

บทที่ 3

วงจรการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์

(Applications of Op Amp Circuits)

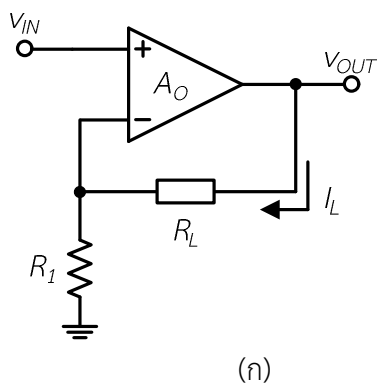
3.1 บทนำ

เราได้ศึกษาพื้นฐานการทำงานของออปแอมป์แบบอุดมคติมาแล้วในบทที่ 2 และได้กล่าวถึงการทำงานและการวิเคราะห์วงจรขยายแบบเชิงเส้น ซึ่งวงจรขยายที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถนำมาออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานในเป็นวงจรขยายแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวงจรการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์ซึ่งเป็นการนำออปแอมป์มาออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส, วงจรขยายอินสตรูเมนต์ และวงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้น

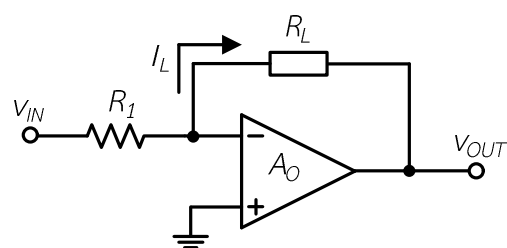
3.2 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสสำหรับโหลดลอย (Voltage to current converter for floating loads)

3.2.1 หลักการทำงานเบื้องต้น

วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสสำหรับโหลดลอย หมายถึง วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันอินพุตให้เป็นกระแสจ่ายให้เอาต์พุตที่มีโหลดลอย กล่าวคือไม่มีขาข้างใดข้างหนึ่งของโหลดต่ออยู่กับกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยในรูปที่ 3.1 (ก) เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสสำหรับโหลดลอยแบบไม่กลับเฟส โดยในแบบนี้จะไม่มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายอินพุต ส่วนในรูปที่ 3.1 (ข) เป็นแบบกลับเฟสแบบนี้จะมีกระแสไหลออกจากแหล่งจ่ายอินพุตหมายความว่าวงจรในรูปที่ 3.1 (ข) มีความต้านทานสูงมากนั่นเอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสแก่โหลดลอย (ก) แบบไม่กลับเฟส และ (ข) แบบกลับเฟส

จากวงจรในรูปที่ 3.1 เราจะได้กระแสเอาต์พุต (i_L) จาก

$$i_L = \frac{V_{IN}}{R_1} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) เห็นได้ว่าค่ากระแส i_L นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าโหลด (R_L) เลย โดยมันจะขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต v_{in} และ/หรือ R_1 เท่านั้น ดังนั้นถ้าเรากำหนด R_1 ให้มีค่าคงที่ แสดงว่า i_L จะขึ้นอยู่กับ v_{in} เท่านั้น ดังนั้น วงจรจึงถูกเรียกว่า วงจรเปลี่ยนแรงดัน (v_{in}) เป็นกระแส (i_L) หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจรแรงดันควบคุมแหล่งจ่ายกระแส (Voltage Controlled Current Source, VCCS) หมายถึง เราสามารถควบคุมขนาดของแหล่งจ่ายกระแส (i_L) ได้จากแรงดันอินพุต (v_{in}) นั่นเอง ส่วนวงจรใน รูปที่ 3.1 (ข) มีลักษณะการทำงานเหมือนกับวงจรในรูปที่ 3.1 (ก) เพียงแต่มีขั้วตรงข้ามกันเท่านั้น นั่นคือ

$$i_L = -\frac{v_{IN}}{R_L} \quad (3.2)$$

3.2.2 ข้อดีและข้อเสีย

วงจร V to I แบบไม่กลับเฟส ดังรูปที่ 3.1 (ก) จะไม่มีกระแสไหลออกจากแหล่งจ่ายสัญญาณอินพุต ดังนั้น v_{in} สามารถสร้างได้จากวงจรแบ่งแรงดันที่ปรับค่าได้ปกติ โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องความต้านทานอินพุต หรือใช้วงจรตามแรงดันเลยแต่ v_{OUT} จะขึ้นอยู่กับ v_{IN} ด้วยตามสมการ (3.3)

$$v_{OUT} = v_{IN} + i_L R_L \quad (3.3)$$

ดังนั้น ในกรณีของวงจรแบบไม่กลับเฟส เราจะได้ขอบเขตของกระแส i_L น้อยลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วย v_{OUT} เพราะ v_{OUT} มีค่าได้มากที่สุด คือ แรงดันอิมิตัวด้านบวก และด้านลบ $\pm v_{sat}$ เท่านั้น ส่วนวงจรแบบกลับเฟส ในรูปที่ 3.1 (ข) มีกระแสไหลออกจากแหล่งจ่ายอินพุตด้วย ทำให้จะต้องใช้วงจรตามแรงดันต่อค้น แต่วงจรนั้นจะมีแรงดันเอาต์พุต v_{OUT} ตามสมการ (3.4)

$$v_{OUT} = -i_L R_L \quad (3.4)$$

หมายความว่า v_{OUT} จะไม่ขึ้นอยู่กับ v_{in} แสดงว่า เราจะได้ค่า i_L มากกว่าเมื่อเทียบกับวงจร V to I แบบไม่กลับเฟส ในขณะที่ R_L เท่ากัน หรืออีกกรณีหนึ่งคือ เราจะได้ขอบเขต R_L กว้างขึ้น เมื่อเทียบกับค่า i_L ที่เท่ากัน

3.3 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (Voltage to current converter circuit)

วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสคือวงจรที่รับอินพุตที่เป็นแรงดันเข้ามาแล้วทำการเปลี่ยนเป็นกระแสที่ไหลผ่านโหลดโดยที่ การเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันอินพุตมีลักษณะที่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งมีโหลดเป็นค่าความชันของความสัมพันธ์สองกระแสกับแรงดัน

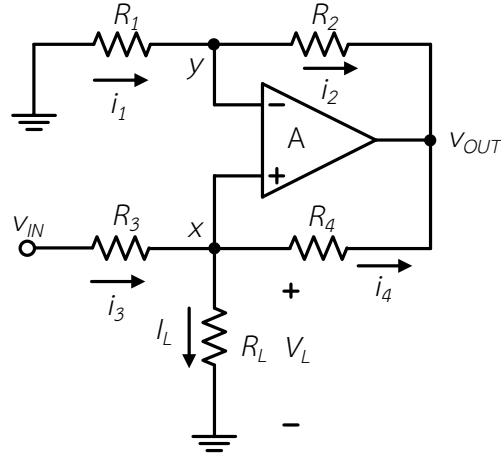
3.3.1 วงจรวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสแบบไม่กลับเฟส ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรได้โดยเริ่มที่ผลรวมของกระแสที่จุด non-inverting มีค่าเท่ากับ

$$i_3 = i_4 + i_L \quad (3.5)$$

เราสามารถเขียนสมการกระแสใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{v_{IN} - i_L R_L}{R_3} = \frac{i_L R_L - v_{OUT}}{R_4} + i_L \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.2 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการ 3.6 ใหม่ ได้ดังนี้

$$\frac{v_{IN} - v_L}{R} = \frac{v_L - v_{OUT}}{R} + i_L \quad (3.7)$$

ทำการจัดสมการใหม่เพื่อแรงดัน v_{IN} ที่สัมพันธ์กับ i_L ได้ดังนี้

$$\frac{v_{IN}}{R} = \frac{2v_L}{R} - \frac{v_{OUT}}{R} + i_L \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันที่โหนด y แรงดัน $v_y = v_{OUT}/2$ และจาก $v_{OUT} = 2v_L$ ดังนั้น สมการที่ 3.8 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{v_{IN}}{R} = \frac{2v_L}{R} - \frac{2v_L}{R} + i_L \quad (3.9)$$

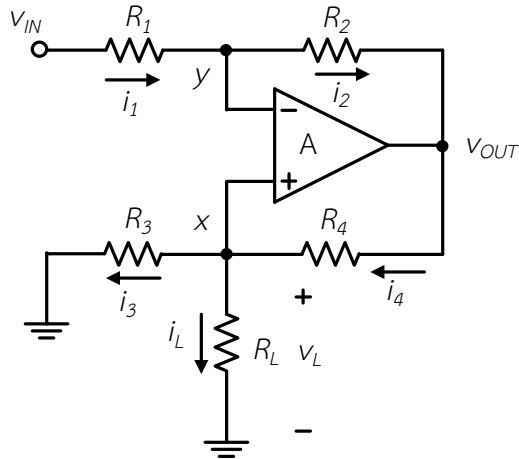
ดังนั้น สมการ 3.9 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$i_L = \frac{v_{IN}}{R} \quad (3.10)$$

3.3.2 วงจรวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสแบบกลับเฟส

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสแบบกลับเฟส ซึ่งจากคุณสมบัติของ ออปแอมป์ $v_y = v_x = v_L = i_L R_L$ และกระแส $i_1 = i_2$ จะได้สมการ

$$\frac{v_{IN} - i_L R_L}{R_1} = \frac{i_L R_L - v_{OUT}}{R_2} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.3 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ผลรวมของกระแสที่โหนด x มีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_{OUT} - i_L R_L}{R_4} = i_L + \frac{i_L R_L}{R_3} \quad (3.12)$$

แทนค่า $(V_{OUT} - i_L R_L)$ สมการที่ 3.12 ในสมการ 3.11 จะได้สมการใหม่คือ

$$\frac{R_2}{R_1} \frac{(i_L R_L - V_{IN})}{R_4} = i_L + \frac{i_L R_L}{R_3} \quad (3.13)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$i_L \left(\frac{R_2 R_L}{R_1 R_4} - 1 - \frac{R_L}{R_3} \right) = V_{IN} \left(\frac{R_2}{R_1 R_4} \right) \quad (3.14)$$

เงื่อนไขที่ที่ต้องการให้ i_L อิสระจาก R_L ถ้ากำหนดให้ R_L เป็นศูนย์จะได้

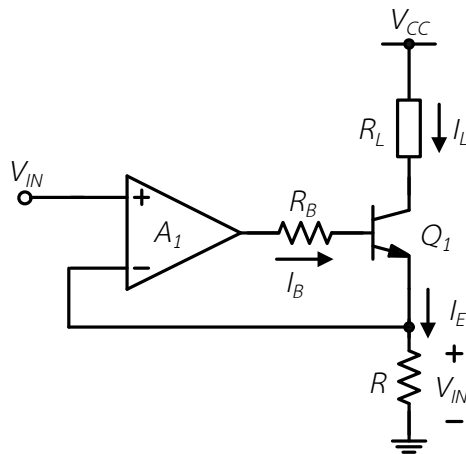
$$\frac{R_2}{R_1 R_4} = \frac{1}{R_3} \quad (3.15)$$

ดังนั้น สมการ 3.10 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$i_L = -V_I \left(\frac{R_2}{R_1 R_4} \right) = -\frac{V_I}{R_3} \quad (3.16)$$

3.4 วงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสแก้อโหลดขนาดใหญ่ (Voltage to high current converters)

ออปแอมป์เมื่อนำมาต่อเป็นวงจร V to I ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น จะจ่ายกระแสได้เพียง 5-10 mA เท่านั้น ดังนั้น ถ้าหากเราต้องการกระแสที่สูงกว่านี้ สามารถทำได้โดยการต่อทรานซิสเตอร์แบบสองรอยต่อ (Bipolar Junction Transistor, BJT) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสขนาดใหญ่

จากวงจรในรูป 3.4 กรณีมีการป้อนแรงดันอินพุต V_{IN} เข้าที่ขา (+) ของออปแอมป์ จะส่งผลให้แรงดันที่ขา (-) เท่ากับ V_{IN} ด้วย เนื่องจากการใช้งานออปแอมป์แบบลูปปิดและจะมีกระแส I_L ไหลผ่านโหลด R_L ตามสมการ (3.17)

$$I_L \approx I_E = \frac{V_{IN}}{R} \quad (3.17)$$

ส่วน I_B ซึ่งเป็นกระแสเบสของออปแอมป์ในทางปฏิบัติมีค่าน้อยมาก เนื่องจากอัตราขยายกระแสของ BJT (β) มีค่าสูงมากนั่นเอง โดย I_B สามารถหาได้จากสมการ (3.18)

$$I_B = \frac{I_L}{\beta + 1} \quad (3.18)$$

ถ้าเราใช้ BJT ที่มีค่า β เท่ากับ 50 กระแส I_L ก็จะมีค่าสูงถึง $(5 \text{ ถึง } 10 \text{ mA}) \times 51 = 250 \text{ ถึง } 500 \text{ mA}$ ซึ่งเราพบว่ากระแส I_L เพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องมาจากการขยายของ BJT

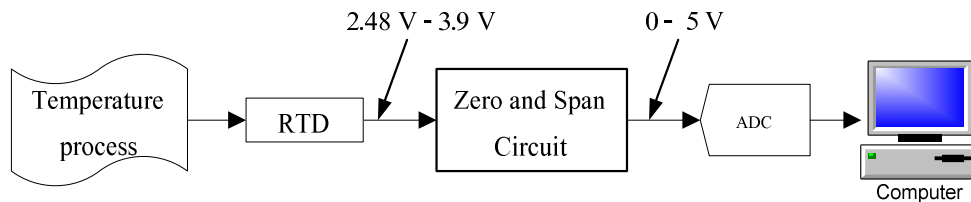
แบบฝึกหัดที่ 3.2 จากวงจรในรูปที่ 3.4 ต้องการออกแบบให้วงจรรับแรงดันอินพุตตั้งแต่ 0 – 3 V และให้มีกระแสไหลผ่านโหลดสูงสุดเท่ากับ 0.5 A จงออกแบบวงจรพร้อมรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้โดย

(ก) ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

(ข) มอสเฟต

3.5 วงจรซีโรและสแปน (Zero and Span Circuits)

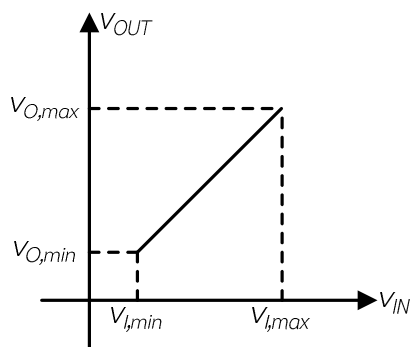
การวัดอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์อุณหภูมิ ซึ่งเซนเซอร์ทำการวัดอุณหภูมิแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าออกที่เอาต์พุตซึ่งมีย่านแรงดันมากที่สุดและน้อยสุด ย่านแรงดันเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับวงจรและชนิดของอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.5



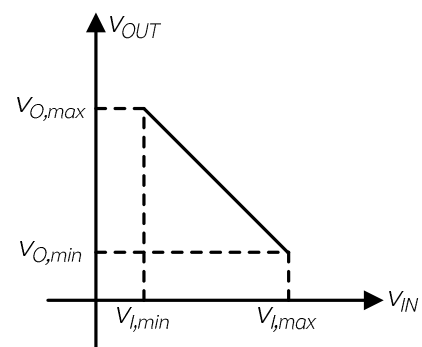
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัดและแสดงผลอุณหภูมิ

รูปที่ 3.6 แสดงกราฟถ่ายโอน (Transfer Curve) ซึ่งแสดงคุณลักษณะการทำงานของวงจร ๆ ได้ 2 แบบ ดังนี้

- แบบสแปนบวกเป็นบวก (Positive Span)
- แบบสแปนบวกเป็นลบ (Negative Span)

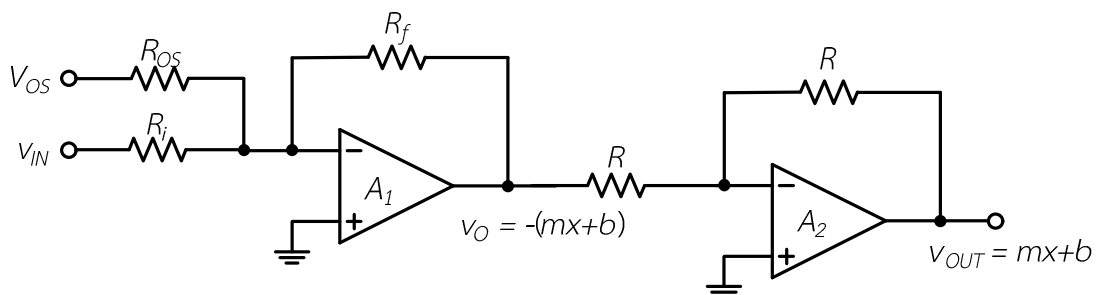


(ก)

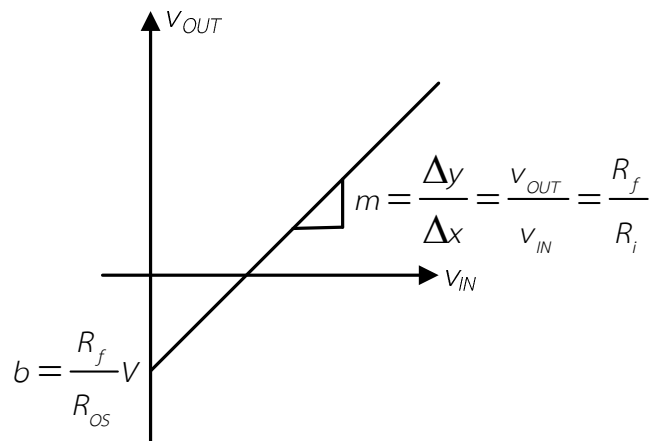


(ข)

รูปที่ 3.6 กราฟทรานสเฟอร์ (Transfer Curve)



รูปที่ 3.7 วงจรซีโรและสแปน



รูปที่ 3.8 กราฟอัตราขยายของวงจร

จากวงจรในรูปที่ 3.7 กราฟอัตราขยายของวงจรในรูปที่ 3.8 เราสามารถออกแบบวงจรได้ดังนี้

$$V_O = -\frac{R_f}{R_1} V_{IN} - \frac{R_f}{R_{OS}} V_{OS} \quad (3.19)$$

$$Y = mx + b \quad (3.21)$$

เมื่อ y คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{OUT})

m คือ ค่าสแปนหรืออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

x คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{IN})

b คือ แรงดันไฟฟ้าออฟเซต

หาค่าอัตราขยายหรือสแปน : m

$$m = \frac{V_{O,max} - V_{O,min}}{V_{I,max} - V_{I,min}} \quad (3.22)$$

หรือ

$$m = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{R_f}{R_1} \quad (3.23)$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้าออฟเซต : b

$$b = \frac{R_f}{R_{OS}} V_{OS} = V_O - mV_{IN} \quad (3.24)$$

กลับสัญญาณด้วยวงจร Inverting amplifier

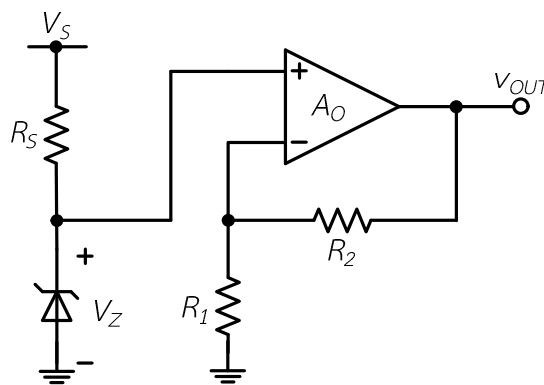
$$V_{OUT} = -V_O = \frac{R_f}{R_1} V_{IN} + \frac{R_f}{R_{OS}} V_{OS} \quad (3.20)$$

ตัวอย่างที่ 3.2 เมื่ออุณหภูมิในขบวนการหนึ่งมีค่าต่ำสุด ซึ่งทำให้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจ่ายแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 2.48 โวลต์ เมื่ออุณหภูมิสูงสุดจะได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 3.9 โวลต์ จงออกแบบวงจรซีโรและสแปนเพื่อป้อนแรงดันเท่ากับ 0 - 5 โวลต์ ให้กับวงจร ADC เพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลต่อไป

แบบฝึกหัดที่ 3.3 ให้ออกแบบวงจรในรูปที่ 3.7 เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าอินพุตจาก $V_{IN} = 2.5 - 3$ โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $V_{OUT} = 0 - 5$ โวลต์ เพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลต่อไป

3.6 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage Source circuit)

การสร้างแรงดันอ้างอิงหรือแรงดันคงที่ให้กับวงจรต่าง ๆ สามารถทำได้โดยใช้ซีเนอร์ไดโอด แต่เนื่องจากแรงดันอ้างอิงที่ต้องการอาจจะมีค่ามากกว่าแรงดันซีเนอร์ ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบวงจรแรงดันอ้างอิงที่สามารถสร้างแรงดันอ้างอิงที่มีค่าสูงมากเพื่อนำไปใช้งานกับวงจรต่าง ๆ ที่ต้องการ รูปที่ 3.9 แสดงวงจรแรงดันอ้างอิงแบบทั่วไป โดยใช้โอปแอมป์



รูปที่ 3.9 วงจรแรงดันอ้างอิงแบบทั่วไปโดยใช้โอปแอมป์

แรงดันอินพุตของโอปแอมป์มีค่าเท่ากับแรงดันซีเนอร์ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

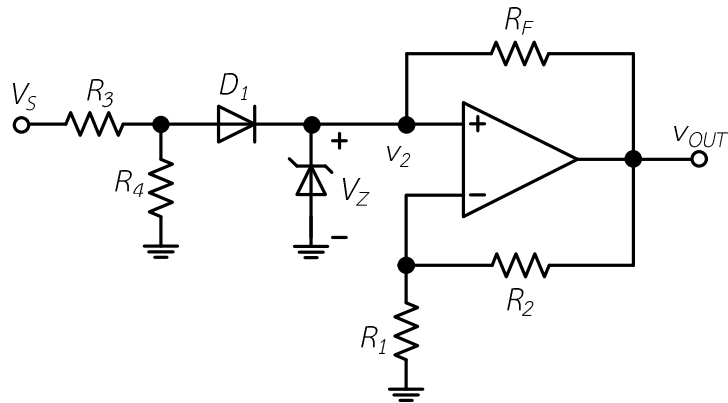
$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_Z \quad (3.25)$$

รูปที่ 3.10 แสดงวงจรแรงดันอ้างอิงโดยใช้โอปแอมป์ซึ่งได้ทำการปรับปรุงมาจากวงจรในรูปที่ 3.9 เนื่องจากค่าความต้านทานภายในของซีเนอร์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้แรงดันซีเนอร์ไม่เป็นไปตามฟังก์ชันของไดโอด วงจรซีเนอร์ไดโอดเริ่มนำกระแสด้วยเงื่อนไข

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_S > V_Z + V_D \cong V_Z + 0.7 \text{ V} \quad (3.26)$$

แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_Z \quad (3.27)$$

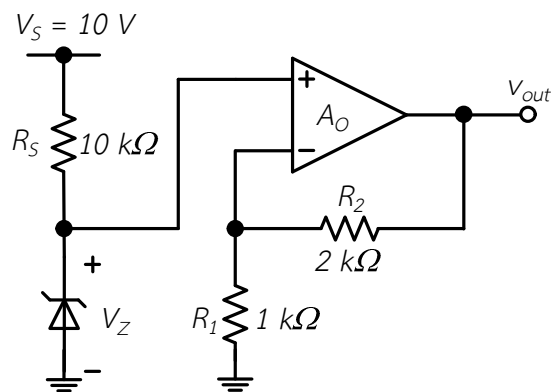


รูปที่ 3.10 วงจรแรงดันอ้างอิงโดยใช้โอปแอมป์

และ

$$I_F = \frac{V_{OUT} - V_Z}{R_F} = \frac{R_2 V_Z}{R_1 R_F} \quad (3.28)$$

ตัวอย่างที่ 3.4 จงแสดงวิธีการหาค่าแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ของวงจรในรูปที่ 3.11 กำหนดให้ $V_Z = 3 \text{ V}$, $R_S = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$



รูปที่ 3.11

ตัวอย่างที่ 3.5 จงออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงให้ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{OUT} = 10 \text{ V}$ กำหนดให้ใช้ซีเนอร์ไดโอดที่มีแรงดัน $V_Z = 5.6 \text{ V}$, สมมุติวงจรสามารถรักษาแรงดันได้ก็ต่อเมื่อกระแสไบอัสเท่ากับ $1 - 1.2 \text{ mA}$

วิธีทำ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.10 เราทราบว่า

$$\frac{v_O}{V_Z} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \frac{10.0}{5.6} \quad (3.29)$$

ดังนั้น $\frac{R_2}{R_1} = 0.786$

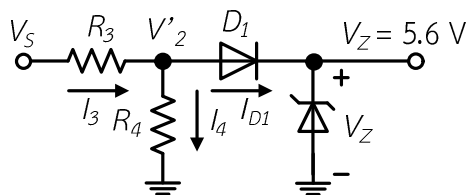
เราทราบว่า

$$I_F = \frac{v_O - V_Z}{R_F} \quad (3.30)$$

ถ้ากำหนดให้ I_F เท่ากับ 1 mA เราจะได้ว่า

$$1\text{mA} = \frac{10 - 5.6}{R_F} \quad (3.31)$$

ดังนั้น ค่า $R_F = 4.4 \text{ k}\Omega$ และถ้าเราเลือกค่า $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$ เราจะได้ค่า $R_1 = 38.17 \text{ k}\Omega$



รูปที่ 3.12 วงจรภาคอินพุตของวงจรรักษาระดับแรงดันด้วยออปแอมป์

กำหนดให้ $V_S = 10 \text{ V}$ แรงดัน V_2' มีค่าเท่ากับ

$$V_2' = V_Z + 0.7 = 5.6 + 0.7 = 6.3 \text{ V} \quad (3.32)$$

เนื่องจากเรากำหนดให้ I_F เท่ากับ 1 mA ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่าน D_1 เท่ากับ 0.2 mA ค่าความต้านทาน R_3 และ R_4 สามารถหาได้จากสมการ

$$I_4 = \frac{V_2'}{R_4} = \frac{6.3}{R_4} \quad (3.33)$$

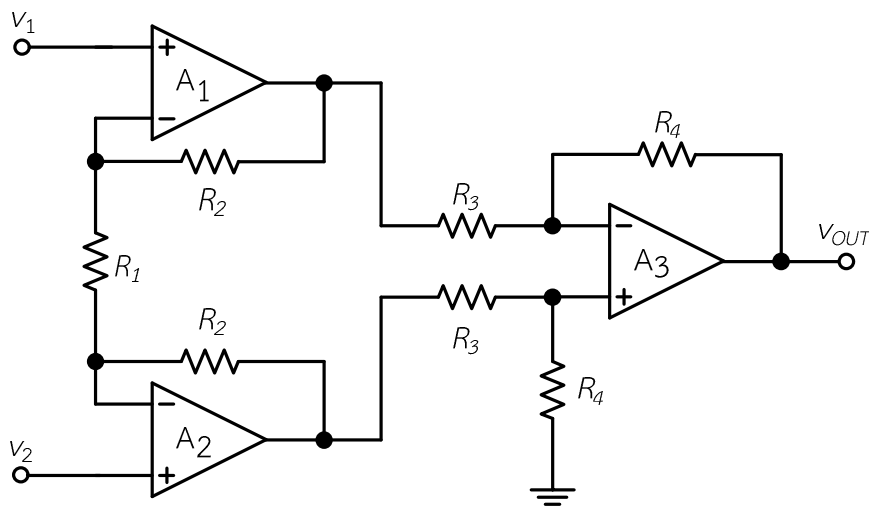
และ

$$I_3 = \frac{V_S - V_2'}{R_3} = \frac{10 - 6.3}{R_3} = \frac{3.7}{R_3} \quad (3.34)$$

ถ้ากำหนดให้ $I_4 = 0.2 \text{ mA}$ เราจะสามารถหาค่า $I_3 = 0.4 \text{ mA}$ $R_3 = 9.25 \text{ k}\Omega$ และ $R_4 = 31.5 \text{ k}\Omega$

3.6. วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation amplifier)

รูปที่ 3.13 แสดงวงจรขยายอินสตรูเมนต์ประกอบด้วยวงจรขยายแรงดันผลต่างภาคที่ 1 ซึ่งมีออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบไม่กลับเฟส และวงจรภาคที่ 2 มีออปแอมป์ A_3 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบ ขั้วดีของวงจรขยายอินสตรูเมนต์คือ 1. อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่ามากซึ่งเหมาะสมกับการขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็ก เช่น สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor signal), สัญญาณชีวภาพ (Biosignal), สัญญาณจากวงจรบริดจ์ และสัญญาณจากวงจรส่วนหน้า (Front end) ที่มีขนาดเล็ก และ 2. อัตราการกำจัดสัญญาณโหมตรงร่วมสูง (Common mode rejection ratio) ซึ่งโดยปกติแล้วสัญญาณชีวภาพ หรือสัญญาณรบกวนซึ่งชั่ววอกและลบมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้น วงจรขยายอินสตรูเมนต์เหมาะสมที่ใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็กและมีสัญญาณโหมตรงร่วมที่เราไม่ต้องการ



รูปที่ 3.13 วงจรขยายอินสตรูเมนต์

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

$$v_{O1} - v_{O2} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2) \quad (3.35)$$

แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_3 มีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = -\frac{R_4}{R_3}(v_{O1} - v_{O2}) \quad (3.36)$$

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$v_{OUT} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(v_2 - v_1) \quad (3.37)$$

อัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ

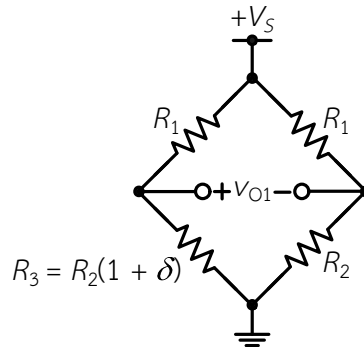
$$A_{vd} = \frac{v_{OUT}}{v_2 - v_1} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (3.38)$$

ทรานสดิวเซอร์ คืออุปกรณ์ที่แปลงพลังงานในรูปแบบอื่นเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ไมโครโฟนแปลงพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า รูปที่ 3.14 แสดงวงจรบริดจ์ซึ่งใช้ความต้านทาน R_3 เทียบเคียงตัวทรานสดิวเซอร์ และ δ เป็นค่าความเบี่ยงเบนของ R_3 จาก R_2 เนื่องจากการตอบสนองของตัวแปลงสัญญาณ แรงดัน v_{o1} เป็นวัดของ δ ถ้า v_{o1} เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จากนั้น

$$v_{o1} = \left[\frac{R_2(1+\delta)}{R_2(1+\delta) + R_1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V^+ \quad (3.39)$$

เราสามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$v_{o1} = \delta \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 + R_2} \right) V^+ \quad (3.40)$$



รูปที่ 3.14

เนื่องจากอีกด้านของแรงดัน v_{o1} มีศักยภาพเป็นกราวด์ เราต้องเชื่อมต่อ v_{o1} กับวงจรขยายอินสตรูเมนต์ นอกจากนี้ v_{o1} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน V^+ ดังนั้น การไบอัสนี้ควรจะถูกนิยามว่าการรักษาระดับแรงดันอ้างอิง

ตัวอย่างที่ 3.6 จงออกแบบวงจรขยายเพื่อให้มีแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง ± 5 V เมื่อค่าความต้าน R_3 มีการเปลี่ยนแปลง $\pm 1\%$ ซึ่งสัมพันธ์กับตัวต้านทาน R_2 สมมติให้ R_3 คือตัวทรานสมิตเตอร์ มีสมการดังนี้

$$R_3 = 200 \left[1 + \frac{0.04 \times (T - 300)}{300} \right] \text{ k}\Omega \quad (3.41)$$

เมื่อ T คือ ค่าอุณหภูมิ กำหนดให้ R_3 เปลี่ยนแปลง $\pm 1\%$ อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง $225 \leq T \leq 375$ K และแรงดันไฟเลี้ยงวงจรบริดจ์ $V^+ = 7.5$ V และ แรงดันซีเนอร์ไดโอด $V_Z = 5.6$ V สมมติให้ แรงดันไฟเลี้ยงออปแอมป์ และแหล่งจ่ายอ้างอิงเท่ากับ ± 10 V และ $R_1 = R_2 = 200$ k Ω

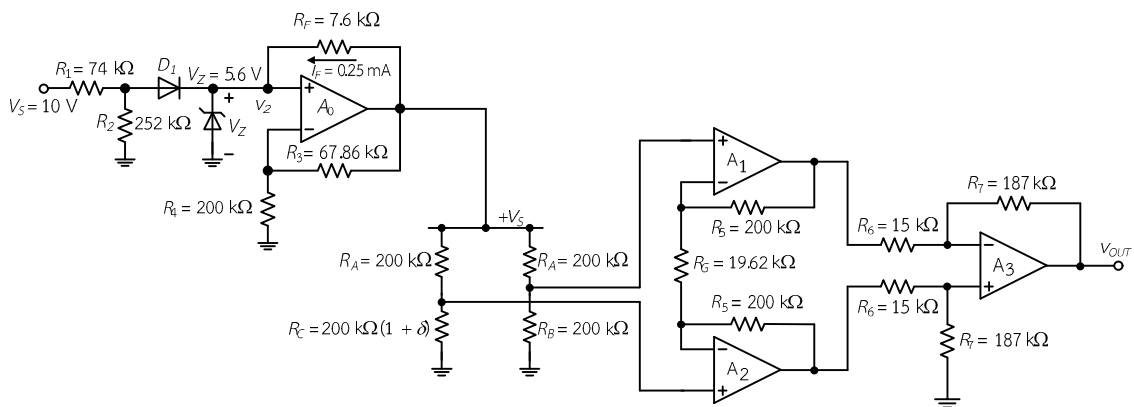
วิธีทำ เนื่องจาก $R_1 = R_2$ ดังนั้น แรงดัน v_{O1} เท่ากับ

$$v_{O1} = \left(\frac{\delta}{4} \right) V^+ \quad (3.42)$$

ค่าแรงดัน $V^+ = 7.5$ V และ $\delta = 0.01$ ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรบริดจ์ $v_{O1} = 0.01875$ V แรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายมีค่าสูงสุดเท่ากับ $+5$ V ดังนั้น อัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ $5/0.01875 = 266.7$ จากวงจรในรูปที่ p3.3 อัตราขยายของวงจรหาได้จากสมการ

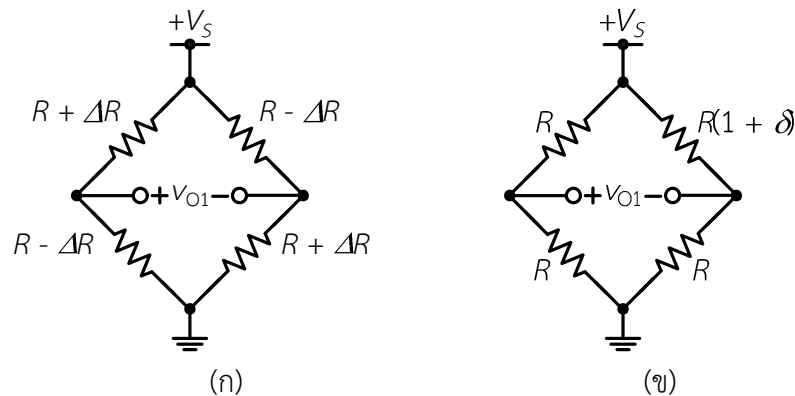
$$\frac{v_{O1}}{v_O} = \frac{R'_4}{R'_3} \left(1 + \frac{2R'_2}{R'_1} \right) = 266.7 \quad (3.43)$$

ทำการกำหนดค่า $R'_3 = 15$ k Ω และ $R'_4 = 187$ k Ω และ $R'_2 = 200$ k Ω ดังนั้น ค่าความต้านทาน $R'_1 = 19.62$ k Ω เราสามารถออกแบบตัวต้านทาน R'_1 ด้วยการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่อเนื่องร่วมกับตัวต้านทานคงที่



รูปที่ 3.15

แบบฝึกหัดที่ 3.4 จากวงจรบริดจ์ในรูปที่ 3.16 (ก) ตัวต้านทาน $R_3 = 50$ k Ω และค่า ΔR อยู่ในช่วง ± 100 Ω แรงดันไฟเลี้ยงวงจรบริดจ์ $V^+ = 5$ V (ก) จงหาค่า v_{O1} ที่สัมพันธ์กับ δ (ข) จงออกแบบวงจรขยายเพื่อให้มีแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง ± 3 V และที่สัมพันธ์กับ δ ซึ่งอยู่ในช่วง ± 0.025 (ตอบ (ก) $v_{O1} = 2.5 \times 10^{-4}(\Delta R)$ (ข) $R_4/R_3 = 10$ และ $R_2/R_1 = 5.5$)



รูปที่ 3.16

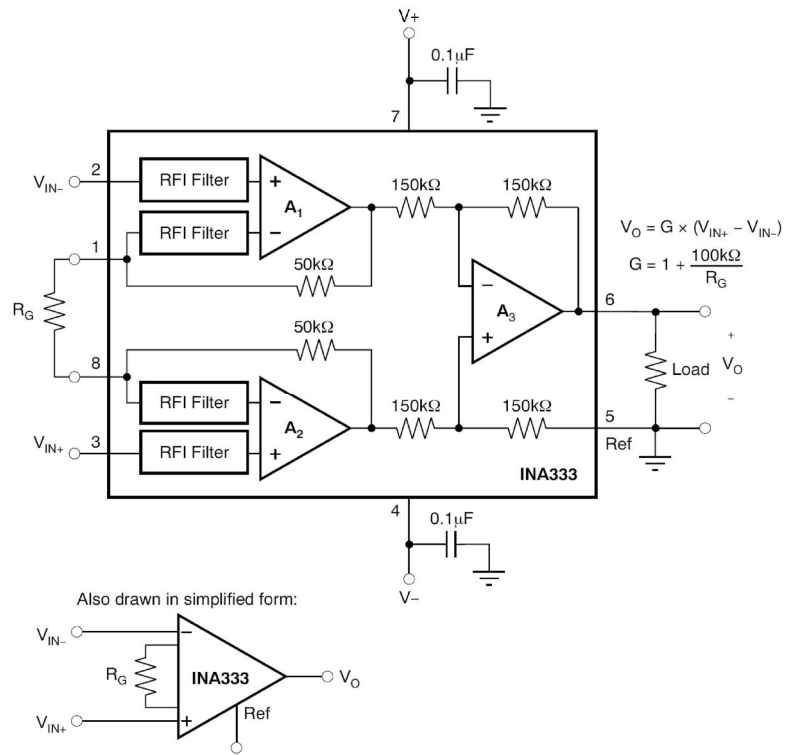
แบบฝึกหัดที่ 3.5 กำหนดให้ R_3 ในรูปที่ 3.16 (ข) เท่ากับ $50 \text{ k}\Omega$ และแรงดันไฟเลี้ยงวงจรบริดจ์ $V^+ = 3 \text{ V}$ (ก) จงหาค่า V_{O1} ที่สัมพันธ์กับ δ (ข) จงออกแบบวงจรขยายเพื่อให้มีแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง $\pm 3 \text{ V}$ และที่สัมพันธ์กับ δ ซึ่งอยู่ในช่วง ± 0.025 (ตอบ (ก) $V_{O1} \cong 0.75\delta$ (ข) $R_4/R_3 = 10$ และ $R_2/R_1 = 7.5$)

3.7 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ IC INA333

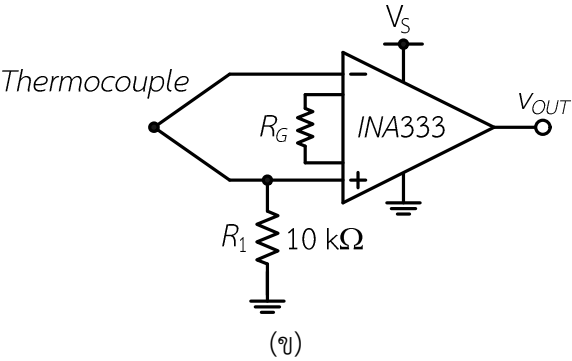
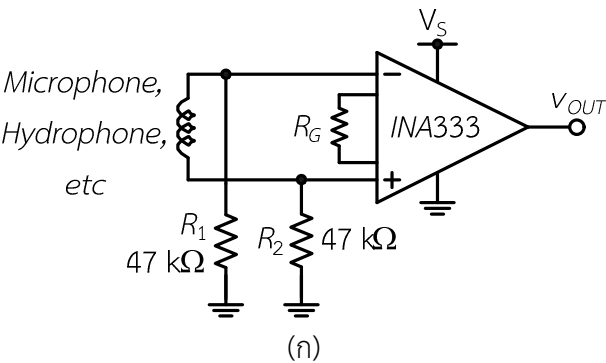
รูปที่ 3.17 แสดงวงจรขยายอินสตรูเมนต์ซึ่งถูกสร้างลงใน IC INA333 ของบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย ในการออกแบบอัตราขยายของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการ

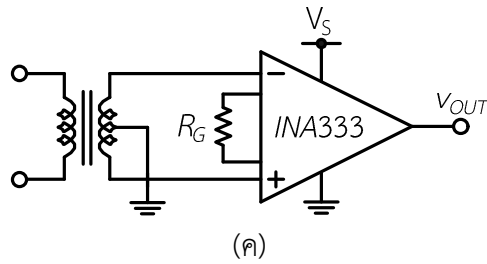
$$G = 1 + \frac{100\text{k}\Omega}{R_G} \quad (3.44)$$

วงจรขยายอินสตรูเมนต์ IC INA333 สามารถนำไปใช้ขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากได้เนื่องจากวงจรได้ถูกออกแบบให้มีอัตราขยายสูงมาก ซึ่งตัวอย่างการนำไปใช้งานได้แก่ วงจรขยายสัญญาณไมโครโฟน วงจรขยายสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล และวงจรเปลี่ยนสัญญาณต่าง ๆ ให้มีแรงดันขนาดเล็ก



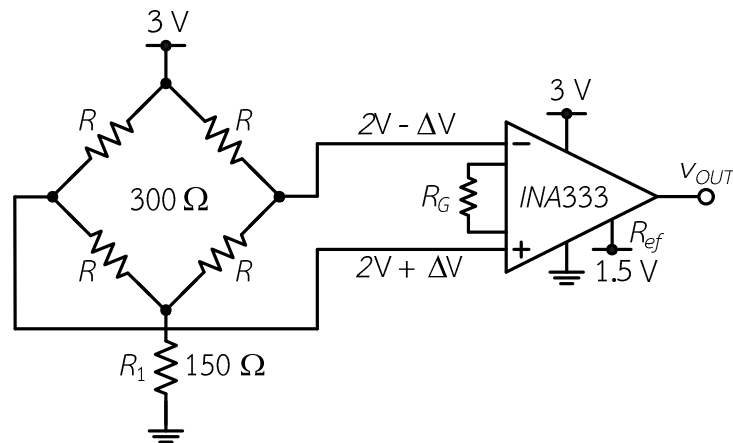
รูปที่ 3.17 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ IC INA333





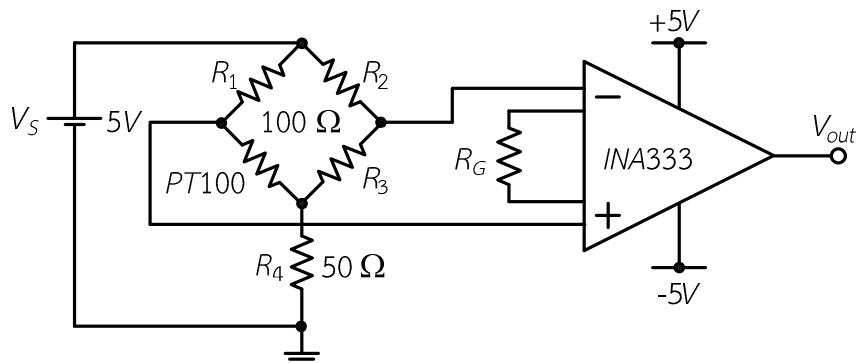
รูปที่ 3.18 วงจร IC INA333 ขยายแรงดันจากไมโครโฟนและเทอร์โมคัปเปิล

ตัวอย่างที่ 3.7 กำหนดให้วงจรในรูปที่ 3.19 มีไฟเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 3 V และ $R_{bridge} = 300 \Omega$ จงออกแบบวงจรเพื่อขยายแรงดันอินพุตเมื่อค่าความต้านทานของวงจรบริดจ์ตัวหนึ่งเพิ่มขึ้น 30Ω แล้ว V_{OUT} มีค่าเท่ากับ 3 V



รูปที่ 3.19 วงจรขยายสัญญาณจากวงจรบริดจ์ด้วย INA333

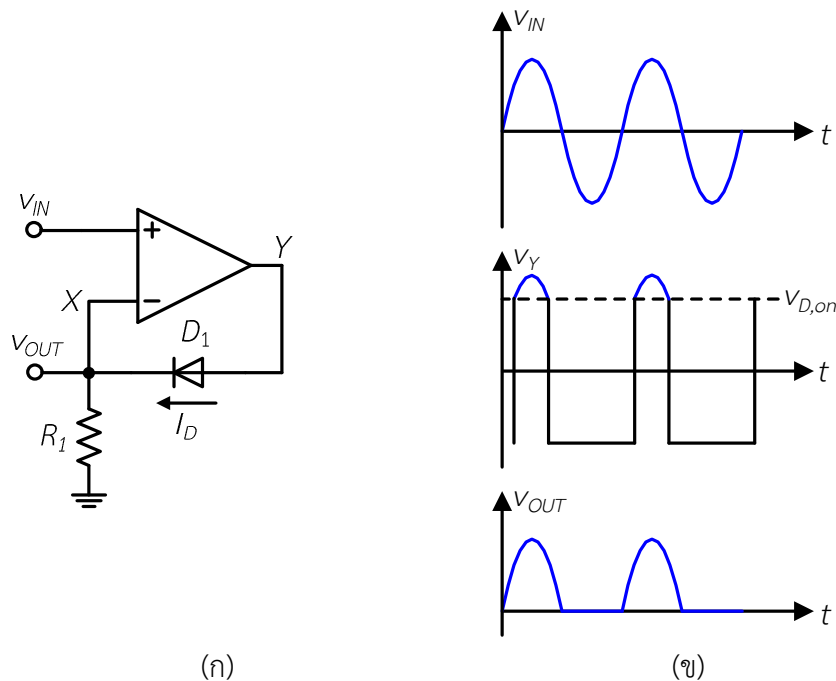
แบบฝึกหัดที่ 3.6 กำหนดให้วงจรในรูปที่ 3.20 มีไฟเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 5 V และ $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega$ ที่อุณหภูมิ 0°C ค่าความต้านทาน PT100 เท่ากับ 100Ω จงออกแบบวงจรเพื่อขยายแรงดันอินพุตเมื่อค่าความต้านทานของ PT100 เพิ่มขึ้น 30Ω แล้ว V_{OUT} มีค่าเท่ากับ 3 V



รูปที่ 3.20 วงจรขยายสัญญาณวงจรตรวจวัดอุณหภูมิด้วย INA333

3.8 วงจรเรียงกระแสที่แม่นยำ (Precision rectifier)

วงจรเรียงกระแสที่แม่นยำจะอาศัยหลักการทำงานของไดโอด " โชน " ตายเนื่องจากมีแรงดันต้องเปิด ไดโอด นั่นคือ ถ้าสัญญาณแอมพลิจูดน้อยกว่าประมาณ 0.7 V , ไดโอด และยังคงปิดแรงดันยังคงอยู่ที่ศูนย์ งานนี้ห้ามใช้วงจรที่มีความแม่นยำสูง การใช้งาน เช่น ถ้าสัญญาณขนาดเล็กที่ได้รับจากโทรศัพท์มือถือ ต้องได้รับการแก้ไขเพื่อกำหนดความกว้างของสัญญาณ เป็นไปได้ที่จะวางไดโอดรอบออปแอมป์ในรูปแบบ " ที่มีกระแส " คือวงจรที่ แม่น้อยมาก สัญญาณ ให้เราเริ่มต้นด้วยการกำหนด บัพเฟอร์ได้รับเชื่อมโยงกับโหลดตัวต้านทาน รูปที่ 3.21 (ก) เราทราบว่าได้ความสูงของออปแอมป์ยืนยันว่า โหนด x เท่ากับ v_{IN} (รอบทั้งบวกและลบ) ตอนนี้สมมติว่าเราต้องการกวด x ที่ศูนย์ในระหว่างรอบลบ คือ " หยุด " การเชื่อมต่อระหว่างผลผลิตของ ออปแอมป์และกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต รูปที่ 3.21 (ข) แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ที่ D_1 จะแทรกอยู่ในความคิดเห็นที่ห้วง ทราบว่า v_{OUT} เป็นรู้สึกที่ X มากกว่าที่เอาต์พุตของออปแอมป์

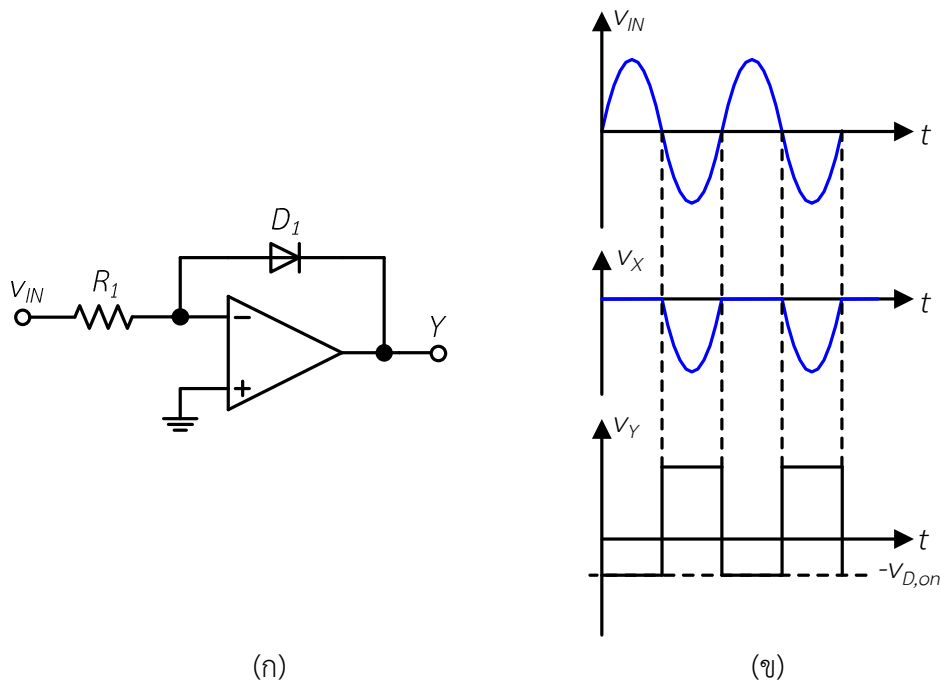


ภาพที่ 3.21 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เราทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรนี้ด้วยการสมมติให้ $v_{IN} = 0$ ในความพยายามที่จะลดความแตกต่างของแรงดันระหว่างขาบวกและขาลบของออปแอมป์ ส่งผลให้แรงดัน V_Y มีค่าประมาณเท่ากับ v_{D1} ไดโอด D_1 เริ่มทำงานด้วยกระแสเพียงเล็กน้อย ดังนั้น $V_X = 0$ ตอนนี้ถ้า v_{in} กลายเป็นบวกเล็กน้อย V_Y เพิ่มขึ้นอีกเพื่อให้กระแสไหลผ่าน D_1 และ R_1 ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต $v_{out} = v_{in}$ นั่นคือแม้เล็บบวกระดับเข้าปรากฏที่ออก ถ้า v_{in} มีค่าติดลบเล็กน้อย และออปแอมป์จ่ายแรงดันลบที่มีค่ามากออกมา และ v_{out} จะมีค่าลบ ไดโอด D_1 หยุดทำงาน และจะไม่มีกระแสไหลจาก V_X กับ V_Y รูปที่ 3.21 (ข) แสดงกราฟผลการตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ของวงจรเรียงกระแส

ตัวอย่างที่ 3.8 จงวาดกราฟสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสในรูปที่ 3.22 กรณีป้อนสัญญาณไซน์เข้าที่อินพุตของวงจร

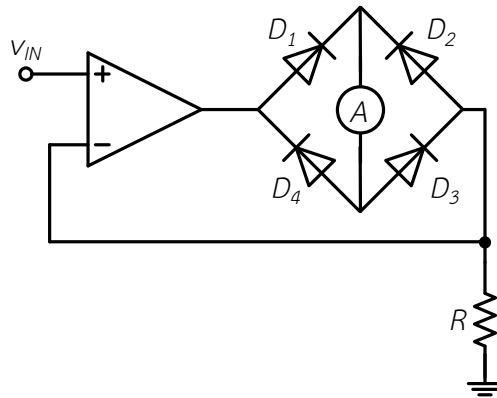
เมื่อ $v_{IN} = 0$, ออปแอมป์สร้างแรงดัน $V_Y \approx -V_{D,on}$ นั่น D_1 เป็นแทบที่ R_1 มีกระแสไหลเล็กน้อย และ X เปรียบเสมือนกราวด์ เนื่องจากแรงดัน V_Y มีค่าเป็นบวก จึงมีกระแสค่อย ๆ ไหลผ่าน R_1 แรงดัน V_Y ลดลงเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ไดโอด D_1 มีกระแสเพิ่มขึ้น แรงดัน $V_X \approx 0$ แรงดัน $V_Y \approx -V_{D,on}$ รอบสัญญาณบวก สำหรับ $v_{IN} < 0$ ไดโอด D_1 ทำงาน ส่งผลให้แรงดัน $V_X = v_{IN}$ และทำให้แรงดัน V_Y เป็นค่าเป็นบวกมาก รูปที่ p3.7(ข) แสดงสัญญาณแต่ละโหนดในวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 3.22 วงจรเรียงกระแส

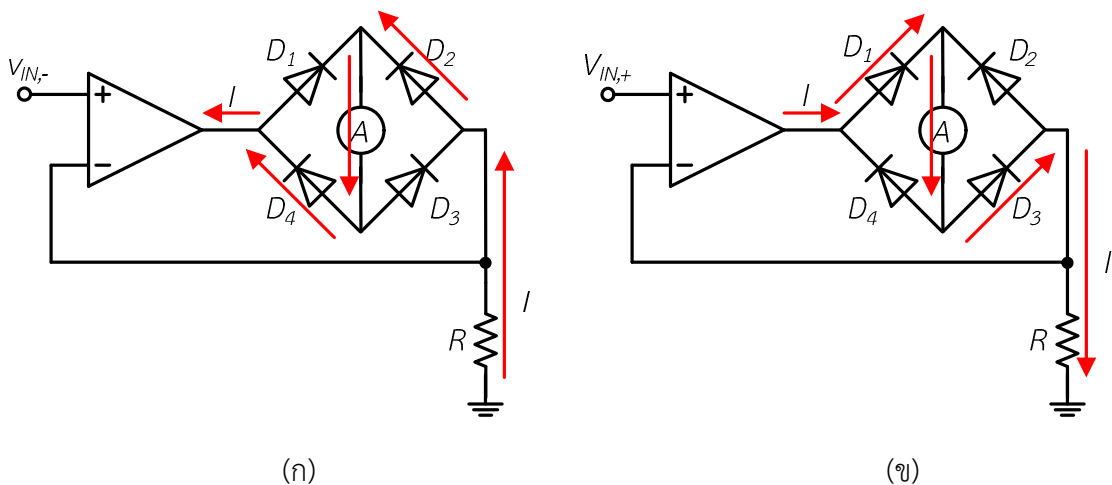
3.8 วงจรเอซีโวลต์มิเตอร์

รูปที่ 3.23 แสดงวงจรเอซีโวลต์มิเตอร์ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และ ซึ่งวงจรเอซีโวลต์มิเตอร์จะจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับมิลลิแอมมิเตอร์หรือไมโครแอมมิเตอร์ วงจรนี้มีข้อดีคือ เป็นโวลต์มิเตอร์ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก เนื่องจากแรงดันอินพุต V_{IN} ที่ต้องการวัดต่อเข้ากับขา (+) ของออปแอมป์โดยตรง



รูปที่ 3.23 วงจรเอซีโวลต์มิเตอร์

การทำงานของวงจรเอซีโวลต์มิเตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ สัญญาณอินพุตคือ V_{IN} จะเป็นไฟสลับ ถ้า V_{IN} เข้ามามีแรงดันเป็นลบ แรงดันที่ขา (-) ก็จะมีขนาดเท่า V_{IN} ด้วย ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ผ่านขั้วบวกของมิลลิแอมมิเตอร์ ออกไปที่ขั้วลบและผ่าน D_3 กลับเข้าที่เอาต์พุตของออปแอมป์ ดังรูปที่ 3.24 (ก) แต่ถ้า V_{IN} มีศักย์เป็นบวก ก็จะมีกระแสไหลออกจากเอาต์พุตของออปแอมป์ผ่านไดโอด D_4 ผ่านเข้าที่ขั้วบวกของมิลลิแอมมิเตอร์ แล้วผ่าน D_2 ออกไปที่ R แล้วลงกราวด์ ดังรูปที่ 3.24 (ข)

รูปที่ 3.24 การทำงานของวงจรโวลต์มิเตอร์ (ก) เมื่อ V_{IN} เป็นลบ และ (ข) เมื่อ V_{IN} เป็นบวก

การเบี่ยงเบนหรือการแสดงผลที่เต็มสเกลที่มิลลิแอมมิเตอร์นี้สามารถกำหนดได้ ว่าต้องการมากน้อยเพียงใด โดยสามารถกำหนดได้ที่ปริมาณกระแส I_{FS} นั้นเอง โดยที่

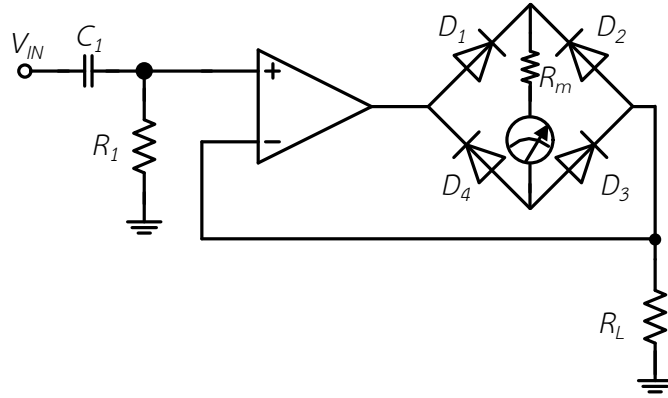
$$I_{FS} = \frac{V_{FS}}{R} \quad (3.45)$$

เมื่อ I_{FS} คือ กระแสเต็มสเกล

V_{FS} คือ แรงดันสูงสุดของอินพุตที่ต้องการให้มิเตอร์ชี้เต็มสเกล

จากวงจรจะเห็นว่าเป็นวงจรที่ใช้แสดงผลขนาดของสัญญาณไฟสลับด้วยแอมมิเตอร์ไฟตรง

แบบฝึกหัดที่ 3.7 จากวงจรในรูปที่ 3.25 เป็นโวลต์มิเตอร์ใช้อุปกรณ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่น ถ้าใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $R_m = 10 \text{ k}\Omega$ และ $I_{fs} = 100 \text{ }\mu\text{A}$ เอซีโวลต์มิเตอร์มีย่านวัด $V_1 = 50 \text{ V}_{rms}$, $V_2 = 100 \text{ V}_{rms}$ และ $V_3 = 250 \text{ V}_{rms}$ จงหาค่า $R_S = R_{S1} + R_{S2}$ ที่ทำให้เข็มชี้เต็มสเกลในแต่ละย่าน

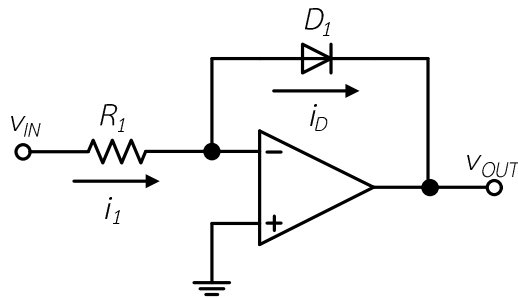


รูปที่ 3.25 วงจรเอซีโวลต์มิเตอร์

3.9 วงจรขยายแบบฟังก์ชันลอการิทึม (Log Amplifier)

รูปที่ 3.26 แสดงวงจรวางขยายแบบฟังก์ชันลอการิทึมคือวงจรที่เอาต์พุตของวงจรเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของอินพุต โดยอาศัยคุณสมบัติของไดโอดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งไดโอดจะได้รับการไบอัสตรง ดังนั้น แรงดันอินพุตที่เข้ามาจะถูกจำกัดให้มีค่าเป็นบวกเท่านั้น โดยที่กระแสที่ไหลผ่านไดโอดคือ

$$i_D \approx I_S e^{v_D/V_T} \quad (3.46)$$



รูปที่ 3.26 วงจรขยายแบบฟังก์ชันลอการิทึม

กระแสที่ไหลเข้าทางอินพุตสามารถเขียนสมการได้

$$i_1 = \frac{V_{IN}}{R_1} \quad (3.47)$$

และแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{OUT} = -V_D \quad (3.48)$$

จากวงจร $i_1 = i_D$ เราสามารถเขียนสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{V_{IN}}{R_1} \approx I_S e^{-v_O/V_T} \quad (3.49)$$

ถ้าใส่ลอการิธึมในสมการ

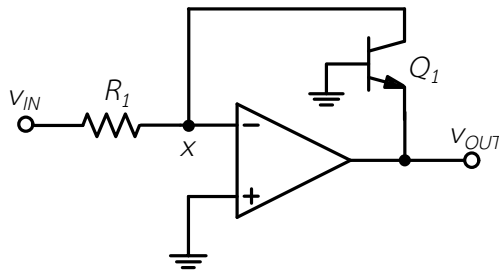
$$\ln\left(\frac{V_{IN}}{I_S R_1}\right) = -\frac{V_{OUT}}{V_T} \quad (3.50)$$

เราสามารถเขียนสมการใหม่เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = -V_T \ln\left(\frac{V_{IN}}{I_S R_1}\right) \quad (3.51)$$

3.10 วงจรขยายแบบล็อกการิทึม

รูปที่ 3.27 วงจรขยายแบบล็อกการิทึม ซึ่งสามารถนำทรานซิสเตอร์มาแทนไดโอดดังที่แสดงในรูปที่ 3.26 ได้โดยนำขาคอลเล็กเตอร์ต่อกับขาลบของออปแอมป์ ขาเอมิเตอร์ต่อกับเอาต์พุต และขาเบสต่อลงกราวด์ เราสามารถวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้



รูปที่ 3.27 วงจรขยายแบบล็อกการิทึม

จากวงจรเราทราบว่าแรงดัน V_{BE} มีค่าเท่ากับ

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{V_{IN}/R_1}{I_S} \quad (3.52)$$

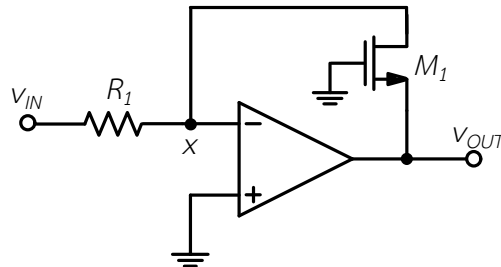
เมื่อพิจารณาที่เอาต์พุตเราพบว่า $V_{OUT} = -V_{BE}$ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = -V_T \ln \frac{V_{IN}}{R_1 I_S} \quad (3.53)$$

3.11 วงจรขยายรากที่สอง (Square-Root Amplifier)

วงจรขยายรากที่สอง หมายถึงวงจรออตรากที่สองแรงดัน ซึ่งรูปที่ 3.28 แสดงวงจรขยายรากที่สอง จากวงจรเราทราบว่ากระแส $I_D = v_{IN}/R_1$ และมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (3.54)$$



รูปที่ 3.28 วงจรขยายรากที่สอง

เมื่อพิจารณาที่เอาต์พุตเราพบว่า $V_{GS} = -V_{OUT}$ ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = - \sqrt{\frac{2V_{IN}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_1}} - V_{TH} \quad (3.55)$$

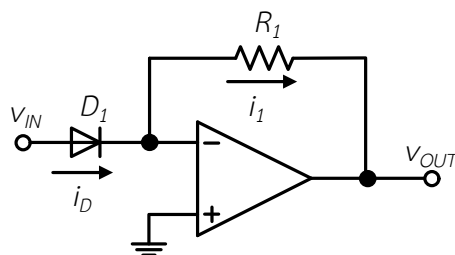
3.11 วงจรขยายแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Antilog or Exponential amplifier)

รูปที่ 3.29 แสดงวงจรขยายแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นส่วนกลับของวงจรขยายแบบฟังก์ชันลอการิทึม จากวงจรตัวอย่างจะใช้ไดโอดต่อแบบกราวด์เสมือน ถ้า $v_I > 0$ เราสามารถเขียนสมการกระแสที่ไหลผ่านไดโอดคือ

$$i_D \approx I_S e^{v_{IN}/V_T} \quad (3.56)$$

และ

$$V_{OUT} = -i_1 R_1 = -i_D R_1 \quad (3.57)$$



รูปที่ 3.29 วงจรขยายแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

ดังนั้น แรงดันที่จากเอาต์พุตของวงจรคือ

$$V_{OUT} = -I_S R e^{v_{IN}/V_T} \quad (3.58)$$

เอกสารอ้างอิง

1. Donald A. Neamen “Microelectronic Circuit Analysis and Design”

2. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith “Microelectronic Circuit”
3. Behzad Razavi “Fundamental of Microelectronics”
4. รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์ “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์”