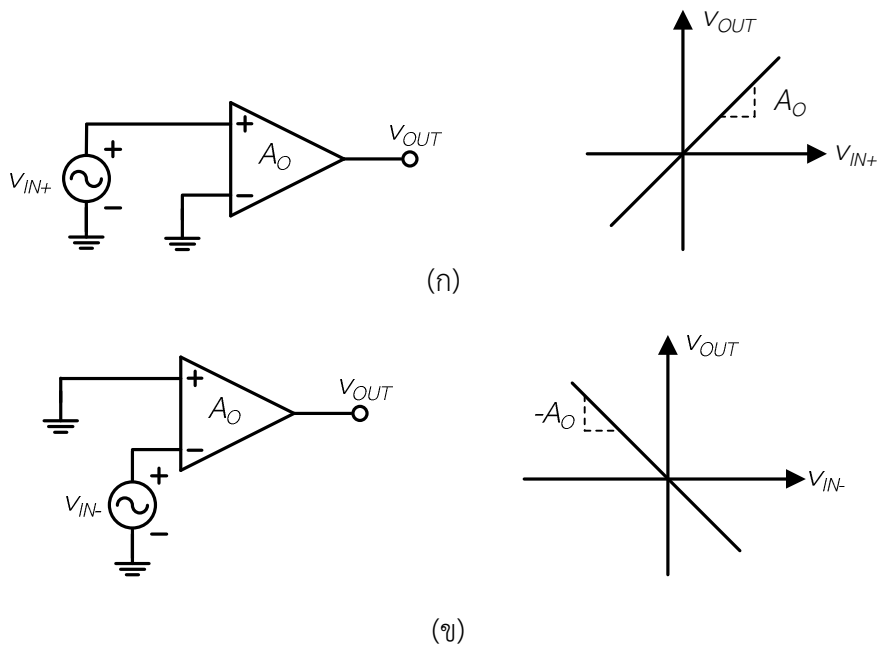
2.2 ออปแอมป์อุดมคติ (The Ideal Op-Amp)

รูปที่ 2.1 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ ซึ่งมีขั้วต่อไฟเลี้ยง V_{DD} และ V_{SS} ซึ่งอินพุตของออปแอมป์คือ V^+ และ V^- และมีเอาต์พุตคือ V_{OUT} รูปที่ 2.1 (ข) แสดงวงจรเทียบเคียงของออปแอมป์ ซึ่งมีคุณสมบัติอุดมคติที่สำคัญดังนี้

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



รูปที่ 2.1 (ก) สัญลักษณ์ของออปแอมป์ (ข) แสดงวงจรเทียบเคียงของออปแอมป์

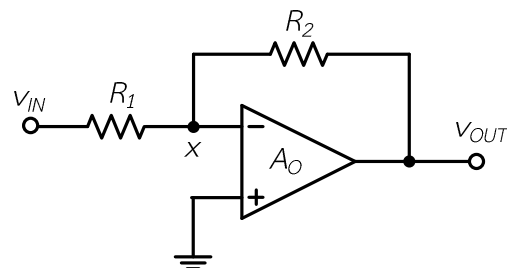


รูปที่ 2.2 (ก) $V_{IN+} > V_{IN-}$ (ข) $V_{IN+} < V_{IN-}$

รูปที่ 2.2 แสดงการต่อออปแอมป์ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณในลักษณะลูบเปิด เมื่อแรงดัน $v_{IN+} > v_{IN-}$ แรงดันผลต่างที่อินพุตซึ่งมีค่าบวกคูณกับอัตราขยายที่สูงมาก ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าบวกสูงมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และเมื่อ $v_{IN+} < v_{IN-}$ แรงดันผลต่างที่อินพุตซึ่งมีค่าลบคูณกับอัตราขยายที่สูงมาก ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลบมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 (ข)

2.3 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting amplifier)

รูปที่ 2.3 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟส ซึ่งเฟสของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกขยายมีลักษณะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา การวิเคราะห์หาอัตราขยายของวงจรขยายแบบกลับเฟสสามารถพิจารณาได้ กระแส $i_{R1} = i_{R2}$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการกระแสได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$\frac{v_{IN} - v_x}{R_1} = \frac{v_x - v_{OUT}}{R_2} \quad (2.1)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์คือ $v^- = v^+$ ดังนั้น แรงดันที่โหนด x มีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อแทนค่า $v_x = 0$ ในสมการที่ (2.1) เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{v_{IN}}{R_1} = -\frac{v_{OUT}}{R_2} \quad (2.2)$$

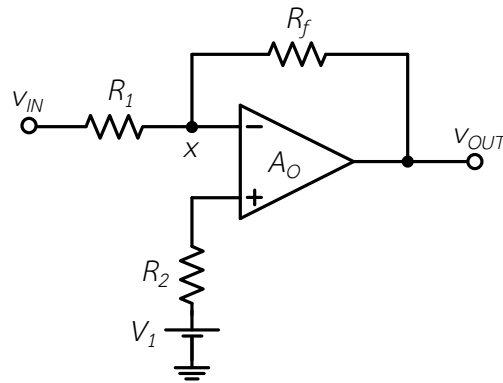
เมื่อจัดรูปสมการเพื่อหาอัตราขยาย เราสามารถเขียนสมการอัตราขยาย $A_v = v_{OUT}/v_{IN}$ มีค่าเท่ากับ

$$A_v = \frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.3)$$

จากสมการอัตราขยายของวงจร แสดงให้เห็นว่าเราสามารถออกแบบอัตราขยายของวงจรได้จากค่าความต้านทาน R_1 และ R_2

ตัวอย่างที่ 2.1 จงออกแบบวงจรขยายแบบกลับเฟสที่แสดงในรูปที่ 2.3 เพื่อให้วงจรมีอัตราขยาย 4 เท่า

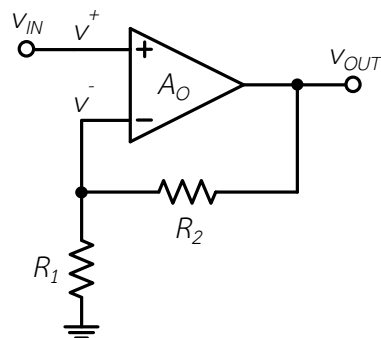
แบบฝึกหัดที่ 2.1 จากวงจรในรูปที่ 2.1 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต (v_{OUT}) เมื่อกำหนดให้ $v_{IN} = 2 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R_f = 5 \text{ k}\Omega$



รูปที่ p2.1

2.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier)

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยมีออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุตที่ถูกขยายมีเฟสตรงกับเฟสของสัญญาณอินพุต การวิเคราะห์หาอัตราขยายของวงจรสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

แรงดัน v^- ถูกแบ่งแรงดันมาจากเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v^- = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad \text{สำหรับ } A = \infty \quad (2.4)$$

ผลต่างของแรงดันอินพุตออปแอมป์มีค่าน้อยมาก ซึ่งเราสามารถประมาณค่าได้เท่ากับศูนย์ ดังนั้นแรงดัน $v^+ \approx v^-$ เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$v^+ = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad (2.5)$$

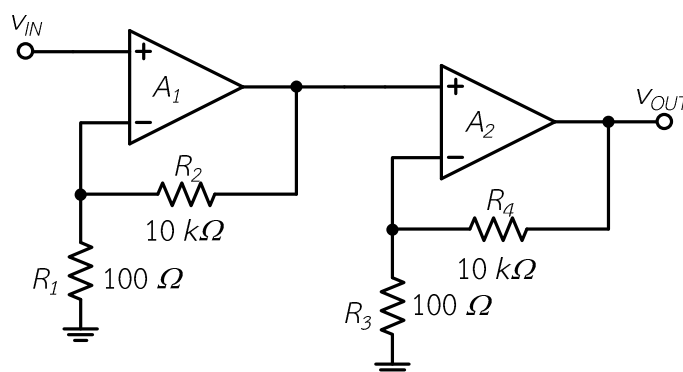
จากวงจรในรูปที่ 2.4 แรงดัน $v_{IN} = v^+$ ดังนั้น แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{IN} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{OUT} \quad (2.6)$$

ดังนั้น อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A_V = \frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.7)$$

ตัวอย่างที่ 2.3 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายที่แสดงในรูปที่ p2.3 ถ้าไมโครโฟนจ่ายสัญญาณที่มีแรงดัน 1 mV



รูปที่ p2.3 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส 2 ภาค

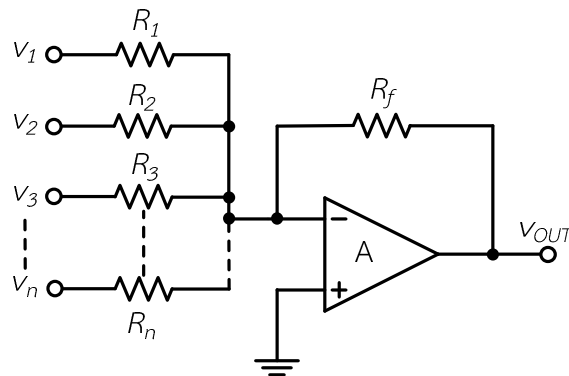
2.6 วงจรรวมแรงดัน (Voltage Adder)

รูปที่ 2.5 แสดงวงจรรวมแรงดันซึ่งมีอินพุตได้หลายอินพุตซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้ เมื่อมีแรงดันอินพุตเข้ามาที่อินพุตของวงจรรวมแรงดัน แรงดันดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นกระแสแล้วมารวมกัน ดังที่แสดงในสมการ (2.11) และ (2.12)

$$i_{R_1} = \frac{v_1}{R_1}, \quad i_{R_2} = \frac{v_2}{R_2}, \quad \dots, \quad i_{R_n} = \frac{v_n}{R_n} \quad (2.11)$$

ผลรวมของกระแสที่ไหลผ่าน R_F มีค่าเท่ากับ

$$i_{R_F} = i_{R_1} + i_{R_2} + \dots + i_{R_n} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรรวมแรงดัน

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

$$v_{OUT} = 0 - i_{Rf} = -i_{Rf} \quad (2.13)$$

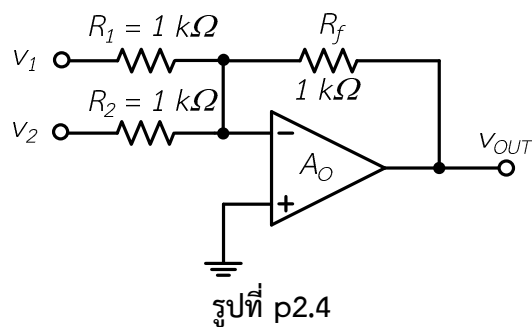
ดังนั้น เมื่อนำกระแสจากสมการ (2.12) มาแทนในสมการ (2.13) เราสามารถแสดงได้ว่า

$$v_{OUT} = -R_f \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} + \dots + \frac{v_n}{R_n} \right) \quad (2.14)$$

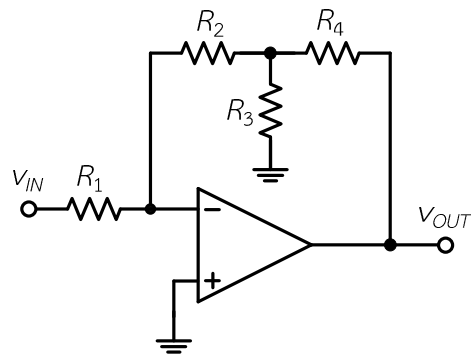
ถ้า กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R$ แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = -\frac{R_f}{R} (v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n) \quad (2.15)$$

ตัวอย่างที่ 2.4 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต v_{OUT} ของวงจรในรูปที่ p2.4 กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_f = 1\text{k}\Omega$

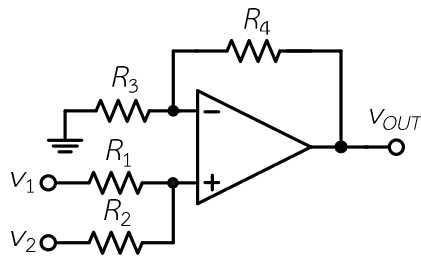


แบบฝึกหัดที่ 2.5 รูปที่ p2.5 แสดงวงจรขยาย จงแสดงวิธีการหาสมการเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับอินพุต



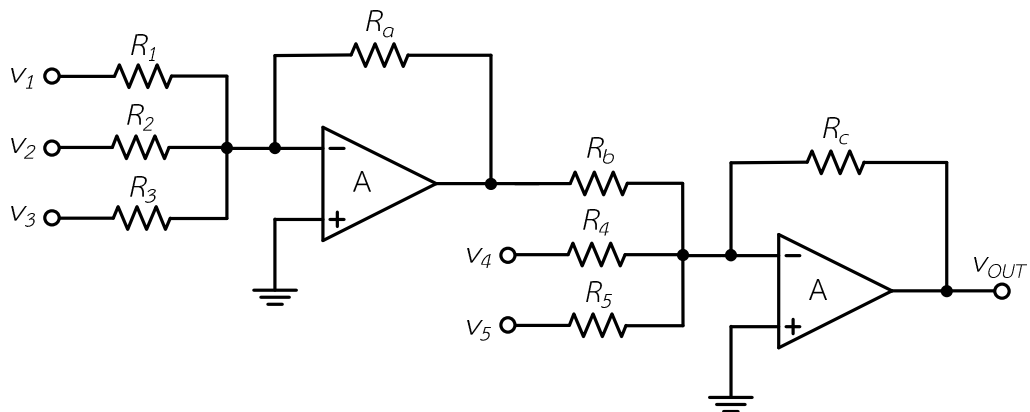
รูปที่ p2.5 วงจรขยาย

แบบฝึกหัดที่ 2.6 รูปที่ p2.6 แสดงวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ กำหนดให้ $R_1 = 2\text{ k}\Omega$, $R_2 = 3\text{ k}\Omega$, $R_3 = 1\text{ k}\Omega$, และ $R_4 = 9\text{ k}\Omega$ จงแสดงวิธีการหาสมการเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับอินพุต



รูปที่ p2.6 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

แบบฝึกหัดที่ 2.7 จงหาสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ p2.7 กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_a = R_b = R_c = 10\text{ k}\Omega$

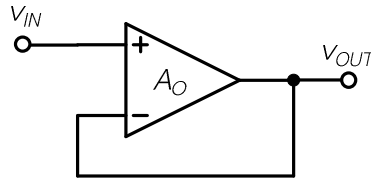


รูปที่ p2.7

2.7 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)

รูปที่ 2.6 แสดงวงจรตามแรงดันที่มีการต่อแรงดัน v_- กับแรงดันเอาต์พุต ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

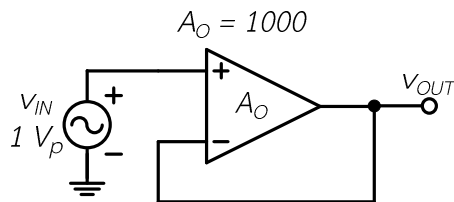
$$V_{OUT} = V_{IN} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.6 วงจรบัฟเฟอร์ หรือวงจรตามแรงดัน

จากสมการที่ 2.16 เราพบว่า อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต

ตัวอย่างที่ 2.5 รูปที่ p2.1 แสดงวงจรบัฟเฟอร์ จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุต ถ้า $v_{IN1} = +1 V$ และ $A_O = 1000$



รูปที่ p2.1 วงจรตามแรงดัน

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

$$v_{OUT} = A_O(v^+ - v^-) \quad (2.17)$$

$$= A_O(v_{IN} - v_{OUT}) \quad (2.18)$$

ดังนั้น

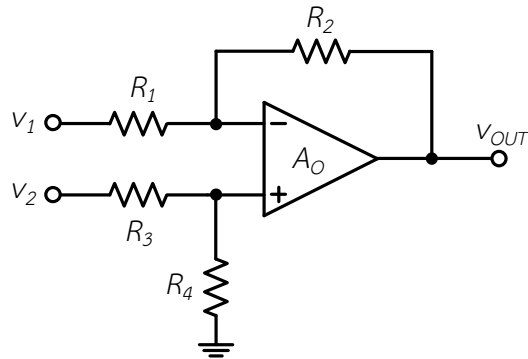
$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = \frac{A_O}{1 + A_O} \quad (2.19)$$

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

แบบฝึกหัดที่ 2.7 จงวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตของวงจรตามแรงดันที่แสดงในรูปที่ 2.6 ถ้ากำหนดให้ $A_O = 100$

2.8 วงจรขยายความแตกต่าง (Difference amplifier)

รูปที่ 2.7 แสดงวงจรขยายความแตกต่าง ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ขยายสัญญาณความแตกต่างสองสัญญาณ เช่น สัญญาณคลื่นหัวใจ สัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจจับ แรงดันที่ถูกแปลงจากการตรวจจับกระแส



รูปที่ 2.7 วงจรขยายความแตกต่าง

จากวงจรขยายความแตกต่าง เราสามารถวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ละแหล่งจ่าย หรือซูเปอร์โพสิชัน สามารถวิเคราะห์โดยการกำหนดให้แรงดัน v_2 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดัน v_1 มีค่าเท่ากับ

$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (2.20)$$

และแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดัน v_2 โดยกำหนดให้แรงดัน v_1 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{O2} = v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) แรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่างแสดงได้ดังนี้

$$v_O = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \frac{1 + R_2 / R_1}{1 + R_3 / R_4} v_2 \quad (2.22)$$

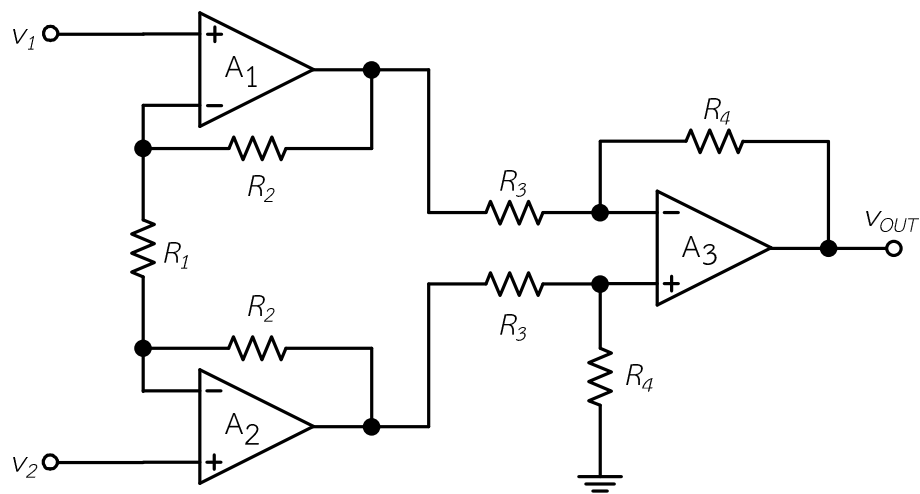
ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_3$ และ $R_2 = R_4$ แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (2.23)$$

ตัวอย่างที่ 2.8 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่างที่แสดงในรูปที่ 2.6 ถ้า $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_2 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$

2.9 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation amplifier)

รูปที่ 2.8 แสดงวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์ประกอบด้วยวงจรถ่ายแรงดันผลต่างภาคที่ 1 ซึ่งมีออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบไม่กลับเฟส และวงจรถ่ายภาคที่ 2 มีออปแอมป์ A_3 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบ ข้อดีของวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์คือ 1) อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่ามากซึ่งเหมาะสมกับการขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็ก เช่น สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor signal), สัญญาณชีวภาพ (Biosignal), สัญญาณจากวงจรบริดจ์ และสัญญาณจากวงจรส่วนหน้า (Front end) ที่มีขนาดเล็ก และ 2) อัตราการกำจัดสัญญาณโหมตรงร่วมสูง (Common mode rejection ratio) ซึ่งโดยปกติแล้วสัญญาณชีวภาพ หรือสัญญาณรบกวนซึ่งชั่ววอกและลบมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์เหมาะสมที่ใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็กและมีสัญญาณโหมตรงร่วมที่เราไม่ต้องการ



รูปที่ 2.8 วงจรถ่ายอินสตรูเมนต์

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

$$v_{O1} - v_{O2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2) \quad (2.24)$$

แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_3 มีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = -\frac{R_4}{R_3}(v_{O1} - v_{O2}) \quad (2.25)$$

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_2 - v_1) \quad (2.26)$$

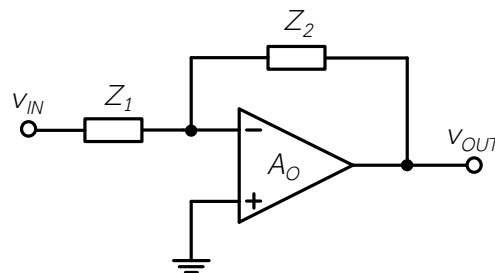
อัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A_{vd} = \frac{V_{OUT}}{v_2 - v_1} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (2.27)$$

ตัวอย่างที่ 2.9 จงคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายที่แสดงในรูปที่ 2.7 ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$

2.10 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator)

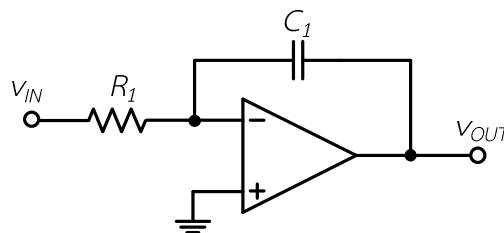
รูปที่ 2.9 แสดงวงจรขยายแบบกลับเฟสประกอบด้วยตัวความต้านทาน Z_1 และ Z_2 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานเชิงความถี่ เมื่อวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 2.9 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.28)$$

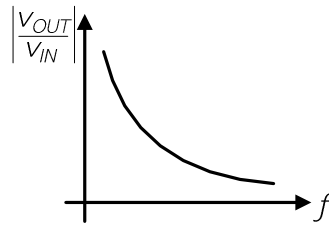
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรอินทิเกรเตอร์

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = -\frac{1/sC_1}{R_1} \quad (2.29)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}(s) = -\frac{1}{sR_1C_1} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.11 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรอินทิเกรเตอร์

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1 s}{R_1} \quad (8.28)$$

$$= -\frac{1}{R_1 C_1 s}. \quad (8.29)$$

Providing a pole at the origin,⁴ the circuit operates as an integrator (and a low-pass filter). Figure 8.11 plots the magnitude of V_{out}/V_{in} as a function of frequency. This can also be seen in the time domain. Equating the currents flowing through R_1 and C_1 gives

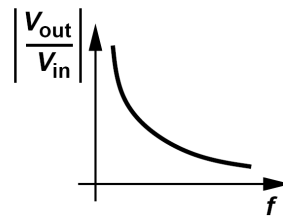


Figure 8.11 Frequency response of integrator.

$$\frac{V_{in}}{R_1} = -C_1 \frac{dV_{out}}{dt} \quad (8.30)$$

and hence

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt. \quad (8.31)$$

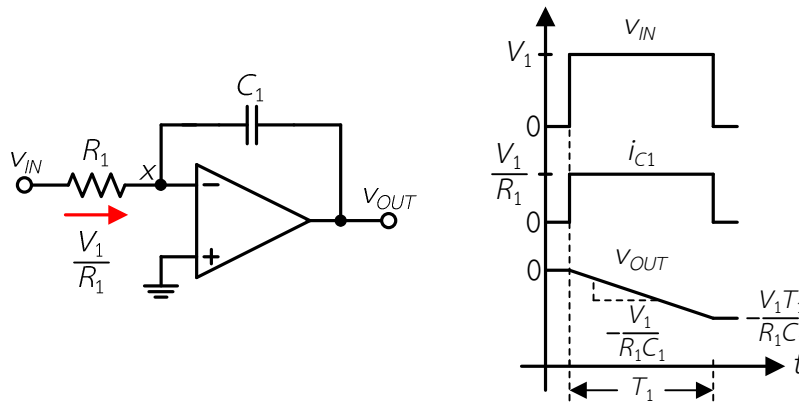
Equation (8.29) indicates that V_{out}/V_{in} approaches infinity as the input frequency goes to zero. This is to be expected: the capacitor impedance becomes very large at low frequencies, approaching an open circuit and reducing the circuit to the open-loop op amp.

As mentioned at the beginning of the chapter, integrators originally appeared in analog computers to simulate differential equations. Today, electronic integrators find usage in analog filters, control systems, and many other applications.

$$\frac{v_{IN}}{R_1} = -C_1 \frac{dv_{OUT}}{dt} \quad (2.28)$$

$$v_{OUT} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int v_{IN} dt \quad (2.28)$$

ตัวอย่างที่ 2.xx จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p2.xx สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อม C_1 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ และออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ



รูปที่ p2.xx (ก) วงจรอินทิเกรเตอร์ และ (ข) สัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจร

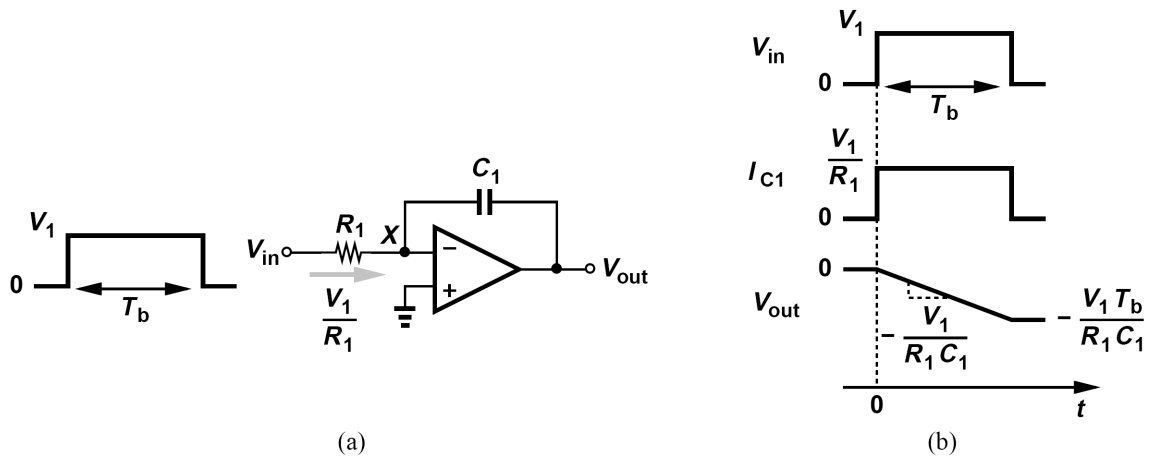


Figure 8.12 (a) Integrator with pulse input, (b) input and output waveforms.

Solution

When the input jumps from 0 to V_1 , a constant current equal to V_1/R_1 begins to flow through the resistor and hence the capacitor, forcing the right plate voltage of C_1 to fall linearly with time while its left plate is pinned at zero [Fig. 8.12(b)]:

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt \quad (8.32)$$

$$= -\frac{V_1}{R_1 C_1} t \quad 0 < t < T_b. \quad (8.33)$$

(Note that the output waveform becomes “sharper” as $R_1 C_1$ decreases.) When V_{in} returns to zero, so do the currents through R_1 and C_1 . Thus, the voltage across the capacitor and hence V_{out} remain equal to $-V_1 T_b / (R_1 C_1)$ (proportional to the area under the input pulse) thereafter.

วิธีทำ

$$v_{OUT} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int v_{IN} dt \quad (2.28)$$

$$= -\frac{V_1}{R_1 C_1} t \quad 0 < t < T_b \quad (2.28)$$

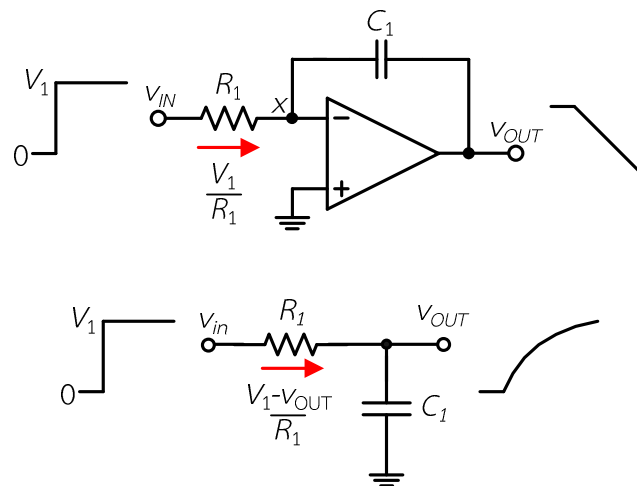
แบบฝึกหัดที่ 2.xx จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p2.xx สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อม C_1 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ แรงดัน V_1 มีค่าเป็นลบ และออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ

The above example demonstrates the role of the virtual ground in the integrator. The ideal integration expressed by (8.32) occurs because the left plate of C_1 is pinned at zero. To gain more insight, let us compare the integrator with a first-order RC filter in terms of their step response. As illustrated in Fig. 8.13, the integrator forces a *constant* current (equal to V_1/R_1) through the capacitor. On the other hand, the RC filter creates a current equal to $(V_{in} - V_{out})/R_1$, which *decreases* as V_{out} rises, leading to an increasingly slower voltage variation across C_1 . We may therefore consider the RC filter as a “passive” approximation of the integrator. In fact, for a large R_1C_1 product, the exponential response of Fig. 8.13(b) becomes slow enough to be approximated as a ramp.

We now examine the performance of the integrator for $A_0 < \infty$. Denoting the potential of the virtual ground node in Fig. 8.10 with V_X , we have

$$\frac{V_{in} - V_X}{R_1} = \frac{V_X - V_{out}}{\frac{1}{C_1 s}} \quad (8.34)$$

$$\frac{v_{IN} - v_X}{R_1} = \frac{v_X - v_{OUT}}{1 / sC_1} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.xx ผลการตอบสนองสัญญาณทางเวลา

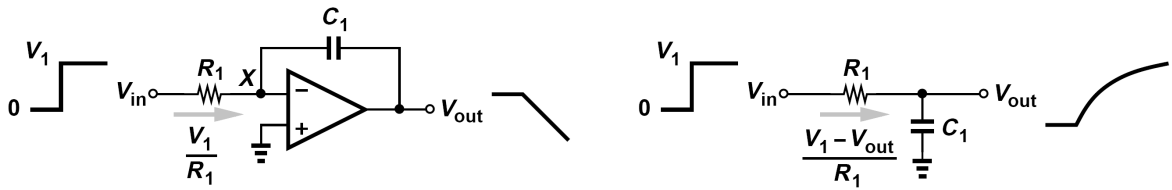


Figure 8.13 Comparison of integrator with and RC circuit.

and

$$V_X = \frac{V_{out}}{-A_0}. \quad (8.35)$$

Thus,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-1}{\frac{1}{A_0} + (1 + \frac{1}{A_0})R_1C_1s}, \quad (8.36)$$

revealing that the gain at $s = 0$ is limited to A_0 (rather than infinity) and the pole frequency has moved from zero to

$$s_p = \frac{-1}{(A_0 + 1)R_1C_1}. \quad (8.37)$$

Such a circuit is sometimes called a “lossy” integrator to emphasize the nonideal gain and pole position.

และ

$$V_X = \frac{V_{OUT}}{-A_0} \quad (2.27)$$

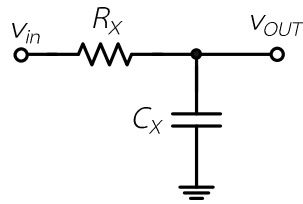
ดังนั้น

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-1}{1/A_0 + (1 + 1/A_0)sR_1C_1} \quad (2.27)$$

และความถี่โพลที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งศูนย์ไปยังค่า

$$s_p = \frac{-1}{(A_0 + 1)R_1C_1} \quad (2.27)$$

แบบฝึกหัดที่ 2.6 จากพื้นฐานวงจรกรองแบบ R_C ที่แสดงในภาพที่ p2.xx ความถี่โพลมีค่าเท่ากับ $-1/(R_X C_X)$ จงหาค่า R_X และ C_X ที่ทำให้ความถี่โพล



รูปที่ p2.xx วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วิธีทำ จากสมการที่ 2.xx ค่า $C_X R_X$ มีค่าเท่ากับ

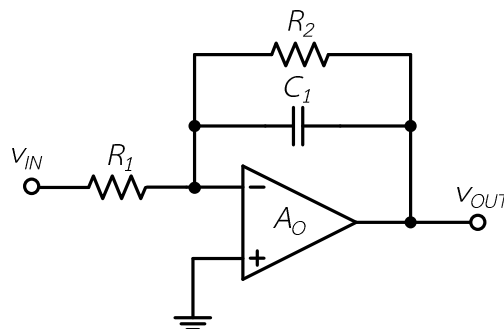
$$C_X R_X = (A_o + 1) R_1 C_1 \quad (2.xx)$$

ทำการเลือกค่า $R_X = R_1$ และค่า $C_X = (A_o + 1)C_1$

ถ้ามีการต่อกับออปแอมป์ ออปแอมป์จะทำให้ค่า C_1 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย $A_o + 1$ เท่า

แบบฝึกหัดที่ 2.xx ถ้ากำหนดให้ $C_X = C_1$ ค่า R_X มีค่าเท่าไร

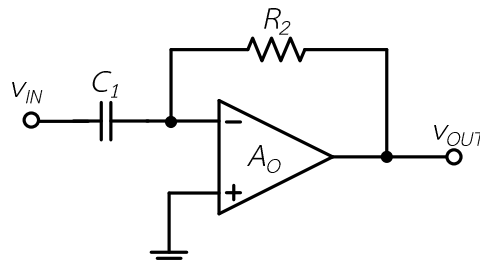
ตัวอย่างที่ 2.9 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโพลเดหรือตของวงจรอินทิเกรเตอร์ในรูปที่ p2.11



รูปที่ p2.11 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบมีอัตราขยาย

2.12 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiator)

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียล ประกอบด้วยออปแอมป์ A_o ตัวต้านทาน R_1 ซึ่งต่อลักษณะป้อนกลับแบบลบ และตัวเก็บประจุต่อระหว่างอินพุตของวงจรกับขาลบของออปแอมป์



รูปที่ 2.10 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล

$$\frac{v_{OUT}}{v_{IN}} = -\frac{R_1}{1/sC_1} \quad (2.27)$$

$$= -sR_1C_1 \quad (2.27)$$

รูปที่ 2.xx แสดงกราฟขนาดของผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรถติเฟอเรนชิเอเตอร์

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_1}{C_1 s} \quad (8.41)$$

$$= -R_1 C_1 s. \quad (8.42)$$

Exhibiting a zero at the origin, the circuit acts as a differentiator (and a high-pass filter). Figure 8.16 plots the magnitude of V_{out}/V_{in} as a function of frequency. From a time-domain perspective, we can equate the currents flowing through C_1 and R_1 :

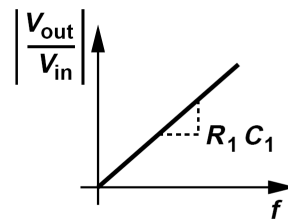
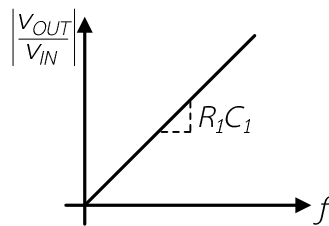


Figure 8.16 Frequency response of differentiator.

$$C_1 \frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R_1}, \quad (8.43)$$

arriving at

$$V_{out} = -R_1 C_1 \frac{dV_{in}}{dt}. \quad (8.44)$$

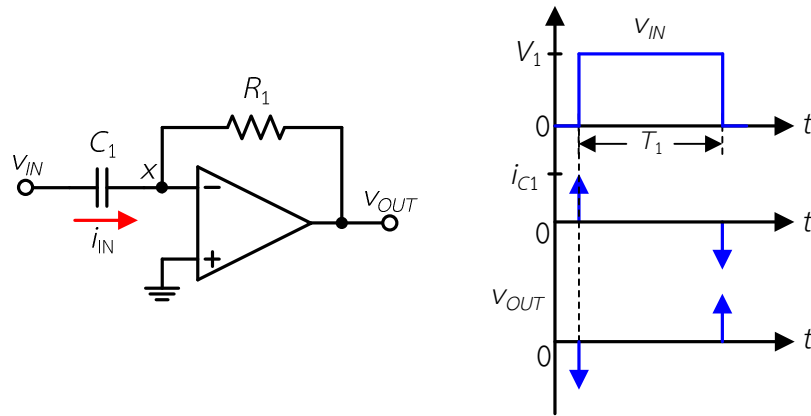


รูปที่ P2.xx

$$C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} = -\frac{v_{OUT}}{R_1} \quad (2.27)$$

$$v_{OUT} = -R_1 C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (2.27)$$

ตัวอย่างที่ 2.xx จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่แสดงในรูปที่ p2.xx สมมติให้ออปแอมป์ทำงานลักษณะอุดมคติ



รูปที่ p2.xx

วิธีทำ ขณะที่เวลา $t = 0^-$, 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

$$i_{IN} = C_1 \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (2.27)$$

$$= C_1 V_1 \delta(t) \quad (2.27)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 จะทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = -i_{IN} R_1 \quad (2.27)$$

$$= -R_1 C_1 V_1 \delta(t) \quad (2.27)$$

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

$$i_{IN} = C_1 \frac{dv_{IN}}{dt}$$

(2.27)

$$= C_1 V_1 \delta(t) \quad (2.27)$$

แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ (2.27)

$$V_{OUT} = -i_{IN} R_1 \quad (2.27)$$

$$= R_1 C_1 V_1 \delta(t) \quad (2.27)$$

C_1 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย $A_o + 1$ เท่า

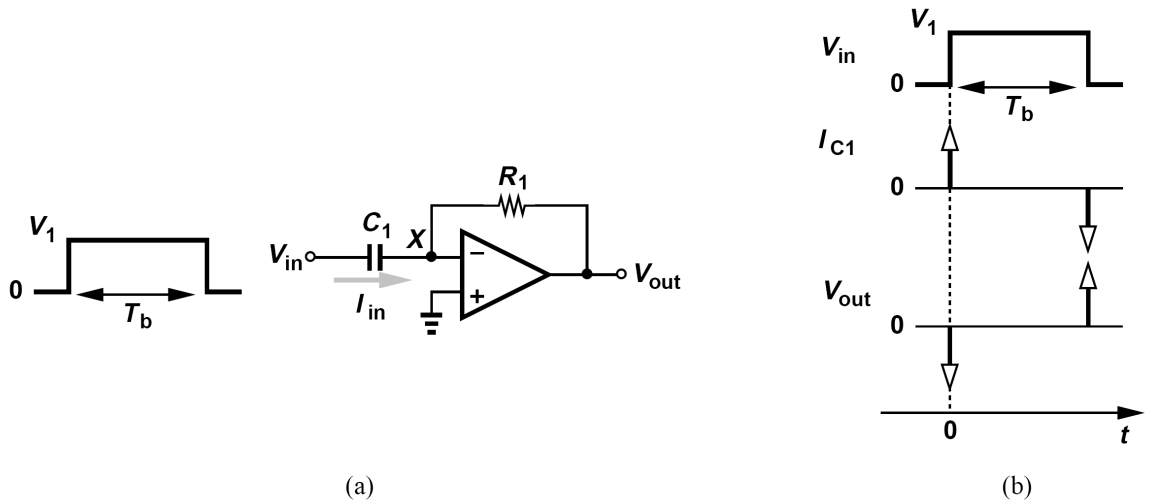


Figure 8.17 (a) Differentiator with pulse input, (b) input and output waveforms.

$$= C_1 V_1 \delta(t). \quad (8.46)$$

The current flows through R_1 , generating an output given by

$$V_{out} = -I_{in} R_1 \quad (8.47)$$

$$= -R_1 C_1 V_1 \delta(t). \quad (8.48)$$

Figure 8.17(b) depicts the result. At $t = T_b$, V_{in} returns to zero, again creating an impulse of current in C_1 :

$$I_{in} = C_1 \frac{dV_{in}}{dt} \quad (8.49)$$

$$= C_1 V_1 \delta(t). \quad (8.50)$$

It follows that

$$V_{out} = -I_{in} R_1 \quad (8.51)$$

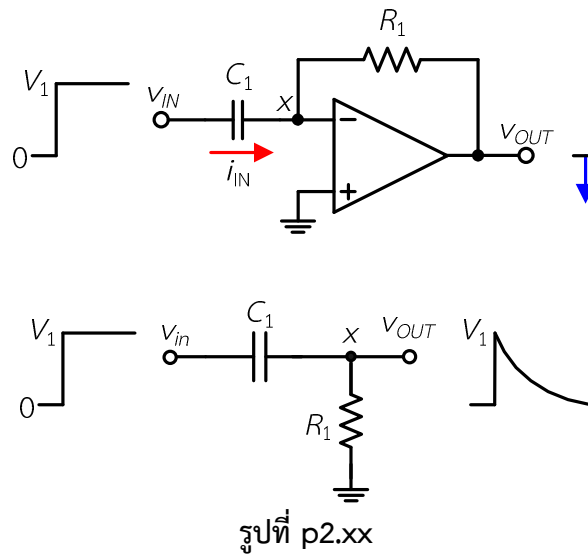
$$= R_1 C_1 V_1 \delta(t). \quad (8.52)$$

We can therefore say that the circuit generates an impulse of current $[\pm C_1 V_1 \delta(t)]$ and “amplifies” it by R_1 to produce V_{out} . In reality, of course, the output exhibits neither an infinite height (limited by the supply voltage) nor a zero width (limited by the op amp nonidealities).

แบบฝึกหัดที่ xxx ถ้า V_1 มีค่าเป็นลบ จงวาดแรงดันเอาต์พุตของวงจร

It is instructive to compare the operation of the differentiator with that of its “passive” counterpart (Fig. 8.18). In the ideal differentiator, the virtual ground node permits the input to change the voltage across C_1 instantaneously. In the RC filter, on the other hand, node X is not “pinned,” thereby following the input change at $t = 0$ and limiting the initial current in the circuit to V_1/R_1 .

ถ้า



รูปที่ 2.x(ก) แสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้โอปแอมป์ต่อในลักษณะกลับเฟส ถ้าเวลาดีเลย์ซึ่งเท่ากับ R_1C_1 มีค่าน้อยมาก เราสามารถวาดวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเรเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.x(ข) ซึ่งแสดงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลแบบอุดมคติได้ที่ใช้ RC

$$\frac{V_{IN} - V_X}{1/sC_1} = \frac{V_X - V_{OUT}}{R_1} \quad (2.27)$$

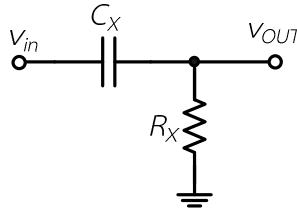
แทนค่า V_X ด้วย $-V_{OUT}/A_o$ เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรดังนี้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-sR_1C_1}{(1 + 1/A_o) + (sR_1C_1/A_o)} \quad (2.27)$$

ค่าความถี่โพลของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับ

$$s_p = -\frac{A_o + 1}{R_1C_1} \quad (2.27)$$

แบบฝึกหัดที่ 2.xx จงหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในรูปที่ 2.xx และเลือกค่า R_X และ C_X ซึ่งเป็นค่าโพลของวงจร



รูปที่ p2.10 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วิธีทำ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบ RC ได้ดังนี้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_X}{R_X + (1/sC_X)} \quad (2.27)$$

$$= \frac{sR_X C_X}{1 + sR_X C_X} \quad (2.27)$$

วงจรมีค่าซีโรที่จุดศูนย์กลาง ($s = 0$) และค่าโพลที่ $-1/(R_X C_X)$ เพื่อให้ได้ค่าโพลตามสมการ 2.xx ดังนั้น

$$\frac{1}{R_X C_X} = \frac{1 + A_o}{R_1 C_1} \quad (2.27)$$

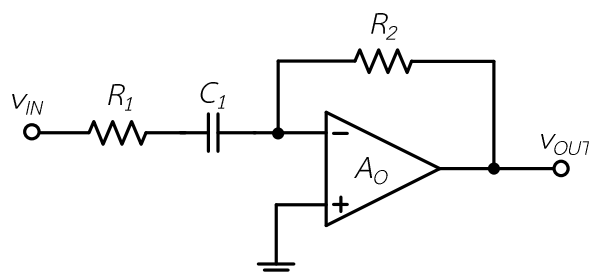
ทำการเลือกค่า R_X และ C_X

$$R_X = \frac{R_1}{1 + A_o} \quad (2.27)$$

$$C_X = C_1$$

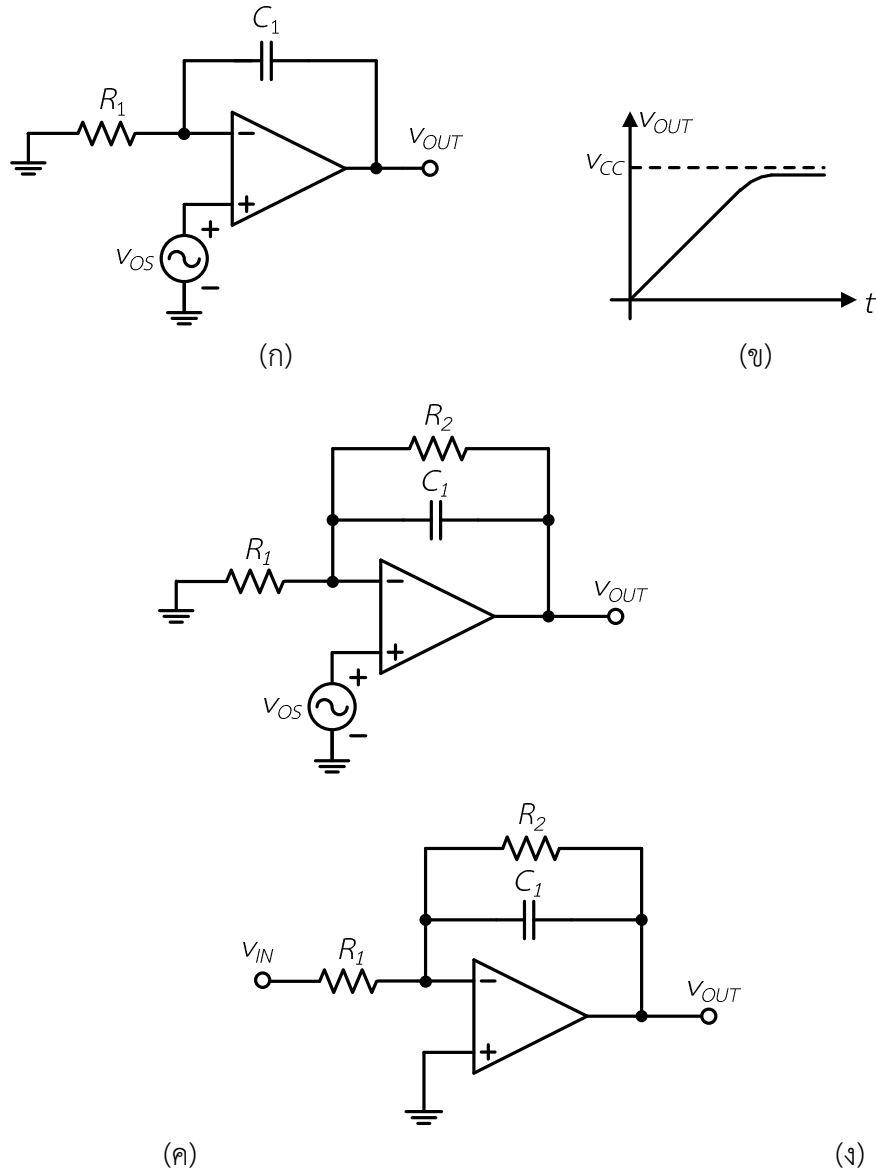
แบบฝึกหัดที่ 2.xx ถ้ากำหนดให้ $R_X = R_1$ ค่า C_X มีค่าเท่าไร

ตัวอย่างที่ 2.10 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโพลเดฟร็อดของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์ในรูปที่ p2.12



รูปที่ p2.12 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลแบบมีอัตราขยาย

ตัวอย่างที่ 2.11 จงวิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนและวาดกราฟโพลีโพลของวงจรถ่ายดิฟเฟอเรนเชียลในรูปที่ p2.13



รูปที่ p2.13 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล

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"