การทดลองที่ 1 Non Ideal Op – Amps Parameters

วัตถุประสงค์

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

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

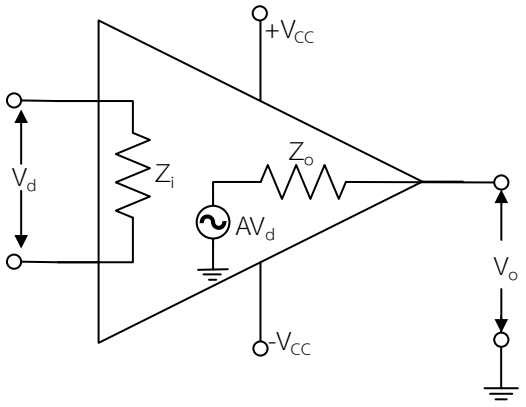
1. ออปแอมป์เบอร์ uA741 1 ตัว
2. ออปแอมป์เบอร์ LF351 1 ตัว
3. มัลติมิเตอร์ 1 เครื่อง
4. ออสซิลโลสโคป 1 เครื่อง
5. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ 1 เครื่อง
6. แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง 1 เครื่อง
7. ตัวเก็บประจุ 1nF
8. ตัวต้านทาน 100Ωx2, 1MΩx2, 10kΩx3,100kΩx4, 1kΩ 1 ชุด
9. ความต้านทานปรับค่าได้ $10k\Omega$,$100k\Omega$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

ทฤษฎี

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



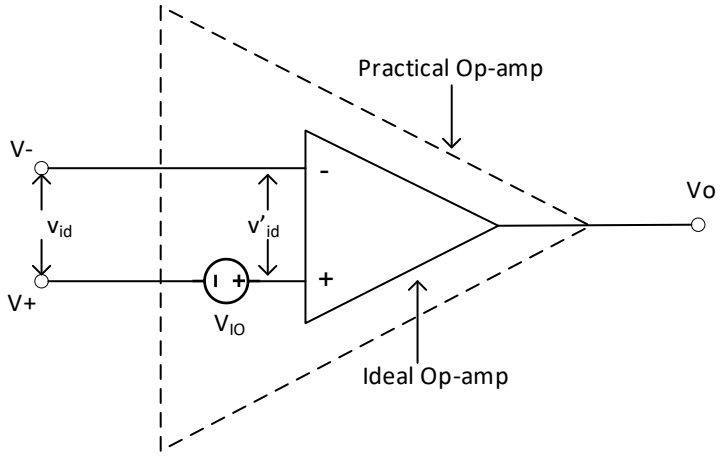
รูปที่ 1 แสดงวงจรเสมือนของออปแอมป์

Input Offset Voltage: V_{IO}

Input offset Voltage (V_{IO}) เป็นแรงดันระหว่างอินพุตทั้ง 2 ของออปแอมป์ซึ่งมีผลเนื่องมาจากการความไม่สมพงษ์ (Mismatch) กันของแรงดันไบแอสระหว่างขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่ภาคอินพุตขยายผลต่างของตัวออปแอมป์ ดังนั้น หากไม่มีแรงดันอินพุตจะมีแรงดันเอาต์พุตออกมาค่าหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่า Input offset Voltage (V_{IO}) คือขนาดของแรงดันที่ระหว่างขาอินพุตของออปแอมป์ที่ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต (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

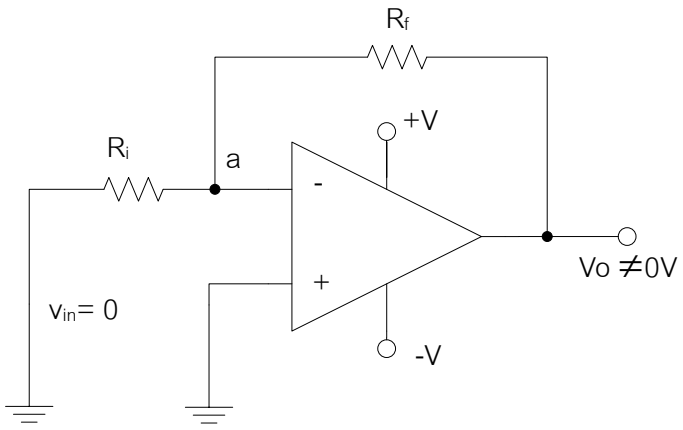
ในทางอุดมคติมีค่าเท่ากับ 0 Ω แต่ในทางปฏิบัติค่านี้อาจมีค่าได้ถึงหลายร้อยโอห์มสำหรับออปแอมป์ เบอร์ 741 จะมีค่าประมาณ 75 Ω ส่วนออปแอมป์เบอร์อื่น ๆ จะมีค่าแตกต่างกันออกไป

Output Voltage Swing: V_{OM}

คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตได้สูงที่สุดไม่เกินค่าค่าหนึ่งซึ่งมักจะมีค่าไม่เกินแรงดัน Supply

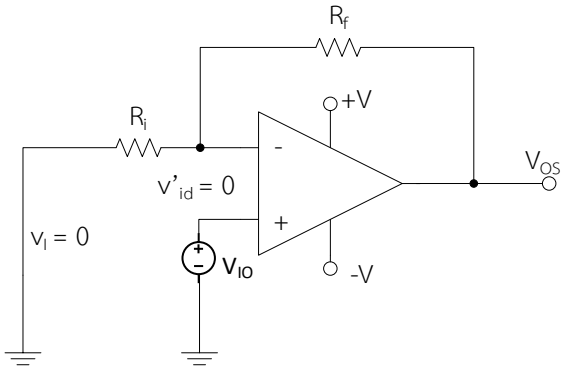
Output Offset Voltage: V_{OS}

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

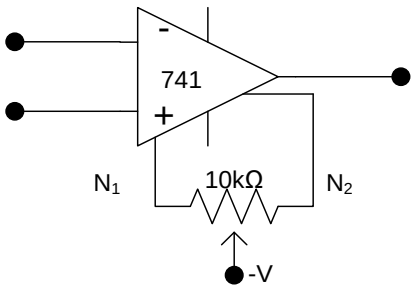
$$I_{(-)} = I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2}$$

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

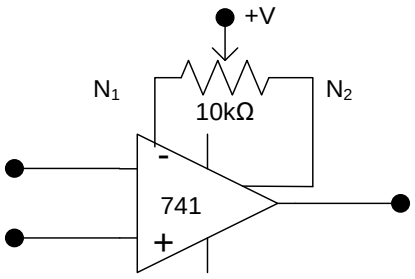
$$I_{(+)} = I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2}$$

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

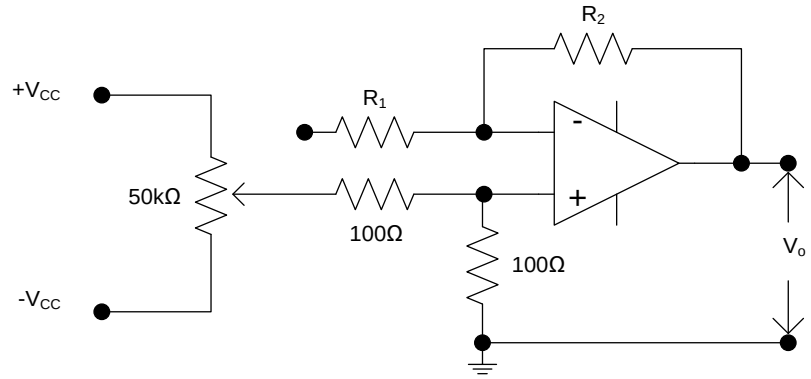


รูปที่ 2

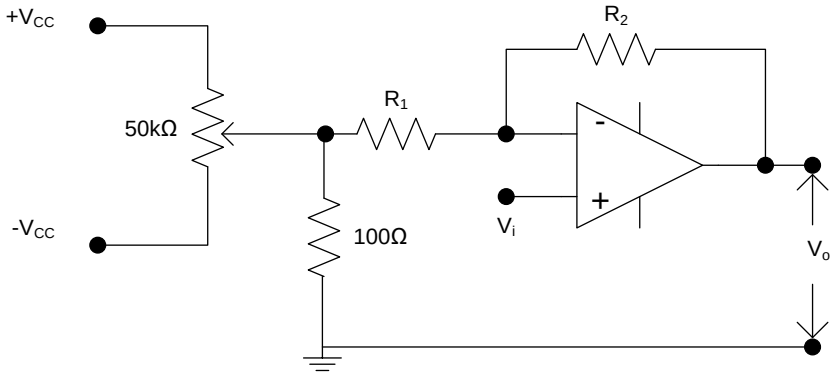


รูปที่ 3

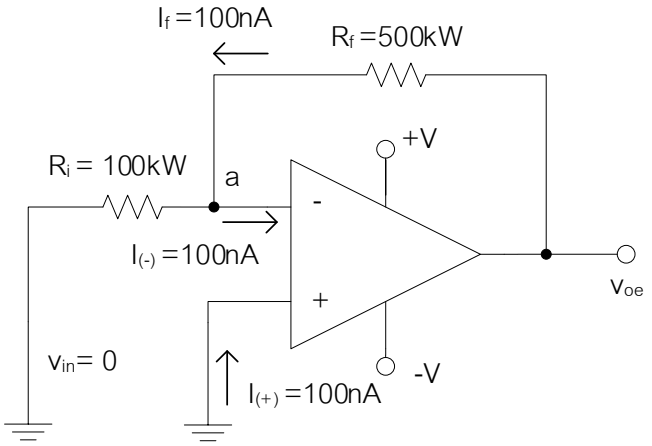
ออปแอมป์แต่ละเบอร์นั้นใช้ค่าความต้านทานแตกต่างกันไปตามรูปที่ 2 และรูปที่ 26 สำหรับ 741 จะมี Offset Voltage Adjustment Range ±15mV เมื่อใช้ POT ขนาด 10k โดย การปรับศูนย์ (Null Adjustment) คือการปรับแรงดันออฟเซ็ตด้วยการป้อนไฟตรงค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งชดเชยให้กับอินพุต (ขา+ หรือขา- ก็ได้) เพื่อให้แรงดันเอาท์พุตเท่ากับศูนย์



รูปที่ 4 การปรับแรงดันออฟเซ็ตทางขาอินพุต + ในกรณีที่ป้อนขาสัญญาณอินพุต V_i ที่ขาอินพุต –



รูปที่ 5 การปรับแรงดันออฟเซ็ตทางขาอินพุต - ในกรณีที่ป้อนขาสัญญาณอินพุต V_i ที่ขาอินพุต +



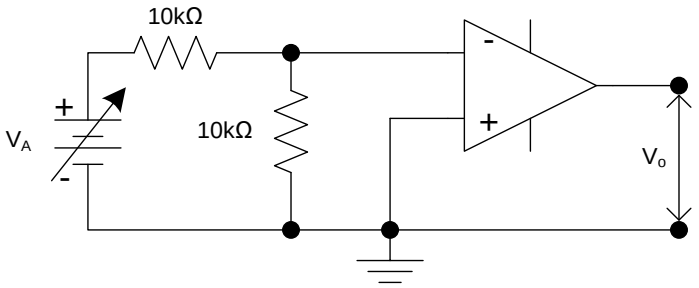
รูปที่ 6 แสดงการคำนวณเพื่อหาค่า Output Error Voltage ของวงจรขยายแบบกลับเฟส

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

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

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

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



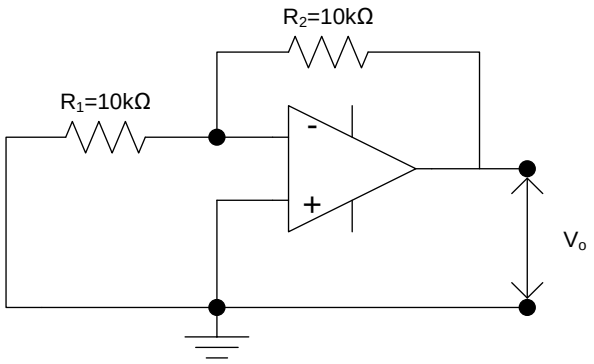
รูปที่ 7

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 $R_2/R_1 << A_O$

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

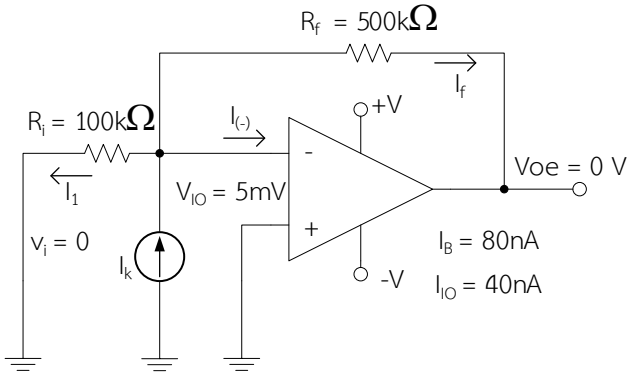
เมื่อ A_O = Open-loop Gain

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

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

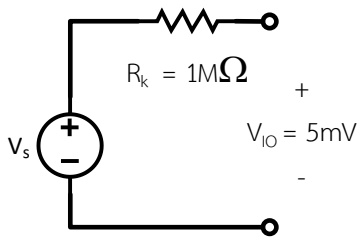
$$I_{(-)} = I_B + \frac{I_{IO}}{2} = 80\text{nA} + \frac{40\text{nA}}{2} = 100\text{nA}$$

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

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

ดังนั้น $\mathrm{I_k = 100nA + 50nA + 10nA = 160nA}$

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



รูปที่ 10 เงื่อนไขของการสร้างวงจรแหล่งจ่ายกระแส

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

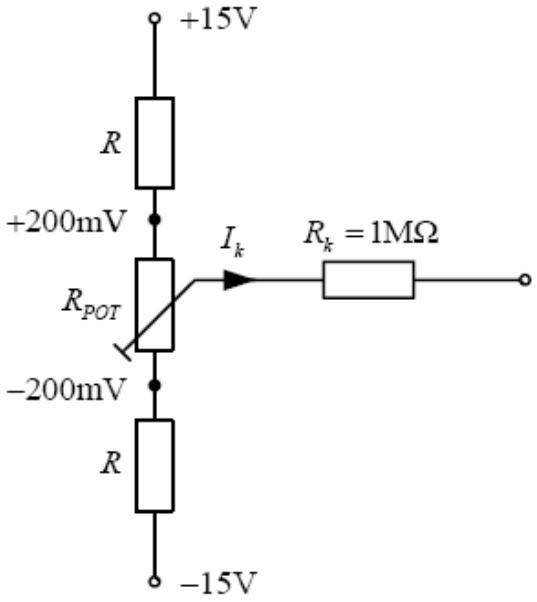
เมื่อ $\mathrm{V_{IO} = 5mV}$

$\mathrm{R_k = 1M\Omega}$

$\mathrm{I_k = 160nA}$

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

แต่เพื่อให้วงจรนี้อยู่ในพิกัดความเพื่อที่สามารถควบคุมได้ดังนั้นแรงดัน V_S ควรปรับค่าได้ในช่วง ±200mV ดังนั้นเราจะได้วงจรแหล่งจ่ายกระแสดังต่อไปนี้



รูปที่ 11 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้งานในทางปฏิบัติ

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

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

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

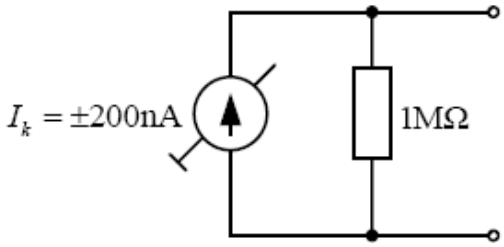
แต่เลือกใช้ค่าความต้านทาน $R_{POT} = 100\Omega$

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

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

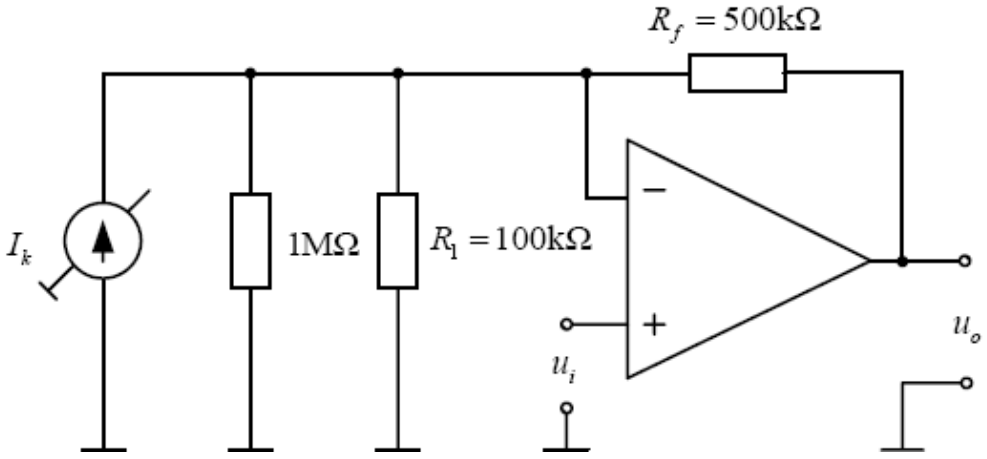
$$R = 2950\Omega \cong 3k\Omega$$

เพราะฉะนั้นจะได้วงจรเทียบเคียงของแหล่งจ่ายกระแสดังต่อไปนี้



รูปที่ 12 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายกระแส

ซึ่งหากพิจารณาวงจรเทียบเคียงที่ได้หากเรานำวงที่ได้ไปต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส นั้นจะเห็นได้ว่า R_k ของแหล่งจ่ายกระแสจะไปขนานกับ R_1 ของวงจร ดังนั้นค่า R_1 ในวงจรจะเปลี่ยนไปทำให้อัตราขยายของวงจรเปลี่ยนแปลงไปด้วย

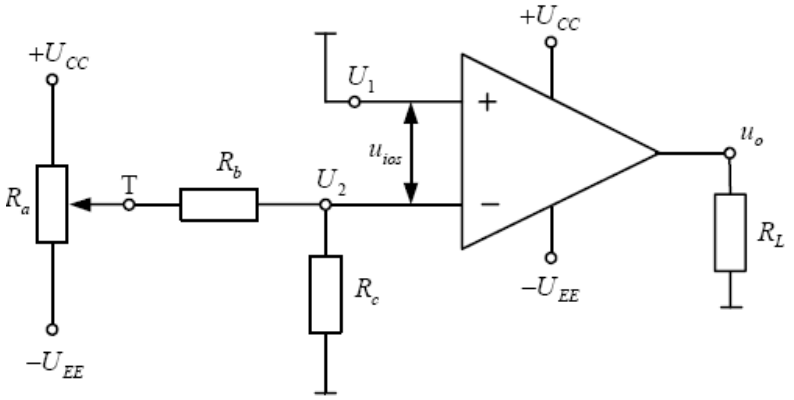


รูปที่ 13 ลักษณะสมบัติของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสเมื่อชดเชย Offset ด้วยแหล่งจ่ายกระแส

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 คือ แรงดันที่ขาอินพุตไม่กลับเฟส U_2 เราสามารถทำให้แรงดันที่ U_2 เท่ากับ U_1 ได้โดยการปรับ R_a นั่นคือ u_{ios} สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้ และเป็นผลให้ u_o มีค่าเป็นศูนย์ด้วย

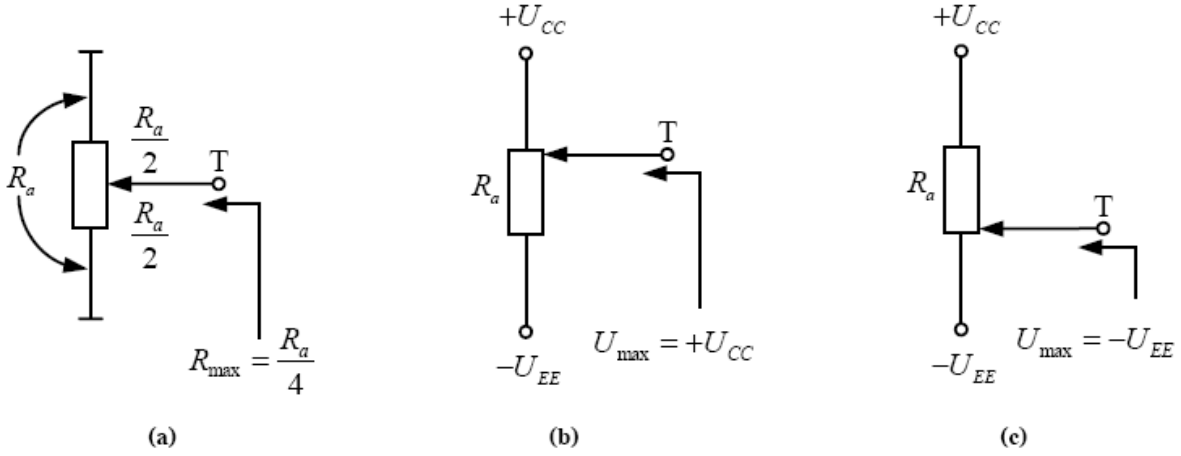


รูปที่ 14 การต่อ Offset Voltage Compensating Network **เข้ากับออปแอมป์**

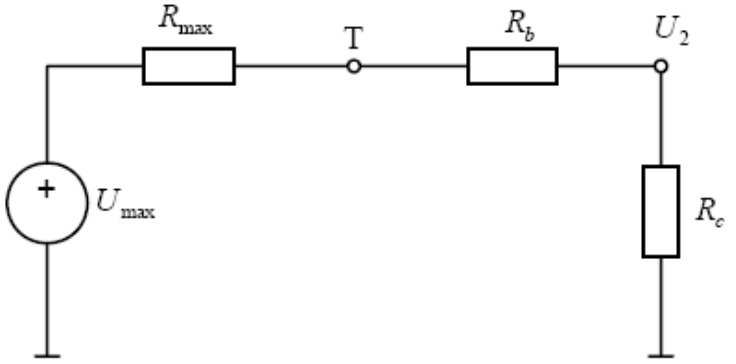
ตัวอย่างเช่น สมมติให้ u_o มีค่าเป็นบวก ซึ่งบอกเป็นนัยว่า $U_1 > U_2$ กรณีนี้หมายความว่า U_2 ควรถูกเพิ่มจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ U_1 ซึ่งสามารถเพิ่มได้โดยการปรับ R_a ไปทาง $+U_{CC}$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้า u_o มีค่าเป็นลบ ก็แสดงว่า $U_2 > U_1$ จากนั้นจึงทำการปรับ R_a ไปทาง $-U_{EE}$ จนกระทั่ง u_o ลดลงจนเป็นศูนย์

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

ดังนั้น $$R_b = 10\frac{R_a}{4}$$

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

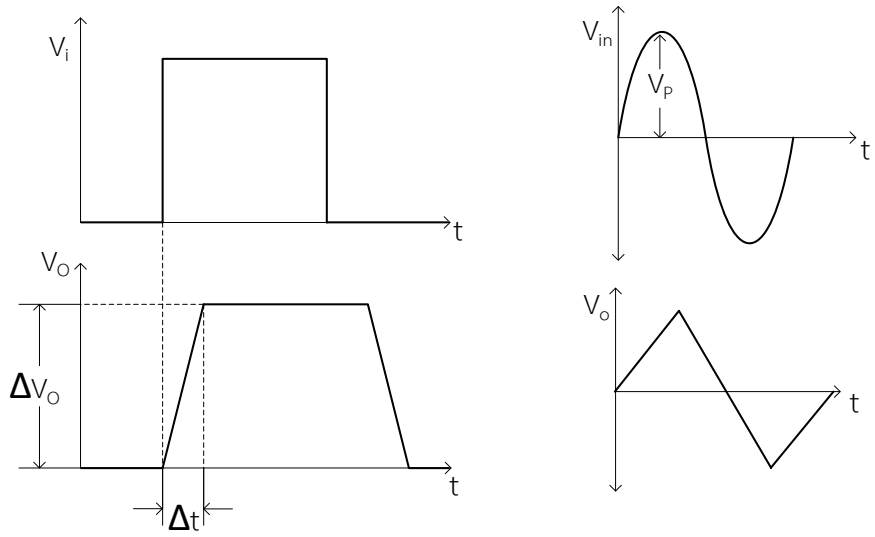
ถ้าไม่มี Potentiometer ค่า 4kΩ เราอาจใช้ค่าที่น้อยกว่าได้ เช่น 3kΩ ทั้งนี้เนื่องจาก เงื่อนไข คือ $R_b = 10R_{max}$ เมื่อ $R_{max} = \frac{R_a}{4}$ ดังนั้นถ้าเลือกใช้ R_a = 3kΩ จะยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

Slew Rate: SR

เป็นอัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่อเวลา มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อวินาที สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดัง**Error! 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



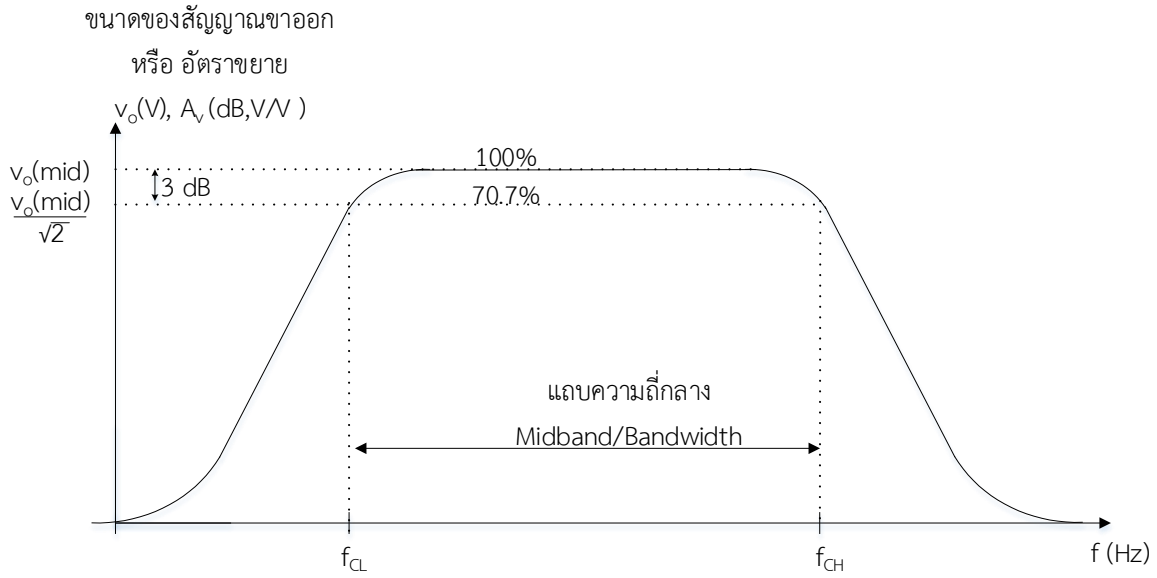
รูปที่ 16 ผลของการสลูว์สำหรับสัญญาณสี่เหลี่ยมและไซน์

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

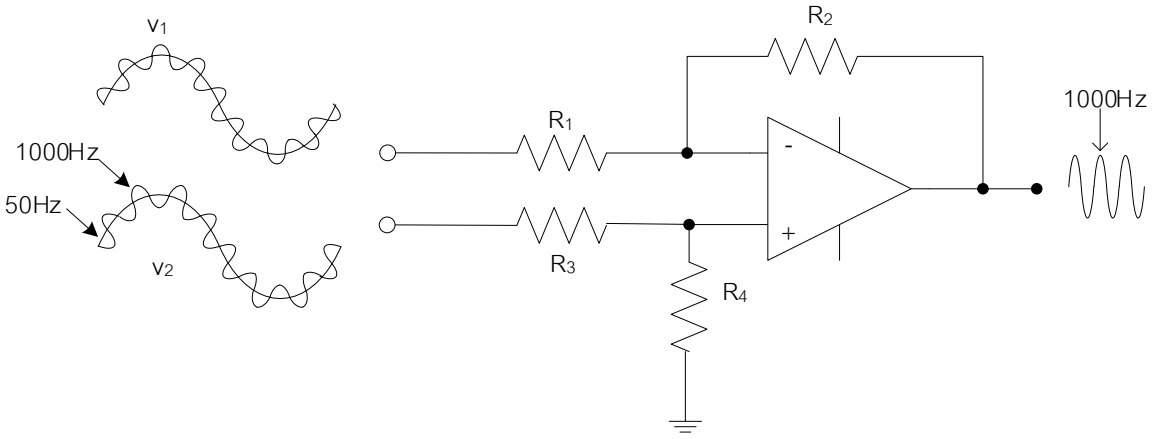
ในวงจรขยายทุกวงจรจะมีจุดคัทออฟความถี่สูงเสมอ แต่บางจะสามารถตอบสนองความถี่ต่ำมากๆได้จะถึงกระแสตรง (0 Hz)

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.

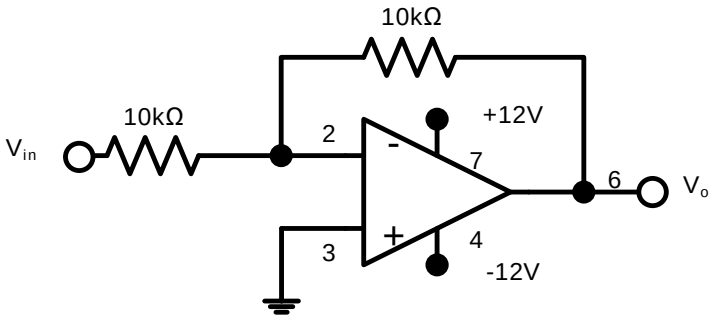
[4] Stata, Ray. User's Guide to Applying and Measuring Operational Amplifier Specifications (AN – 356 Application Note). Analog Devices.

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

การทดลอง

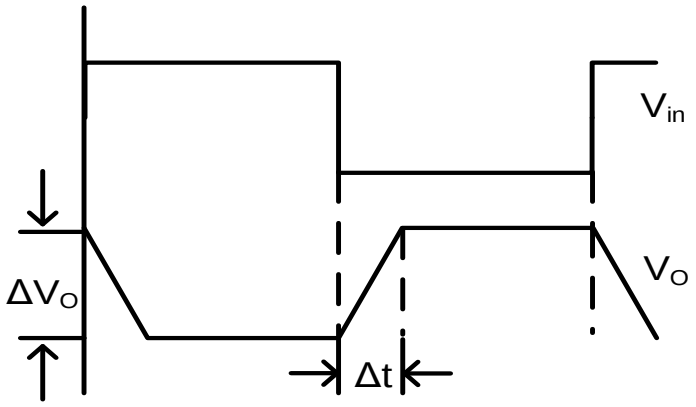
ตอนที่ 1 อัตราสลูว์

1.1 วัดค่าอัตราสลูว์ (Slew Rate)



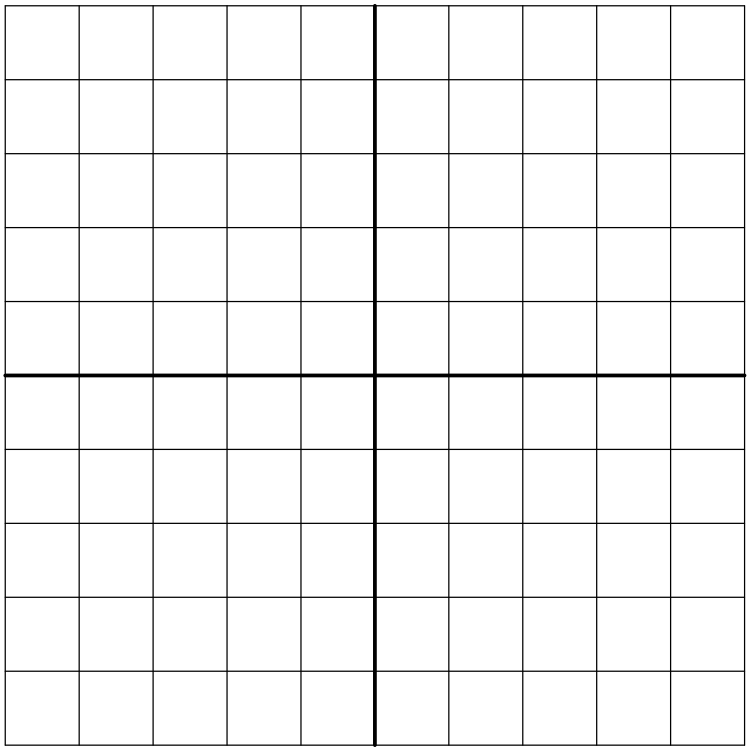
รูปที่ 22

1.2 ต่อวงจรตามรูปที่ 2222 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 ป้อนไฟเลี้ยง $V_{cc} = \pm 12V$ 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

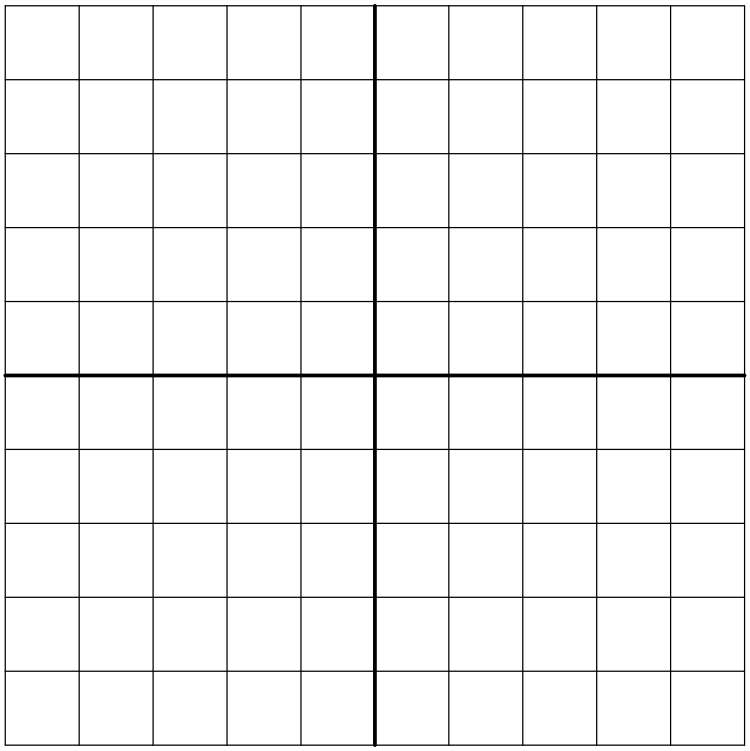
1.4 วัดค่า V_{p-p} OUTPUT และคำนวณค่า ΔV_O, ΔV_O = ... V_{pp}

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

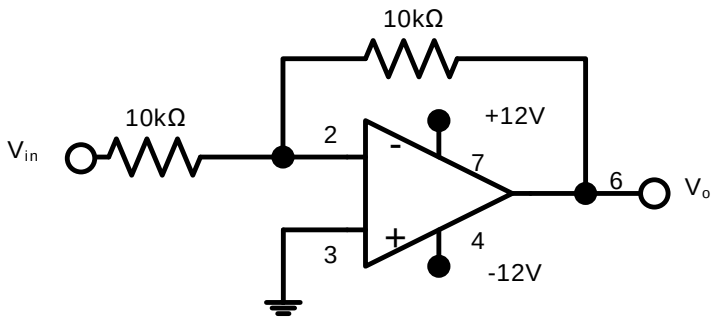
ΔV_O = ... $V_{p\text{-}p}$, ΔT = ... μS

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

1.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

.....

ตอนที่ 2 Gain Bandwidth Product



รูปที่ 24 วงจรที่ใช้สำหรับหา Gain Bandwidth Product

2.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 2424 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ 741

2.2 ป้อน V_{in} เป็น Sine wave ที่ความถี่ประมาณ 20 kHz ปรับให้มีขนาดสูงสุดโดยแรงดัน output ยังคงเป็น Sine wave อยู่ แล้วเปลี่ยนความถี่ตามตารางที่ 2 วัดค่าแรงดัน V_o และอัตราขยาย

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			

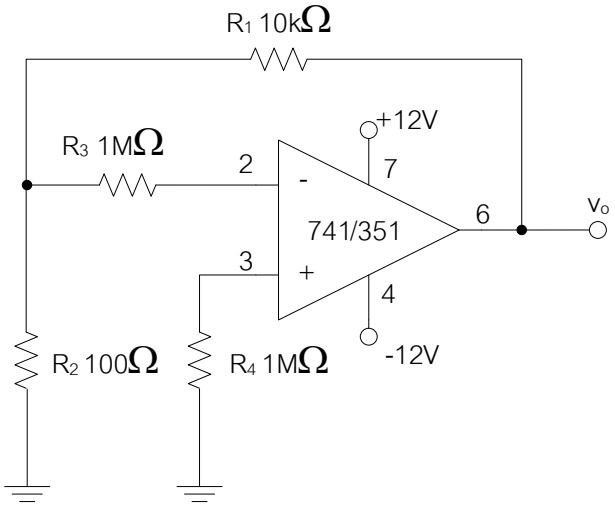
2.6 นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ Av ลงบนกราฟ Semilog

2.7 อ่านค่า GB = ช่วงที่ Av 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 2525 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

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

บันทึกค่าลงในตารางที่ 3

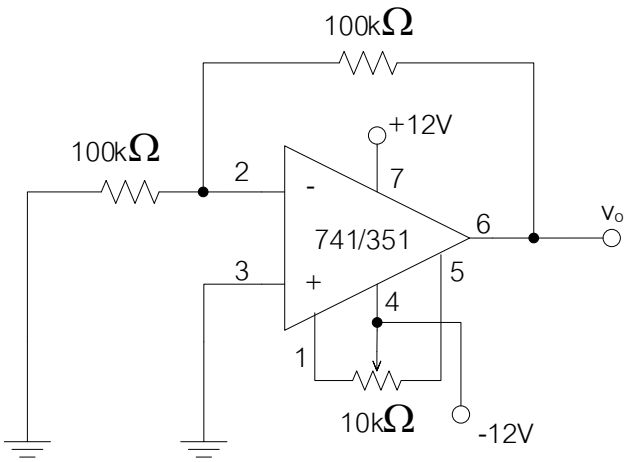
3.7 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF 351 แล้วทดลองซ้ำข้อ 3.1 – 3.6

3.8 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

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 ต่อวงจรตามรูปที่ 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

.....

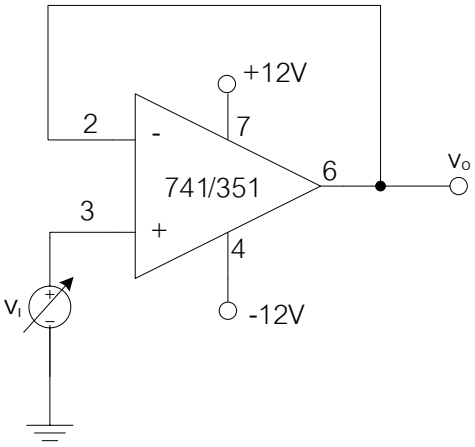
.....

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

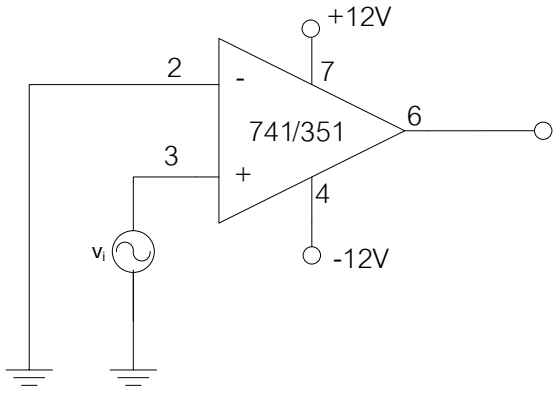
แรงดันอินพุตทางด้านบวกมีค่า = ... V

แรงดันอินพุตทางด้านลบมีค่า = ... V

5.5 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

……

ตอนที่ 6 Output Voltage Swing



รูปที่ 28 วงจรที่ใช้สำหรับวัดหา Output Voltage Swing

6.1 ต่อวงจรตามรูปที่28 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

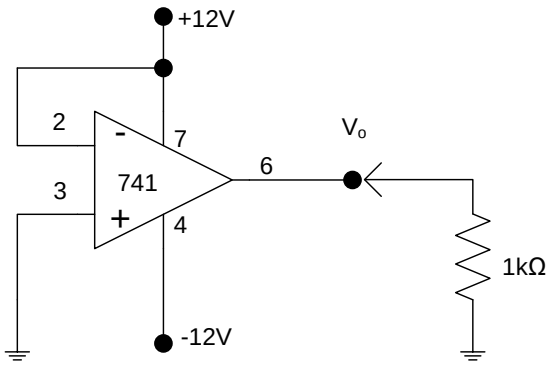
$+v_{sat}$ = ……. V

$-v_{sat}$ = ……. V

6.6 เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ระบุใน Data Sheet

……

ตอนที่ 7 วัดค่า Output Impedance



รูปที่ 29

7.1 ต่อวงจรตามรูปที่29 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

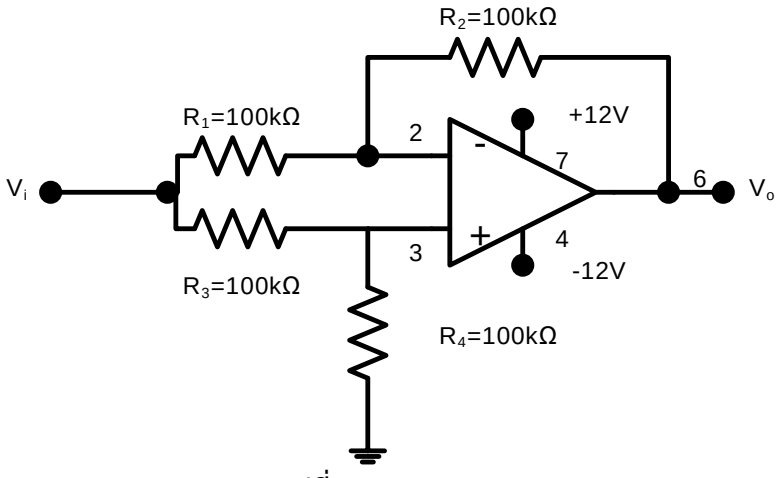
7.5 เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ LF351 ทดลองซ้ำข้อ 7.1- 7.4

- 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 ต่อวงจรตามรูปที่ 30**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

.....

คำถามท้ายการทดลอง

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

วิเคราะห์ผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง