การทดลองที่ 1 Non Ideal Op – Amps Parameters

<u>วัตถุประสงค์</u>

1. วัดและคำนวณค่าแรงดันอินพุตออฟเซ็ทของออปแอมป์ได้
2. วัดหากระแสอินพุตออฟเซ็ทและกระแสอินพุตไบอัสของออปแอมป์ได้
3. วัดหาความต้านทานอินพุตและเอาต์พุตของออปแอมป์ได้
4. วัดหาแรงดันอินพุตสูงสุดของออปแอมป์ได้
5. วัดหาการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ได้
6. วัดและคำนวณค่าอัตราสลูว์ของออปแอมป์ได้
7. วัดหา Gain Bandwidth Product ของออปแอมป์ได้
8. วัดและคำนวณค่า Common-Mode Rejection Ratio (CMRR) ได้
9. สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างออปแอมป์ในทางอุดมคติกับในทางปฏิบัติได้
10. สามารถใช้งาน Voltage Offset Null เพื่อกำจัด Offset Voltage ได้อย่างถูกต้อง
11. ออกแบบ Offset Voltage Compensating Network ให้กับวงจรออปแอมป์ได้

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง</u>

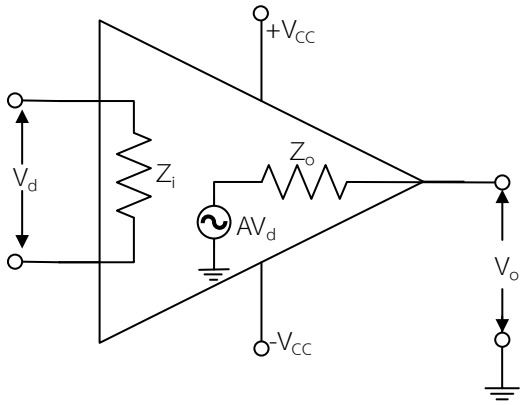
1. ออปแอมป์เบอร์ uA741 1 ตัว
2. ออปแอมป์เบอร์ LF351 1 ตัว
3. มัลติมิเตอร์ 1 เครื่อง
4. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง
5. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ 1 เครื่อง
6. แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง 1 เครื่อง
7. ตัวเก็บประจุ 1nF
8. ตัวต้านทาน 100Ωx2, 1MΩx2, 10kΩx3,100kΩx4, 1kΩ 1 ชุด
9. ความต้านทานปรับค่าได้ $10k\Omega, 100k\Omega$
10. สายต่อวงจร

<u>ทฤษฎี</u>

ใน Data Sheet ของออปแอมป์แต่ละเบอร์จะมีข้อมูลต่าง ๆ ที่ผู้ผลิตกำหนด หรือทดสอบออกมา เพื่อประโยชน์ในการออกแบบวงจรของผู้ใช้งาน เนื่องจากในทางปฏิบัติโครงสร้างในส่วนอินพุตของตัวออปแอมป์เองส่งผลให้เกิดค่า Input Offset Voltage, Input Bias Current และ Input Offset Current ซึ่งค่าทั้งหมดที่กล่าวมาทำให้ออปแอมป์มีความไม่เป็นอุดมคติ อีกทั้งสร้างปัญหาขณะนำไปใช้งานจริง โดยเมื่อนำไปใช้งานก็จะมีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าผิดพลาด และมีผลกระทบอย่างมากถ้าเป็นวงจรที่ใช้สำหรับสัญญาณขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงแต่ก็สามารถแก้ไขหรือลดค่าดังกล่าวได้โดยอาศัยการออกแบบวงจรเพิ่มเติม

Differential Input Resistance: R_i

เป็นความต้านทานอินพุตระหว่างขา Inverting Input และขา Non-Inverting Input ในทางอุดมคติ Z_i มีค่าเท่ากับอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติออปแอมป์ไม่ได้มีค่าดังกล่าวออปแอมป์บางตัวอาจจะมีค่า 1 เมกกะโอห์ม หรือสูงกว่านั้น อย่างไรก็ตามค่านี้มักจะมีกำหนดไว้ในคู่มือของโรงงานคู่มือผู้ผลิต สำหรับออปแอมป์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือเบอร์ 741 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 2 เมกกะโอห์ม



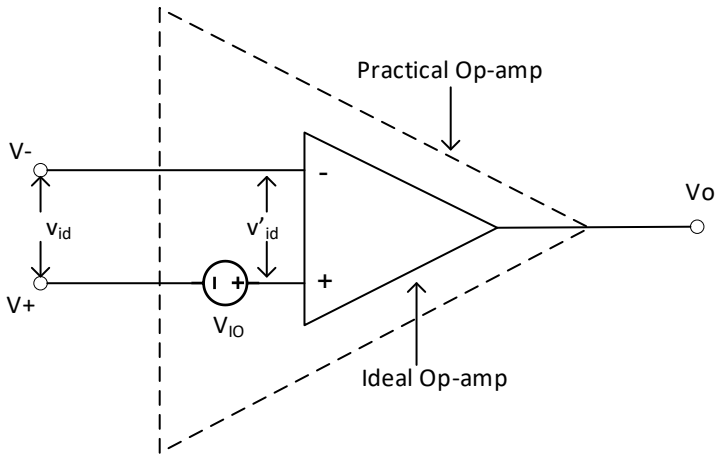
รูปที่ 1 แสดงวงจรเสมือนของออปแอมป์

Input Offset Voltage: V_{IO}

Input offset Voltage (V_{IO}) เป็นแรงดันระหว่างอินพุตทั้ง 2 ของออปแอมป์ซึ่งมีผลเนื่องมาจากการความไม่สมพงษ์ (Mismatch) กันของแรงดันไบแอสระหว่างขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่ภาคอินพุตขยายผลต่างของตัวออปแอมป์ ดังนั้น หากไม่มีแรงดันอินพุตจะมีแรงดันเอาต์พุตออกมาค่าหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่า Input offset Voltage (V_{IO}) คือ ขนาดของแรงดันที่ระหว่างขาอินพุตของออปแอมป์ที่ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต (v_O) มีค่าเป็นศูนย์หรือแสดงเป็นสมการได้ว่า

$$\boldsymbol{V_{IO}} = (v_+ - v_-)|_{v_o=0}$$

ค่า Input Offset Voltage (V_{IO}) นี้จะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ค่า V_{IO} นี้ในออปแอมป์แต่ละเบอร์จะมีค่าไม่เท่ากันตัวอย่างเช่น V_{IO} (741C) = 6 mV (Maximum) หรือ V_{IO} (714C) = 150 μV (Maximum) เนื่องจาก 741C เป็นออปแอมป์แบบ Precision



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบออปแอมป์ในทางปฏิบัติกับออปแอมป์ในทางอุดมคติ

Input Voltage Range: V_i

แรงดันอินพุตจะสูงได้ไม่เกินค่าค่าหนึ่ง

Input Impedance: Z_i **และ** Input Resistance: R_i

เป็นความต้านทานอินพุตระหว่างขา Inverting Input และขา Non-Inverting Input ในทางอุดมคติ Z_i มีค่าเท่ากับอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติออปแอมป์ไม่ได้มีค่าดังกล่าวออปแอมป์บางตัวอาจจะมีค่า 1 MΩ หรือสูงกว่านั้น อย่างไรก็ตามค่านี้มักจะมีกำหนดไว้ในคู่มือของโรงงานคู่มือผู้ผลิต

Output Impedance: Z_o

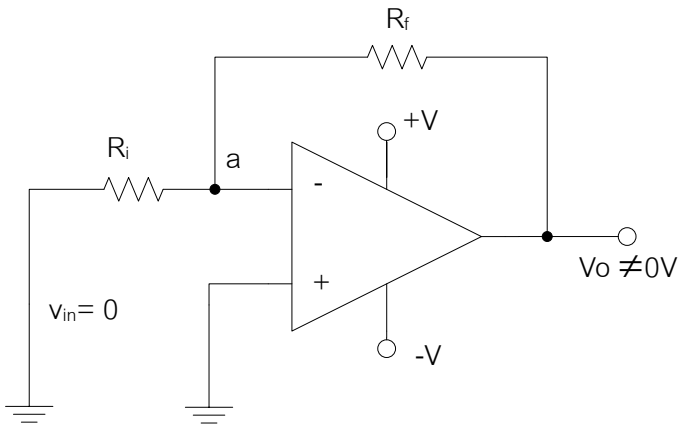
ในทางอุดมคติมีค่าเท่ากับ 0 Ω แต่ในทางปฏิบัติค่านี้อาจมีค่าได้ถึงหลายร้อยโอห์มสำหรับออปแอมป์ เบอร์ 741 จะมีค่าประมาณ 75 Ω ส่วนออปแอมป์เบอร์อื่น ๆ จะมีค่าแตกต่างกันออกไป

Output Voltage Swing: V_{OM}

คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตได้สูงที่สุดไม่เกินค่าค่าหนึ่งซึ่งมักจะมีค่าไม่เกินแรงดัน Supply

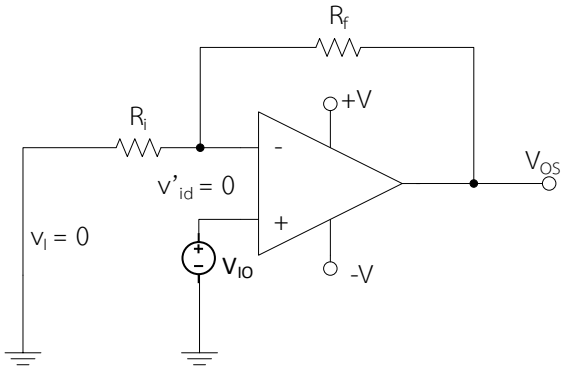
Output Offset Voltage: V_{OS}

จากรูปที่ 3 ถ้าต่ออินพุตลงกราวด์ ($v_I = 0$) ในทางทฤษฎีเอาต์พุต V_{OS} จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย แต่ในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจาก Input offset Voltage แรงดันเอาต์พุตในขณะที่ $v_I = 0$ เรียกว่า “Output Offset Voltage: V_{OS}



รูปที่ 3 แสดงผลของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ

สำหรับขนาดของ Output Offset Voltage นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวงจรและค่าของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับออปแอมป์ตัวนั้น ยกตัวอย่างวงจรขยายแบบกลับเฟสใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรขยายแบบกลับเฟสเมื่อเกิด Input Offset Voltage

จากวงจรเราสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{OS}) ได้จาก

$$V_{OS} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_{IO}$$

ถ้ากำหนดให้ R_i = 1k Ω, R_f = 100k Ω และออปแอมป์ตัวนี้มี V_{IO} = 60mV จะได้

$$V_{OS} = \left(1 + \frac{100}{1}\right) 6mV = 0.6V$$

นั่นคือจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ v_i = 0 ที่เอาต์พุตจะมีแรงดันออกมาถึง 0.6V ซึ่งแรงดันขนาดนี้จะมีผลต่อการใช้งานจริงเป็นอย่างมาก แต่ก็จะเห็นได้ว่าถ้าค่า R_f ลดลงเหลือ 10 kΩ ขนาดของ v_{os} ก็จะลดลงเหลือ 60mV เช่นเดียวกัน ถ้า R_f = 1MΩ เราจะเห็นได้ว่า v_{os} จะมีขนาดถึง 6V

Input Bias Current: I_{IB}

ในการใช้งานออปแอมป์นั้นหากเราต่ออินพุตทั้งสองข้างลงกราวด์จะพบว่ามีกระแส $I_{(-)}$ ไหลเข้าสู่ขา Non-Inverting Input อันเนื่องมาจากทรานซิสเตอร์ที่ขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ต้องการกระแสไบแอสตรงในการทำงาน ซึ่งจาก Datasheet ของอุปกรณ์จะพบว่า Input Bias Current หรือ I_{IB} หาได้จากค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตทั้งสองของตัวออปแอมป์

$$I_{IB} = \frac{I_{(-)} + I_{(+)}}{2}$$

Input Offset Current: I_{IO}

หมายถึงผลต่างของกระแสที่ไหลเข้าสู่ขาอินพุตทั้งสอง ($I_{(-)}$ และ $I_{(+)}$) ซึ่งยังทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ โดยทั่วไป I_{IO} จะอยู่ในช่วง pA ถึง nA

$$I_{IO} = \left|I_{(-)} - I_{(+)}\right|$$

จากสมการทั้งสองที่กล่าวมาจะได้ว่าที่ขา Inverting Input จะได้ Inverting Input Bias Current

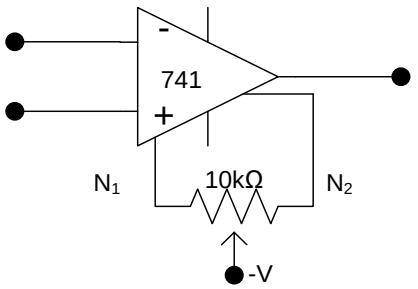
$$I_{(-)} = I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2}$$

และที่ขา Non-Inverting Input จะได้ Non-Inverting Input Bias Current

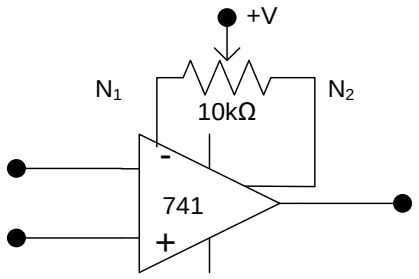
$$I_{(+)} = I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}$$

Offset Voltage Compensation

ออปแอมป์โดยทั่วไปแล้วจะมีจุดต่อเตรียมไว้เพื่อต่อกับตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อใช้ในการปรับ Offset Voltage ด้วยแต่วิธีการต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ เข้ากับออปแอมป์ เพื่อปรับ Offset Voltage นี้จะมีหลักการที่คล้ายคลึงกันแต่ไม่เหมือนกันทั้งหมด ดังนั้นเพื่อความแน่นอนจึงต้องดูการต่อจากในดาต้าชีตเป็นหลัก เช่น 741 จะมีขาต่อเตรียมไว้สำหรับปรับแรงดันออฟเซ็ทโดยการต่อ POT ในตำแหน่งที่ระบุมาใน Data Sheet เรียกว่าขา OFFSET NULL (N_1) และขา OFFSET NULL (N_2) โดยวิธีปรับนั้นจะต้องต่อวงจรปรับแรงดันเข้ากับขา N_1 และขา N_2 ช่วงระดับแรงดัน offset ที่ปรับได้เรียกว่า Offset Voltage Adjustment Range

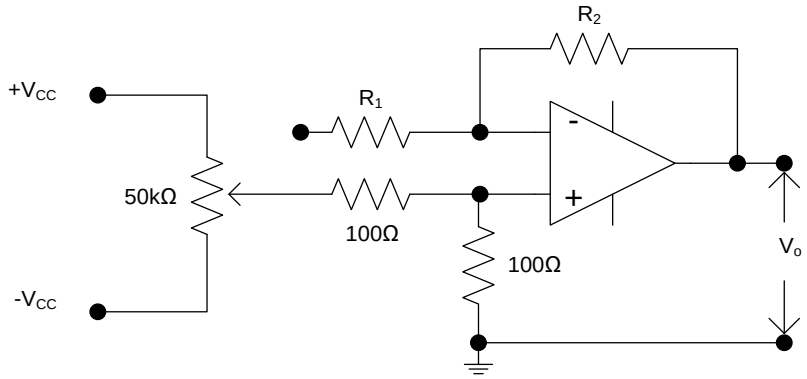


รูปที่ 2

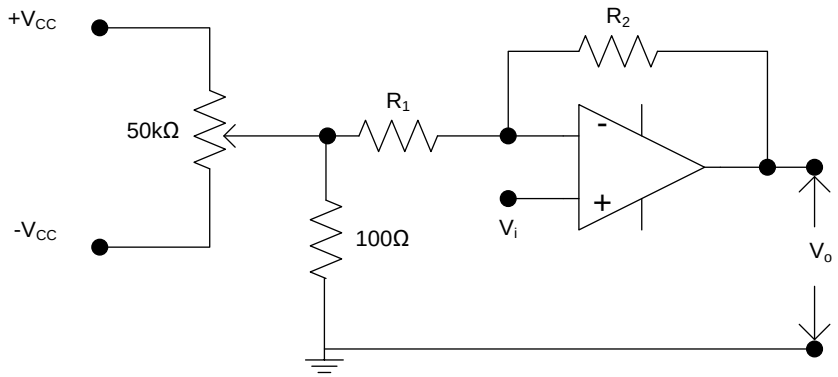


รูปที่ 3

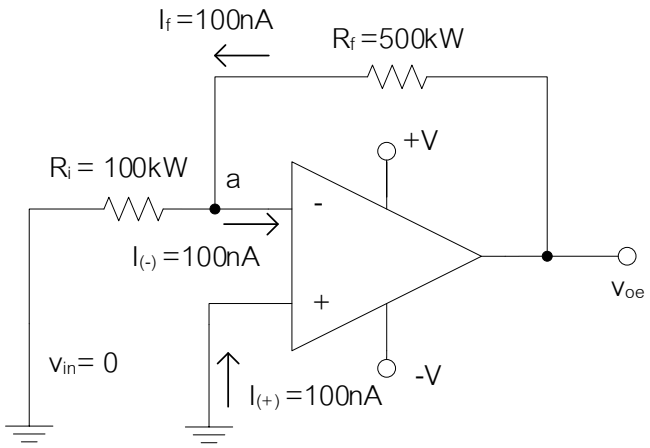
ออปแอมป์แต่ละเบอร์นั้นใช้ค่าความต้านทานแตกต่างกันไปตามรูปที่ 2 และรูปที่ 26 สำหรับ 741 จะมี Offset Voltage Adjustment Range ±15mV เมื่อใช้ POT ขนาด 10k โดย การปรับศูนย์ (Null Adjustment) คือการปรับแรงดันออฟเซ็ตด้วยการป้อนไฟตรงค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งชดเชยให้กับอินพุต (ขา+ หรือขา- ก็ได้) เพื่อให้แรงดันเอาท์พุตเท่ากับศูนย์



รูปที่ 4 การปรับแรงดันออฟเซ็ตทางขาอินพุต + ในกรณีที่ป้อนขาสัญญาณอินพุต V_i ที่ขาอินพุต –



รูปที่ 5 การปรับแรงดันออฟเซ็ตทางขาอินพุต - ในกรณีที่ป้อนขาสัญญาณอินพุต V_i ที่ขาอินพุต +



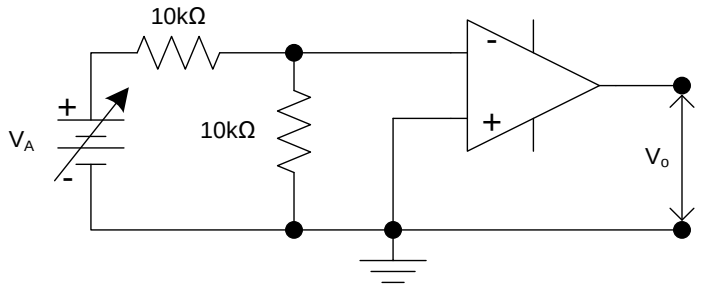
รูปที่ 6 แสดงการคำนวณเพื่อหาค่า Output Error Voltage ของวงจรขยายแบบกลับเฟส

จากวงจร ถ้ากำหนดให้ v_{IO} = 0V, I_{IO} = 0mA และ I_B = 100nA เมื่อทำการหาค่า Output Error Voltage; v_{oe} จะได้ดังนี้ แรงดันที่ตกคร่อม R_i จะเท่ากับ 0V ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน R_i ดังนั้นกระแส $I_{(-)}$ ก็จะต้องไหลจากเอาต์พุตผ่าน R_f เข้าสู่ขา Inverting Input ดังนั้น v_{oe} จะหาได้จาก

$$v_{oe} = -I_f R_f = -100 \text{ nA} \times 500\text{k}\Omega = -50 \text{ mV}$$

ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ออปแอมป์จะมี v_{IO} = 0V และ I_{IO} = 0mA ก็ตามแต่ Input Bias Current (I_B) ก็สามารถทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่เอาต์พุตได้ ซึ่งการแก้ไขนั้นจะทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน R_P เพิ่มเข้าไปในวงจรระหว่างขา Non-Inverting และกราวด์โดยกำหนดให้

$$R_p = R_1 || R_f = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$$



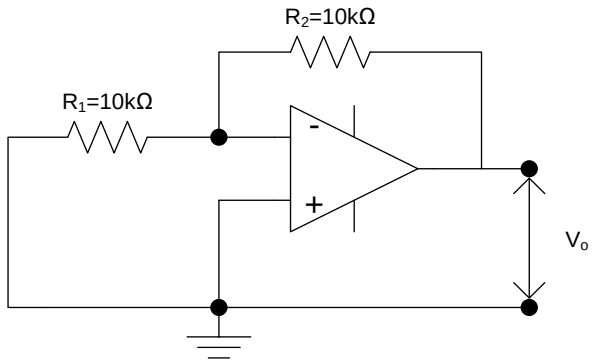
รูปที่ 7

การวัดแรงดันออฟเซ็ตที่อินพุต (V_{IO})

วิธีที่ 1 ต่อวงจรดังรูปที่ 7 ปรับค่าของ V_A จนกว่า V_O มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์

การปรับค่าของ V_A ในทางปฏิบัตินั้นกระทำได้ยากเนื่องจากตัวออปแอมป์มีความไวสูงนั้นเอง (เนื่องจาก Open loop gain มีค่าสูงมาก) จะสังเกตได้ว่า V_O จะกระโดดอยู่ระหว่างแรงดันอิ่มตัวตลอดเวลา

วิธีที่ 2 ต่อวงจรดังรูปที่ 8 ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 (Feedback Network) ทำหน้าที่ลดความไวของออปแอมป์ลง



รูปที่ 8

การวัดทำได้โดยอ่านค่าของ V_O แล้วหลังจากนั้น ทำการคำนวณหาค่า V_{IOS} จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{IO} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) V_O$$

โดยที่จะสอดคล้องตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้ $R_2/R_1 << A_O$

$V_{IO}\,(R_2/R_1+1) >> R_2\, I_{IO}$

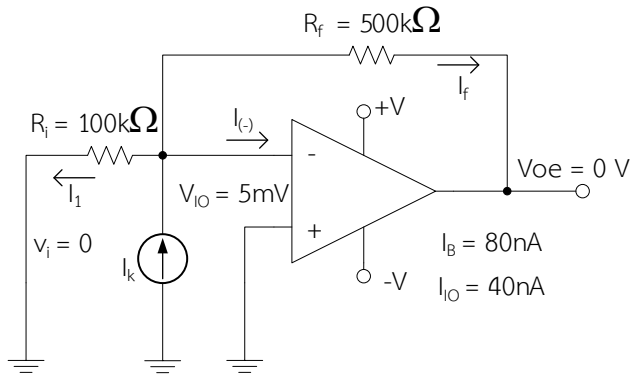
เมื่อ A_O = Open-loop Gain

I_{IO} = Input Offset Current

External Compensation of Offset Errors

สาเหตุหลักของ Output Error Voltage เป็นผลมาจากค่าของ I_B, I_{IO} และ V_{IO} ซึ่งเป็นขนาดของกระแสและแรงดันดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เราจะสามารถใช้แหล่งจ่ายกระแสต่อเชื่อมในตำแหน่งที่เหมาะสมของวงจรเพื่อกำจัดค่าผิดพลาดที่อินพุตเหล่านี้ โดยวิธีนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจำกัดขนาดค่า Output Offset Error Voltage ให้อยู่ในพิกัดที่สามารถควบคุมและปรับแต่งค่าได้โดยง่าย ซึ่งการต่อวงจรเพิ่มเข้าไปจะต้องมีผลกระทบที่เกิดกับวงจรน้อยที่สุด และต้องสามารถแก้ปัญหาของ Offset Error ได้โดยตรง

- **การออกแบบ** Current Source Compensating Network



รูปที่ 9 แสดงการต่อแหล่งจ่ายกระแสเพื่อกำจัดค่า Offset Error

การต่อแหล่งจ่ายกระแสเพิ่มเข้าไปที่โนด A ของวงจรนั้นเพื่อกำจัด Offset Error ของวงจรที่เกิดขึ้น โดยกระแส I_k ที่

เราจะต้องจ่ายเข้าไปนั้นสามารถหาได้จาก

$$I_k = I_1 + I_{(-)} + I_f$$

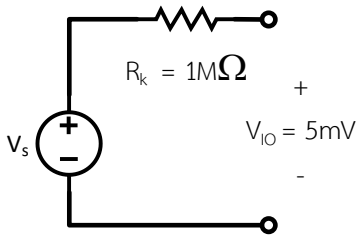
$$I_{(-)} = I_B + \frac{I_{IO}}{2} = 80nA + \frac{40nA}{2} = 100nA$$

$$I_1 = \frac{V_{IO}}{R_i} = \frac{5mV}{100k\Omega} = 50nA$$

$$I_f = \frac{V_{IO}}{R_f} = \frac{5mV}{500k\Omega} = 10nA$$

ดังนั้น $I_k = 100nA + 50nA + 10nA = 160nA$

ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสที่เราต้องใช้นั้นจะสามารถสร้างได้จากแหล่งจ่ายแรงดันโดยกำหนดให้นำตัวต้านทาน R_k มาต่ออนุกรมกับแหล่งจ่าย V_S โดยค่าของ R_k ที่ใช้จะต้องมีค่าที่สูงกว่า R ที่โหลดอยู่ 10 เท่า ดังวงจรต่อไปนี้



รูปที่ 10 เงื่อนไขของการสร้างวงจรแหล่งจ่ายกระแส

จากวงจรจะได้ $V_s = (I_k \cdot R_k) + V_{IO}$

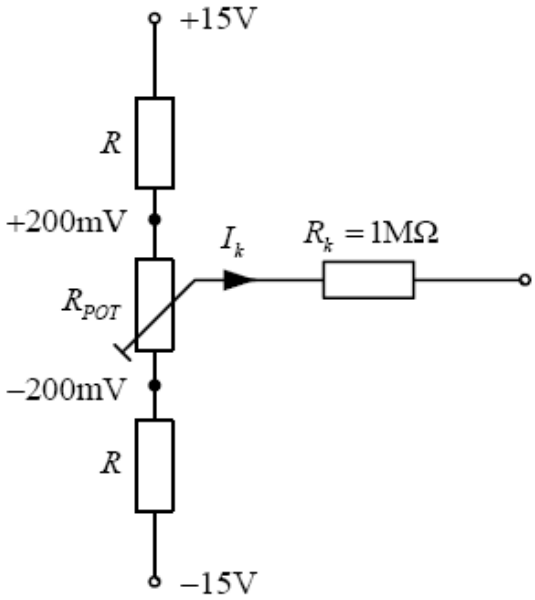
เมื่อ $V_{IO} = 5mV$

$R_k = 1M\Omega$

$I_k = 160nA$

$V_s = (160nA \cdot 1M\Omega) + 5mV = 165mV$

แต่เพื่อให้วงจรนี้อยู่ในพิกัดความเพื่อที่สามารถควบคุมได้ดังนั้นแรงดัน V_S ควรปรับค่าได้ในช่วง ±200mV ดังนั้นเราจะได้วงจรแหล่งจ่ายกระแสดังต่อไปนี้



รูปที่ 11 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้งานในทางปฏิบัติ

จากวงจร กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานปรับค่าอยู่ในช่วง 1mA -10mA ดังนั้นให้ $I_{R_{POT}} = 5mA$

เมื่อ $V_{R_{POT}} = 200mV + 200mV = 400mV$

$$R_{POT} = \frac{V_{R_{POT}}}{I_{R_{POT}}} = \frac{400mV}{5mA} = 80\Omega$$

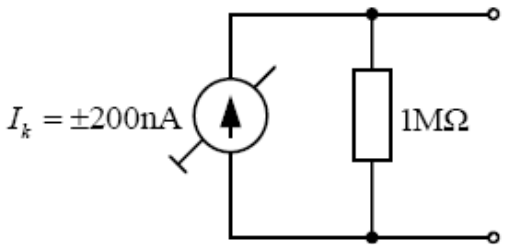
แต่เลือกใช้ค่าความต้านทาน $R_{POT} = 100\Omega$

แรงดันที่ตกคร่อม $V'_{R_{POT}} = I_{R_{POT}} \cdot R_{POT} = 5mA \cdot 100\Omega = 500mV$

จะได้ $$R = \left(\frac{V_{SS} - \frac{V'_{R_{POT}}}{2}}{I_{R_{POT}}}\right) = \left(\frac{15V - \frac{500mV}{2}}{5mA}\right)$$

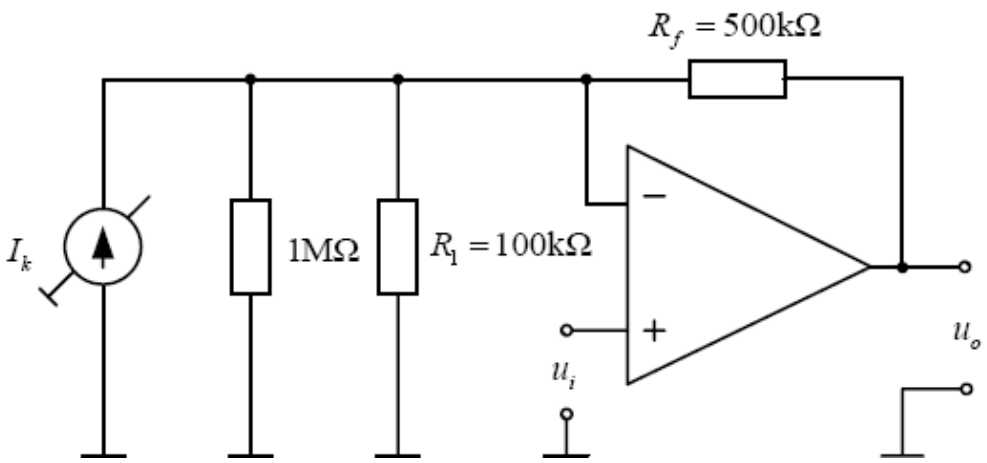
$$R = 2950\Omega \cong 3k\Omega$$

เพราะฉะนั้นจะได้วงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายกระแสดังต่อไปนี้



รูปที่ 12 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายกระแส

ซึ่งหากพิจารณาวงจรเทียบเคียงที่ได้หากเรานำวงที่ได้ไปต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส นั้นจะเห็นได้ว่า R_K ของแหล่งจ่ายกระแสจะไปขนานกับ R_1 ของวงจร ดังนั้นค่า R_1 ในวงจรจะเปลี่ยนไปทำให้อัตราขยายของวงจรเปลี่ยนแปลงไปด้วย

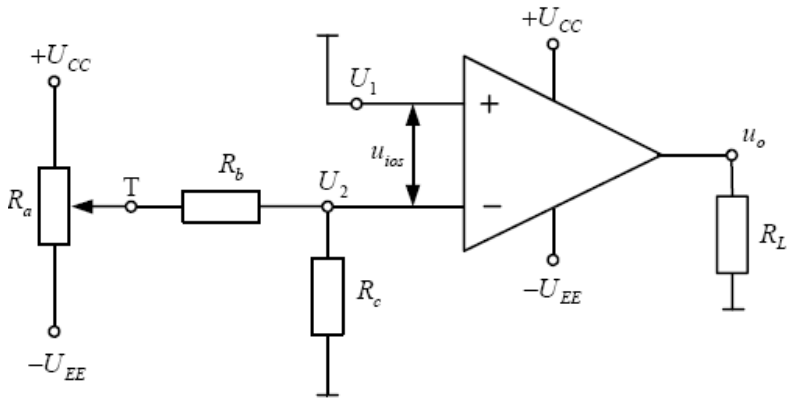


รูปที่ 13 ลักษณะสมบัติของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสเมื่อชดเชย Offset ด้วยแหล่งจ่ายกระแส

ซึ่งวิธีการแก้ปัญหา Offset ที่เกิดขึ้นในวงจรลักษณะนี้เราจะอาศัยวิธีการต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้าไปแทนแหล่งจ่ายกระแสในวงจรซึ่งสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- **การออกแบบ** Voltage Source Compensating Network

ออปแอมป์กับ Offset Voltage Compensating Network ดังที่แสดงในภาพข้างล่างนี้ จะประกอบด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_a) ตัวต้านทาน R_b และ R_c ถ้าเรานำไปใช้ในวงจรขยายแบบกลับเฟส Compensating Network ควรต่อกับขาอินพุตไม่กลับเฟสของออปแอมป์ ในวงจรที่ สามารถใช้เป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสได้ ดังนั้น Compensating Network จึงถูกต่อที่ขาอินพุตกลับเฟสของออปแอมป์ ซึ่งตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_a) ต่ออยู่ระหว่าง $+U_{CC}$ และ $-U_{EE}$ โดยแรงดันที่ตกคร่อม R_c คือแรงดันที่ขาอินพุตไม่กลับเฟส U_2 เราสามารถทำให้แรงดันที่ U_2 เท่ากับ U_1 ได้โดยการปรับ R_a นั่นคือ u_{ios} สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้ และเป็นผลให้ u_o มีค่าเป็นศูนย์ด้วย

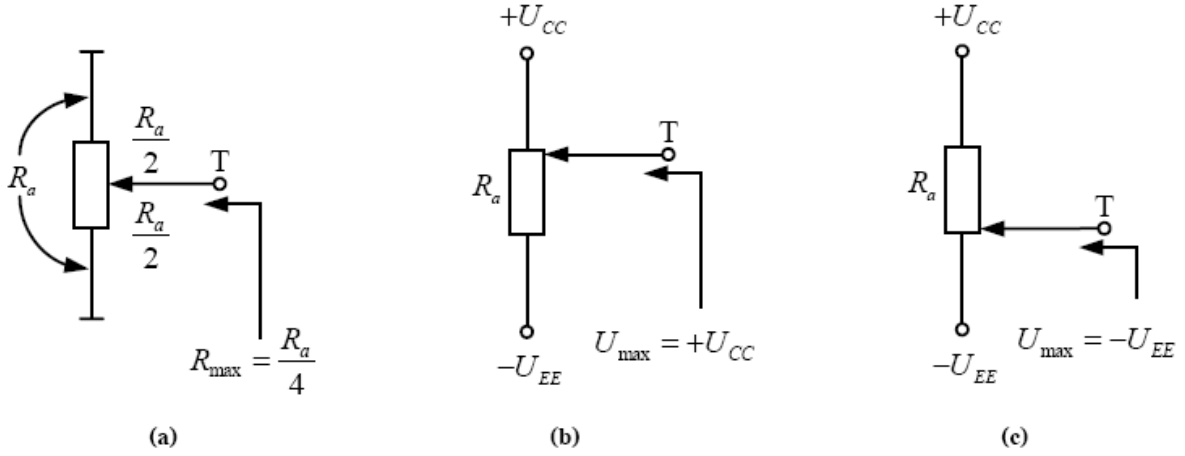


รูปที่ 14 การต่อ Offset Voltage Compensating Network **เข้ากับออปแอมป์**

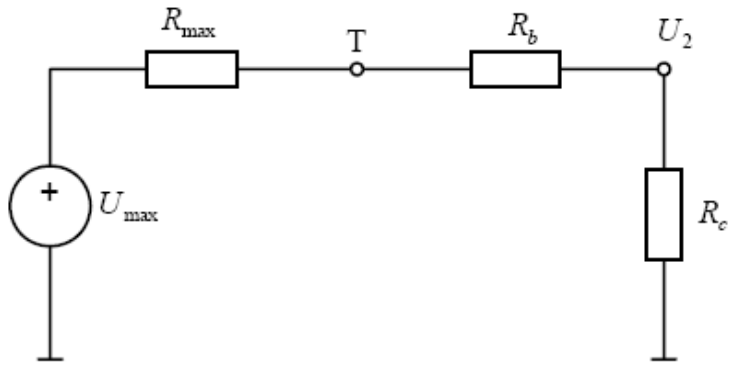
ตัวอย่างเช่น สมมติให้ u_o มีค่าเป็นบวก ซึ่งบอกเป็นนัยว่า $U_1 > U_2$ กรณีนี้หมายความว่า U_2 ควรถูกเพิ่มจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ U_1 ซึ่งสามารถเพิ่มได้โดยการปรับ R_a ไปทาง $+U_{CC}$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้า u_o มีค่าเป็นลบ ก็แสดงว่า $U_2 > U_1$ จากนั้นจึงทำการปรับ R_a ไปทาง $-U_{EE}$ จนกระทั่ง u_o ลดลงจนเป็นศูนย์

การสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง u_{ios} แหล่งจ่ายแรงดันและส่วนประกอบของการชดเชย (Compensating) อันดับแรก จากวงจรเธวินินอยู่ให้มองจากจุด T กลับเข้าไปหา R_a ค่าความต้านทานสูงสุดของวงจรสมมูลเธวินิน R_{max} จะปรากฏเมื่อตำแหน่งของตัวต้านทานปรับค่าได้อยู่กึ่งกลางดังแสดงในรูป (a) ดังนั้นแรงดันสูงสุดของวงจรสมมูลเธวินิน U_{max} จะมีค่าเท่ากับ $+U_{CC}$ และ $-U_{EE}$ เมื่อตัวต้านทานปรับค่าได้อยู่ ณ ตำแหน่งสูงที่สุดและต่ำที่สุดตามลำดับ ดังแสดงในรูป (b) และ รูป (c)

$$R_{max} = \frac{R_a}{2} \,||\, \frac{R_a}{2} = \frac{R_f}{4}$$



รูปที่ 15 (a) **วงจรสมมูลเธวินินสำหรับค่าความต้านทาน** R_{max} (b) **และ** (c) **วงจรสมมูลสำหรับแรงดัน** max



แหล่งจ่ายแรงดัน $+V_{CC}$ และ $-V_{EE}$ มีขนาดเท่ากันเพราะฉะนั้นให้เราแทนขนาดด้วยแรงดัน V ดังนั้น V_{max}= V ต่อไปทำวงจรชดเชยอีกครั้งโดยใช้แรงดันเธวินินสูงสุดและความต้านทานที่แสดงในวงจรต่อไปนี้ แล้วประยุกต์ใช้กฎของการแบ่งแรงดันกับวงจรจะได้

$$V_2 = \frac{R_c}{R_{max} + R_b + R_c} V_{max}$$

V คือฟังก์ชั่นของแรงดันเธวินินสูงสุด V_{max} และค่าความต้านทานเธวินินสูงสุด R_{max} แต่ค่าของ V_2 สามารถเป็นค่าเดียวกันกับ V_{IO} ได้ จาก $V_1 - V_2 = V_{IO}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{IO} = \frac{R_c}{R_{max} + R_b + R_c} V_{max}$$

ในสมการ ยังมีตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าอยู่ ให้เราทำการสมมุติโดย $R_b > R_{max} > R_c$ เมื่อ $R_{max} = \frac{R_a}{4}$ เหตุผลของการสมมตินี้ก็คือ กระแสไบอัสในออปแอมป์จะกำหนดให้คงที่และมีค่าที่น้อยมาก (อยู่ในช่วงนาโนแอมป์) เพราะฉะนั้นกระแสไบอัสที่ขากลับเฟสของออปแอมป์ในวงจรจะมีค่าคงที่และน้อยมากตามไปด้วย กระแสไบอัสที่ขากลับเฟสและกระแสที่ไหลผ่าน R_c ได้มาจากกระแสที่ไหลผ่าน R_b ซึ่งกระแสที่ไหลผ่าน R_b จะมีค่าน้อยกว่ากระแสที่ไหลผ่าน R_c ก็ต่อเมื่อ $R_b > R_a$ จึงบอกเป็นนัยว่า $R_b > R_{max}$ ดังนั้นการสมมติให้ $R_b > R_{max} > R_c$ จึงดูมีเหตุผล จากการสมมติสามารถกล่าวได้ว่า

$$R_{max} + R_c + R_b \cong R_b$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการ V_{io} ใหม่ได้ดังนี้

$$V_{IO} = \frac{R_c V_{max}}{R_b}$$

เมื่อ $$V = V_{max} = |V_{CC}| = |-V_{EE}|$$

$$V_{IO} = \frac{R_c V}{R_b}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า V_{io} นั้น ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายแรงดัน $+V_{CC}$ และ $-V_{EE}$

ตัวอย่าง ออกแบบ Compensating Network สำหรับออปแอมป์เบอร์ LM307 โดยจ่ายแรงดันให้กับออปแอมป์ ±10V

(กำหนดให้ LM307 มี Input Offset Voltage : V_{IO} สูงสุด 10mV)

วิธีทำ LM307 มี Input Offset Voltage : V_{IO} สูงสุด 10mV

ค่าของแหล่งจ่ายแรงดันคือ

$$|V_{CC}| = |-V_{EE}| = 10V$$

จากสมการ

$$V_{io} = \frac{R_c V}{R_b}$$

$$10mV = \frac{R_c(10V)}{R_b}$$

$$R_b = \frac{(10V)}{10mV} R_c$$

ถ้าเลือก $$R_c = 10\Omega$$

จะได้ $$R_b = 1000R_c = 10k\Omega$$

เลือก $$R_b = 10R_{max} \text{ เมื่อ } R_{max} = \frac{R_a}{4}$$

ดังนั้น $$R_b = 10\frac{R_a}{4}$$

$$R_{ba} = \frac{R_b}{2.5} = \frac{10k\Omega}{2.5} = 4k\Omega - \text{Potentiometer}$$

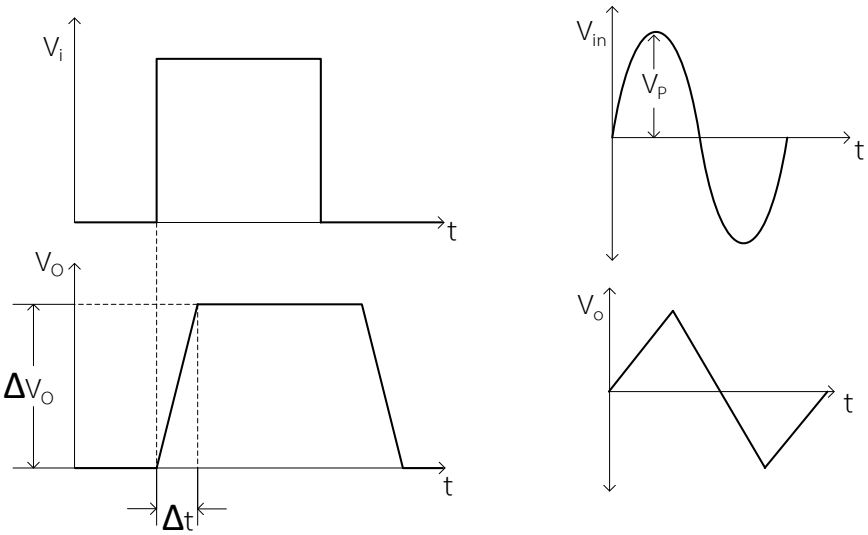
ถ้าไม่มี Potentiometer ค่า 4kΩ เราอาจใช้ค่าที่น้อยกว่าได้ เช่น 3kΩ ทั้งนี้เนื่องจาก เงื่อนไข คือ $R_b = 10R_{max}$ เมื่อ $R_{max} = \frac{R_a}{4}$ ดังนั้นถ้าเลือกใช้ $R_a = 3k\Omega$ จะยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

Slew Rate: SR

เป็นอัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่อเวลา มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อวินาที สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังError! Reference source not found. และสามารถหาค่าได้จาก

$$SR = \left.\frac{\Delta V}{\Delta t}\right|_{max} \quad V/s$$

ค่าอัตราสลูว์จะทำการทดสอบที่ Unity Gain (+1) ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ของออปแอมป์แต่ละเบอร์ ในการเลือกออปแอมป์ใช้งานด้านความถี่ต้องนำค่า SR มาพิจารณาด้วย เพราะถ้าแรงดันต้องการความชันซึ่งมีค่าสูงกว่า SR มากก็จะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นได้



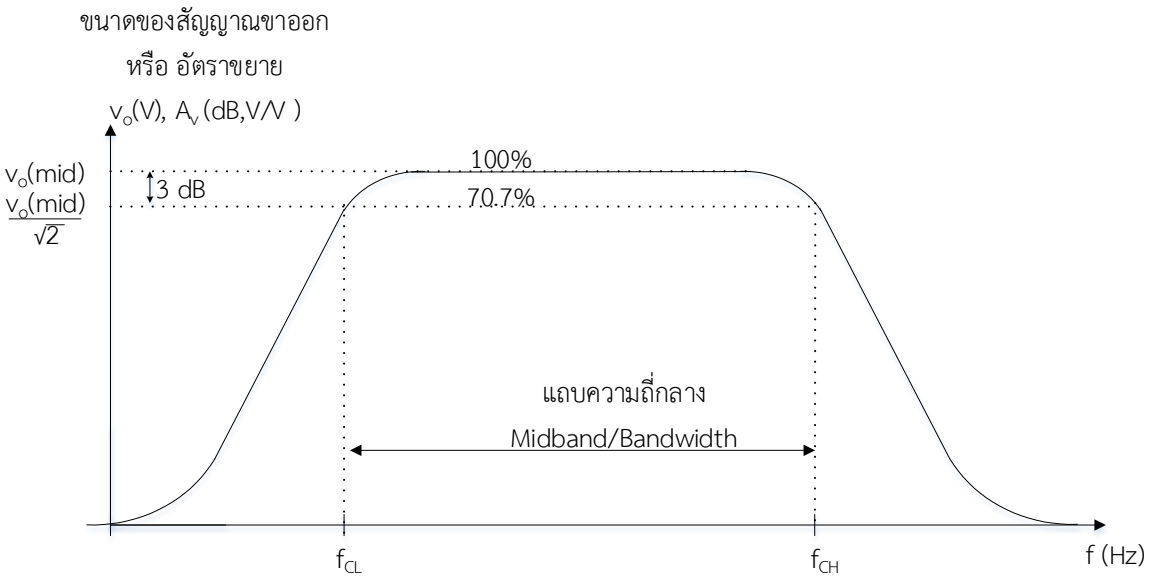
รูปที่ 16 ผลของการสลูว์สำหรับสัญญาณสี่เหลี่ยมและไซน์

พิจารณาสัญญาณอินพุต เปลี่ยนแปลงระดับของ V_i ขึ้นอยู่กับความถี่ (f) และขนาดของ v_p ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับสูงสุดของ v_i หาได้จาก $2\pi f V_p$ ถ้าค่าอัตราดังกล่าวมีค่ามากกว่าอัตราสลูว์ของออปแอมป์ ผลจะปรากฏว่าสัญญาณเอาท์พุต v_o จะเปลี่ยนรูป (Distortion) หรือเพี้ยนไปจากสัญญาณ v_i ทั้งนี้เพราะ v_o ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับของ v_i ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ v_o จะมีค่าสูงสุดได้เท่ากับอัตราสลูว์ของออปแอมป์เท่านั้น ดังนั้นถ้า $2\pi f V_p$ มีค่าสูงสุดกว่าอัตราสลูว์ของออปแอมป์มากขึ้นเท่าใดจะพบว่า v_o จะมีรูปร่างใกล้เคียงรูปสามเหลี่ยมมากขึ้นเท่านั้น

$$2\pi f_{max} V_p \leq \text{อัตราสลูว์}$$

ดังนั้น ความถี่สูงสุดที่ v_o ไม่เกิดการลดทอน (f_{max}) = อัตราสลูว์ / $(2\pi V_p)$

Gain-Bandwidth Product: GB



รูปที่ 20 การตอบสนองความถี่ของวงจรขยาย (Frequency Response)

วงจรขยายโดยทั่วไปรวมทั้งวงจรขยายที่มี Op amp ที่ความถี่ปานกลาง (Midband) วงจรจะมี Gain (A) หรืออัตราขยาย สูงที่สุดซึ่งจะเท่ากับ A_o : Midband Gain เมื่อสัญญาณมีความถี่ต่ำลงอัตราขยายของวงจรก็มีค่าลดลง จนถึงที่ความถี่ F_L อัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 70.7% ของ A_o หรือลดลงจาก A_o มา 3 dB ความถี่ F_L นี้เรียกว่าจุดคัทออฟความถี่ต่ำ (Low Frequency Cutoff) และในทำนองเดียวกันเมื่อความถี่ของสัญญาณสูงขึ้น อัตราการขยายจะลดลงเช่นเดียวกันที่ความถี่ F_H นี้เรียกว่าจุดคัทออฟความถี่สูง (High Frequency Cutoff) ส่วนช่วงระหว่าง F_L ถึง F_H คือค่า Bandwidth ของวงจรขยาย

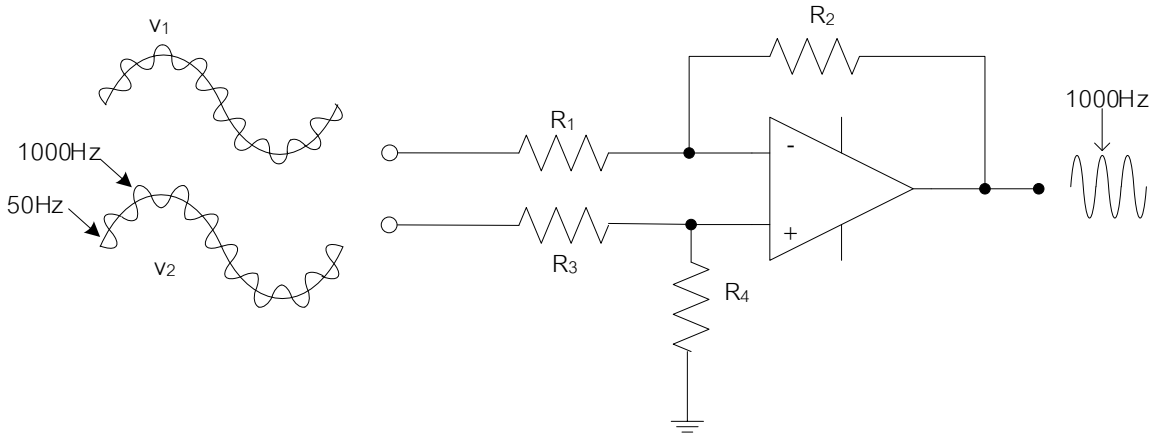
ในวงจรขยายทุกวงจรจะมีจุดคัทออฟความถี่สูงเสมอ แต่บางจะสามารถตอบสนองความถี่ต่ำมากๆได้จะถึงกระแสตรง (0 Hz)

Gain-Bandwidth Product หรือ GB = Gain x Bandwidth ใน Datasheet ค่า GB เป็นค่า Bandwidth ของออปแอมป์เมื่อ ปรับวงจรให้ Gain เป็น 1 บางครั้ง Gain-Bandwidth Product อาจเรียกเป็น Closed-loop Bandwidth, Unity Gain Bandwidth หรือ Small-Signal Bandwidth การทราบ GB จะทำให้สามารถทราบได้ว่าถ้าออกแบบวงจรให้มีค่า Gain ตามต้องการแล้ว Bandwidth ของวงจรจะมีค่าเท่าไร เช่น

ถ้า Op-amp ตัวหนึ่งมีค่า GB = 100 MHz ถูกเอาไปใช้ในวงขยายและออกแบบให้วงจรขยายนั้นมี Gain = 100 จะสามารถทราบได้ว่าวงจรขยายนั้นจะมี Bandwidth = GB/Gain = 100MHz/100 = 1MHz

Common-Rejection Ratio: CMRR

CMRR เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของออปแอมป์ที่ได้มาจากภาคอินพุต ที่เป็นดิฟเฟอร์เรนเชียลแอมป์ หมายความว่าหากสัญญาณที่เข้ามายังขั้วอินพุตทั้งสองมีเฟสตรงกันขนาดเท่ากัน ส่วนสัญญาณแบบนี้เรียกว่าอยู่ในคอมมอนโหมด ส่วนสัญญาณที่มีขนาดต่างกันหรือมีเฟสแตกต่างกันจะเรียกว่าอยู่ในดิฟเฟอเรนเชียลโหมด



รูปที่ 21

$$CMRR = \frac{A_D}{A_{CM}}$$

A_D = Differential Gain, A_{CM}= Common-Mode Gain

ค่า CMRR ของออปแอมป์ยิ่งมีค่าสูงเท่าไร หมายความว่าสัญญาณรบกวนจะถูกกำจัดมากขึ้นเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

[1] มนตรี ศิริปรัชญานันท์. เอกสารประกอบการสอนวิชา 222210 การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.

[2] Clayton, George Burbridge. Operational Amplifiers, 2nd ed. Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1979.

[3] Dostál, Jirí. Operational amplifiers. (Studies in electrical and electronic engineering; v. 4). Elsevier scientific publishing company, 1981.

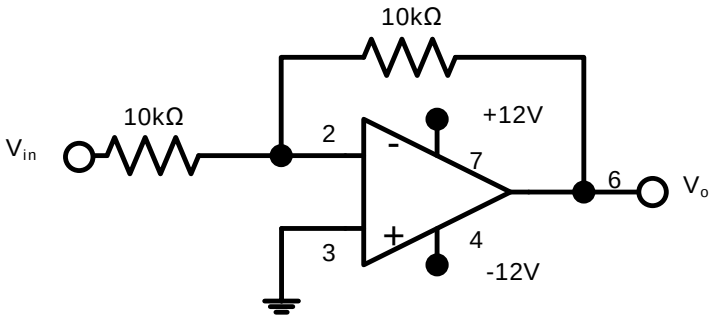
[4] Stata, Ray. User's Guide to Applying and Measuring Operational Amplifier Specifications (AN – 356 Application Note). Analog Devices.

[5] Ramakant A. Gayakwad , Op-Amps and Linear Integrated Circuits, Prentice Hall International Edition, 4th Edition, 2000.

<u>การทดลอง</u>

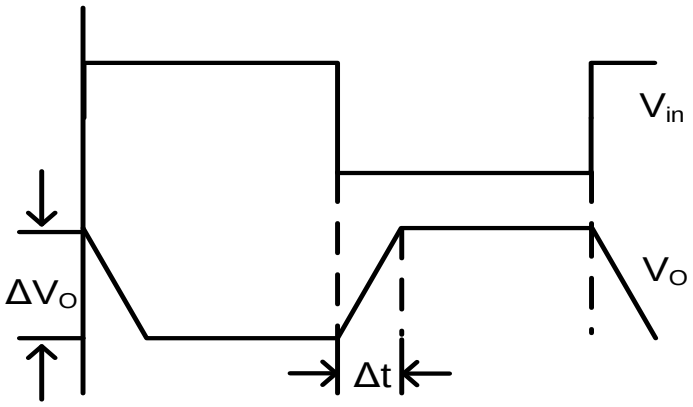
ตอนที่ 1 อัตราสลูว์

1.1 วัดค่าอัตราสลูว์ (Slew Rate)



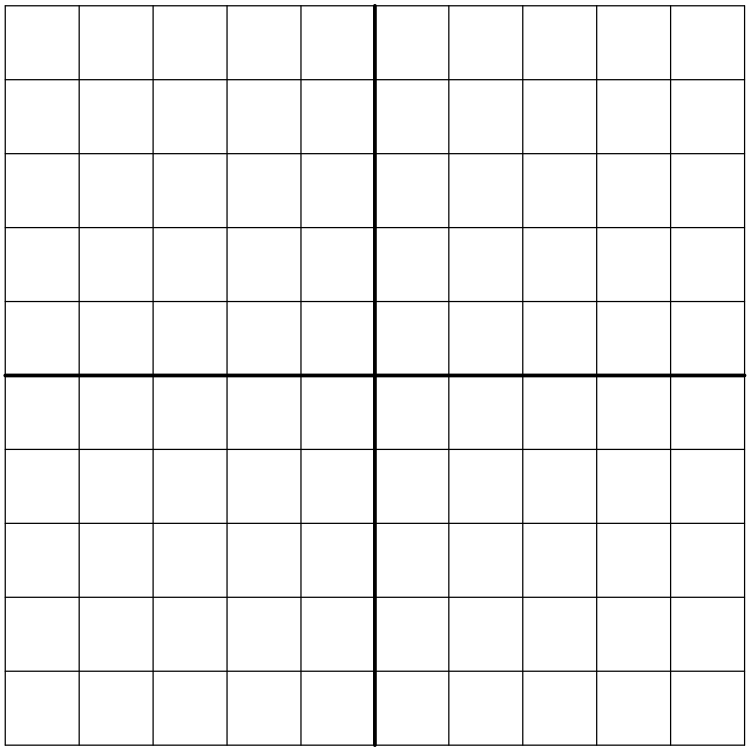
รูปที่ 22

1.2 ต่อวงจรตามรูปที่ 22**22** โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ที่ V_{in} ป้อน Square Wave ความถี่ 10 kHz, Amplitude = 5 V_{pp}



รูปที่ 23

1.3 สังเกต V_{in} และ V_o ที่ Oscilloscope บันทึก Wave Form V_{in} และ V_o ลงในกราฟ



CH_1 ..... V/Div

CH_2 ..... V/Div

Time Base.....s/Div

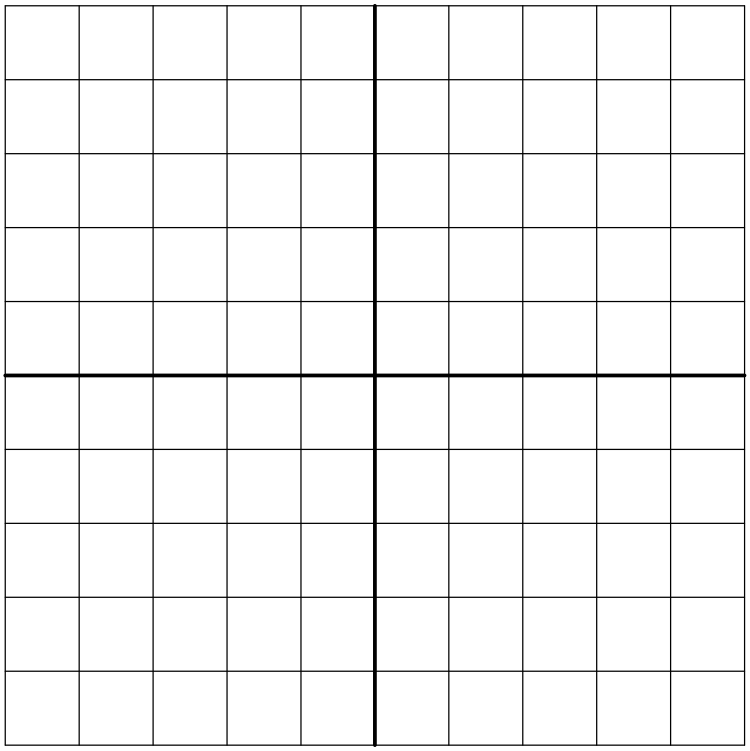
1.4 วัดค่า V_{p-p} OUTPUT และคำนวณค่า ΔV_O , ΔV_O = ... V_{pp}

1.5 วัดค่า ΔT ของ V_O และบันทึกค่า ΔT , ΔT = ... μS

1.6 จาก ΔV และ ΔT ที่วัดได้คำนวณหาค่า Slew rate $= \Delta V / \Delta T$

Slew rate = ... $V / \mu S$

1.7 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF 351 ทดลองซ้ำข้อ 1.3 – 1.6



CH_1 ..... V/Div

CH_2 ..... V/Div

Time Base.....s/Div

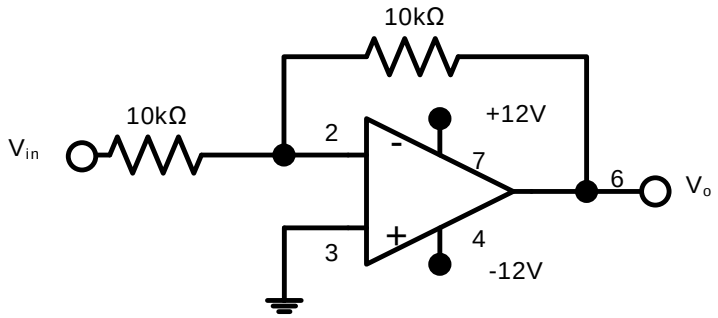
ΔV_O = ... $V_{p\text{-}p}$, ΔT = ... μS

Slew rate = ... $V/\mu S$

1.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data sheet

.....

ตอนที่ 2 Gain Bandwidth Product



รูปที่ 24 วงจรที่ใช้สำหรับหา Gain Bandwidth Product

2.1 ต่อวงจรตาม รูปที่ 24 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741

2.2 ป้อน V_{in} เป็น Sine wave ที่ความถี่ประมาณ 20 kHz ปรับให้มีขนาดสูงสุดโดยแรงดัน output ยังคงเป็น Sine wave อยู่ แล้วเปลี่ยนความถี่ตามตารางที่ 1 วัดค่าแรงดัน V_o และอัตราขยาย $A_v = V_o / V_{in}$

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 2 ของออปแอมป์เบอร์ 741

ความถี่ (f) (Hz)	แรงดัน input (V_{in}) (V_{pp})	แรงดัน output (V_o) (V_{pp})	A_v อัตราขยายแรงดัน
1			
2			
5			
7			
10			
20			
50			
70			
100			
1k			
2k			
5k			
7k			
10k			
20k			
50k			
70k			
100k			
200k			
500k			
700k			
1M			
2M			

2.3 นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ A_v ลงบนกราฟ Semilog โดยให้แกนนอนเป็นความถี่

2.4 อ่านค่า GB = ช่วงที่ A_v มีค่าประมาณ 1 ได้ GB = …… MHz

2.5 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF 351 ทดลองซ้ำข้อ 2.2 บันทึกค่าลงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 2 ของออปแอมป์เบอร์ LF 351

ความถี่ (f) (Hz)	แรงดัน input (V_{in}) (V_{pp})	แรงดัน output (V_o) (V_{pp})	อัตราขยายแรงดัน (A_V)
1			
2			
5			
7			
10			
20			
50			
70			
100			
1k			
2k			
5k			
7k			
10k			
20k			
50k			
70k			
100k			
100k			
200k			
500k			
700k			
1M			
2M			
3M			
4M			
5M			

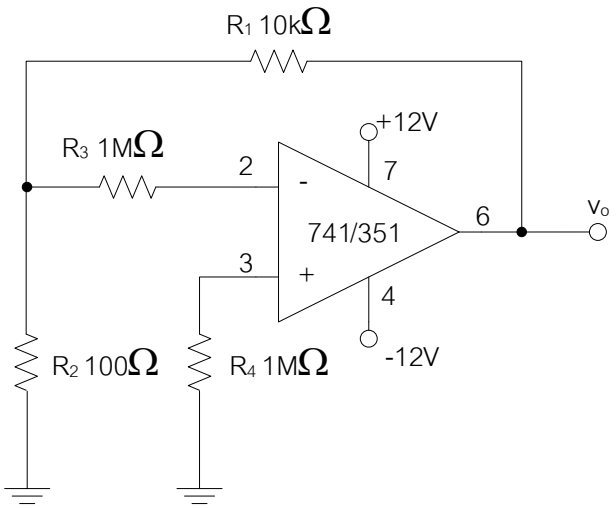
2.6 นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ A_V ลงบนกราฟ Semilog

2.7 อ่านค่า GB = ช่วงที่ A_V มีค่าประมาณ 1 ได้ GB = …… MHz

2.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับที่ระบุใน Data Sheet

……

ตอนที่ 3 Input Offset Voltage, Input Offset Current และ Input Bias Current



รูปที่ 25 วงจรที่ใช้สำหรับหา Input Offset Voltage, Input Offset Current **และ** Input Bias Current

3.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 25ูปที่ 25 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 จ่ายแรงดัน Supply ให้ออปแอมป์ทำงาน 2 – 5 นาทีก่อนทำการทดลอง

3.2 ลัดวงจร R_3 และ R_4 วัดแรงดัน v_O คำนวณหาค่าแรงดันอินพุตออฟเซ็ท (V_{IO})จาก

$$v_o = \left[1 + \frac{R_1}{R_2}\right] V_{IO}$$

บันทึกค่าลงในตารางที่ 3

3.3 วัดแรงดัน V_O โดยไม่ต้องลัดวงจรตัวต้านทาน คำนวณหาค่ากระแสอินพุตออฟเซ็ท (I_{IO}) จาก

$$v_o = \left[1 + \frac{R_1}{R_2}\right] [V_{IO} - I_{IO} R_3]$$

ใช้ค่า V_{ios} จากข้อ 3.2 บันทึกค่าลงในตารางที่ 3

3.4 ลัดวงจร R_3 วัดแรงดัน V_O คำนวณหาค่า $I_{(+)}$ จาก

$$v_o = \left[1 + \frac{R_1}{R_2}\right] [V_{IO} - I_{(+)} R_4]$$

ใช้ค่า V_{ios} จากข้อ 3.2

3.5 ลัดวงจร R_4วัดแรงดัน V_O คำนวณหาค่า $I_{(-)}$ จาก

$$v_o = \left[1 + \frac{R_1}{R_2}\right] [V_{IO} + I_{(-)} R_3]$$

ใช้ค่า V_{ios} จากข้อ 3.2

3.6 คำนวณหาค่ากระแสอินพุตไบแอส (I_B) จาก

$$I_B = \frac{|I_{(-)} + I_{(+)}|}{2}$$

บันทึกค่าลงในตารางที่ 3

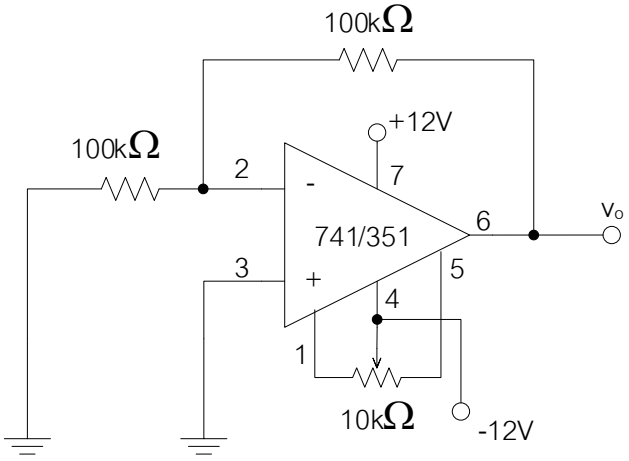
3.7 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF 351 แล้วทดลองซ้ำข้อ 3.1 – 3.6

3.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data หheet

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 3

	V_{IO}		I_{IO}		I_{IB}	
	Datasheet	ทดลอง	Datasheet	ทดลอง	Datasheet	ทดลอง
741						
351						

ตอนที่ 4 Offset Voltage Adjustment Range



รูปที่ 26 วงจรสำหรับปรับ Offset Voltage

4.1 ต่อวงจรตาม รูปที่ 25ูปที่ รูปที่ 2626 ใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ซึ่งกำหนดให้วงจรมีอัตราขยายเท่ากับ – 1

4.2 วัดแรงดัน v_o แล้วทำการปรับ VR (Variable Resistor) จนแรงดัน v_o เป็น 0 สามารถทำได้หรือไม่ <u>เพราะเหตุใด</u>

……

……

4.3 เปลี่ยนอัตราขยายเป็น – 100 (เปลี่ยนความต้านทานที่อยู่ระหว่างขา 2 กับกราวด์เป็น 1kΩ) วัดแรงดัน v_o แล้วทำการปรับ Potentiometer จนแรงดัน v_o เป็น 0 สามารถทำได้หรือไม่ <u>เพราะเหตุใด</u>

……

……

4.4 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF351 แล้วทดลองซ้ำตามข้อที่ 4.1-4.3

……

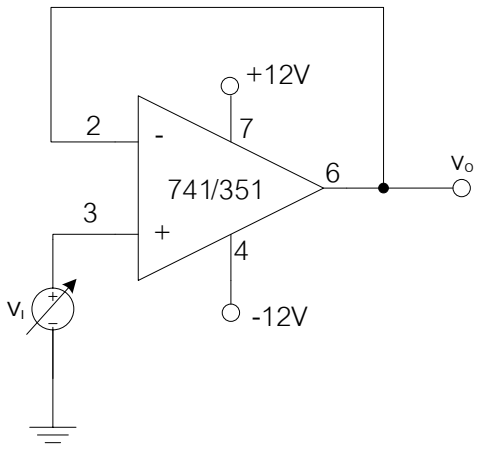
……

4.5 จากรูปที่ 27 ถ้าทำการต่อวงจรโดยที่ไม่กำหนดอัตราขยายให้กับออปแอมป์ (ต่อขาอินพุตทั้งสองลงกราวด์) ก่อนทำการปรับ Offset Voltage จะสามารถปรับค่า Offset Voltage (ปรับจนแรงดัน u_o เป็น 0) ได้หรือไม่ <u>เพราะอะไร</u>

……

……

ตอนที่ 5 Input Voltage Range



รูปที่ 27 วงจรที่ใช้สำหรับวัดหา Input Voltage Range

5.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 27 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ uA741 และปรับ v_i ไว้ที่แรงดันต่ำ ๆ

5.2 ทำการปรับแรงดัน v_i วัดแรงดัน v_i ก่อนที่แรงดัน v_o อิ่มตัว

แรงดันอินพุตทางด้านบวกมีค่า = …….. V

5.3 เปลี่ยน v_i เป็นค่าลบแล้วทำการปรับแรงดัน v_i วัดแรงดัน U_i ก่อนที่แรงดัน v_o อิ่มตัว

แรงดันอินพุตทางด้านลบมีค่า = …….. V

5.4 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF 351 ทดลองซ้ำข้อ 4.2 – 4.3

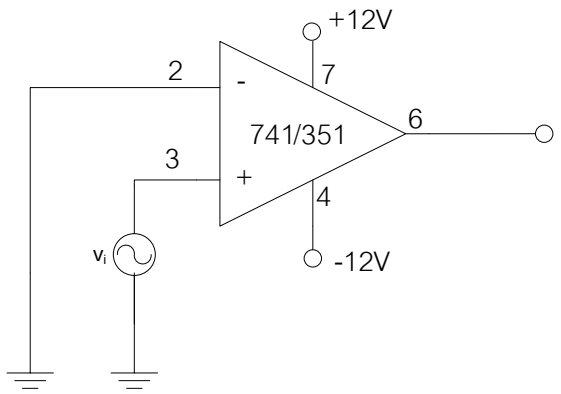
แรงดันอินพุตทางด้านบวกมีค่า = …….. V

แรงดันอินพุตทางด้านลบมีค่า = …….. V

5.5 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

……

ตอนที่ 6 Output Voltage Swing



รูปที่ 28 วงจรที่ใช้สำหรับวัดหา Output Voltage Swing

6.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 28 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ป้อน v_i sine 5 V_{pp} 1kHz วัดแรงดัน $+V_{sat}$และ $-V_{sat}$

6.2 วัดแรงดัน $+v_{sat}$ (ค่าสูงสุดด้านบวก) และ $-v_{sat}$ (ค่าสูงสุดด้านลบ)

$+v_{sat}$ = ……. V

$-v_{sat}$ = ……. V

6.3 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF351 ทดลองซ้ำข้อ 6.2

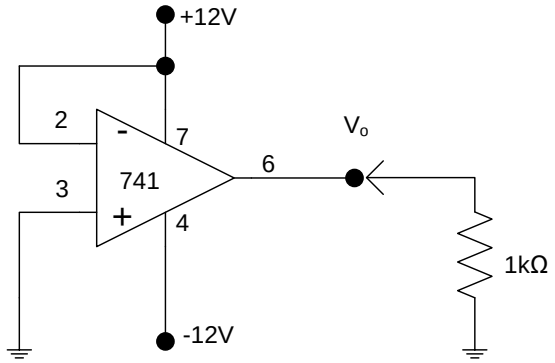
$+v_{sat}$ = ……. V

$-v_{sat}$ = ……. V

6.6 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

……

ตอนที่ 7 วัดค่า Output Impedance



รูปที่ 29

7.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 29 และป้อน $V_{cc} = \pm 12V$ เพื่อให้ Bias กับ Op-amp

7.2 ปลด R1 kΩ ออก ใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดัน V_O (DC) ที่ขา 6 กับ GND. V_O =……V

7.3 ต่อ R1 kΩ เข้าที่ขา 6 เทียบกับ GND ใช้โวลท์มิเตอร์วัดแรงดัน (DC) เอาต์พุต ที่ขา 6 กับ GND อีกครั้งหนึ่ง V_O เมื่อต่อ R1 kΩ = ...V

7.4 ผลต่างของแรงดันทั้ง 2 ครั้ง.....…V

ตามหลักการ Voltage Divider (อธิบายให้ฟังแล้ว)

∴ คำนวณค่าความต้านทานในตัว OP-AMP ทางด้านเอาต์พุต =……..Ω

∴ Output Impedance = …….. Ω

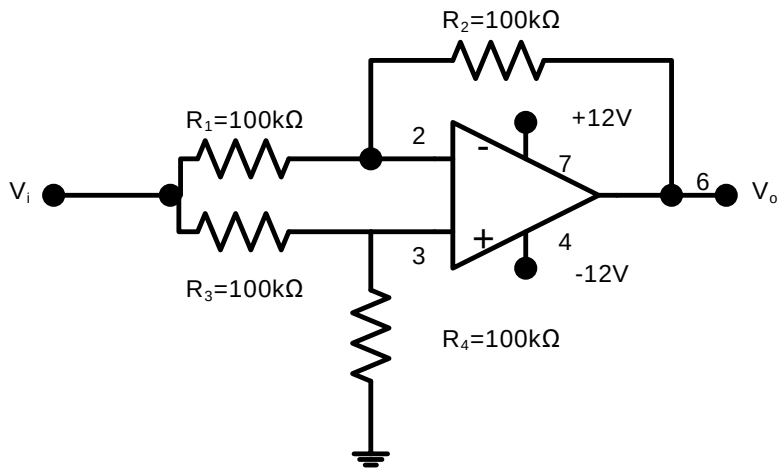
7.5 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF351 ทดลองซ้ำข้อ 7.1- 7.4

- ปลด R1 kΩ ออก ใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดัน V_O (DC) ที่ขา 6 กับ GND. V_O =……V

- ต่อ R1 kΩ เข้าที่ขา 6 เทียบกับ GND ใช้โวลท์มิเตอร์วัดแรงดัน (DC) เอาต์พุต ที่ขา 6 กับ GND V_O เมื่อต่อ R1 kΩ = ...V

- Output Impedance = …….. Ω

ตอนที่ 8 หาค่า Common-Mode Rejection Ratio [CMRR]



รูปที่ 30

สูตรการคำนวณเบื้องต้น Differential Gain $= A_d = R_2/R_1 = R_4/R_3$

Common-Mode Gain $= A_{cm} = v_o/v_i$

Common-Mode Rejection Ratio = CMRR (dB) = $20 \log(A_d/A_{cm})$

8.1 ต่อวงจรตาม รูปที่ 25ูปที่ **30** ป้อนไฟ $V_{cc} = \pm 12V$ และป้อน v_i เป็น Sine Wave ความถี่ 100 Hz

8.2 ปรับค่า Amplitude ของ v_i โดยใช้โวลท์มิเตอร์วัด v_o อย่างน้อยที่สุด 2 V_{rms}

8.3 วัดค่า v_o โดยใช้ AC โวลท์มิเตอร์

v_o = ... V_{rms}

10.4 คำนวณค่า Common Mode Gain

$A_{cm} = v_o/v_i$

A_{cm} = ...

คำนวณค่า CMRR ของวงจร

Ad = R_2/R_1 = ...

CMRR = ...dB

8.5 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF351 ทดลองซ้ำข้อ 8.1- 8.4

A_{cm} = ...

Ad = R_2/R_1 = ...

CMRR = ……dB

8.6 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับที่ระบุใน Data Sheet

……

<u>คำถามท้ายการทดลอง</u>

1. วิเคราะห์ผลการทดลองค่า PARAMETER ต่าง ๆ ของ OP-AMP เบอร์ $\mu A741$ และ LF351 เปรียบเทียบกับข้อมูลจาก Datasheet ของ OP-AMP เบอร์นี้ว่าค่าแต่ละค่าที่ทดลองนั้นอยู่ในพิกัด (Rated) ของมันหรือไม่ ถ้าไม่ถูกต้องตามพิกัด จงให้เหตุผลของสิ่งที่ผิดพลาด

<u>วิเคราะห์ผลการทดลอง</u>

<u>สรุปผลการทดลอง</u>