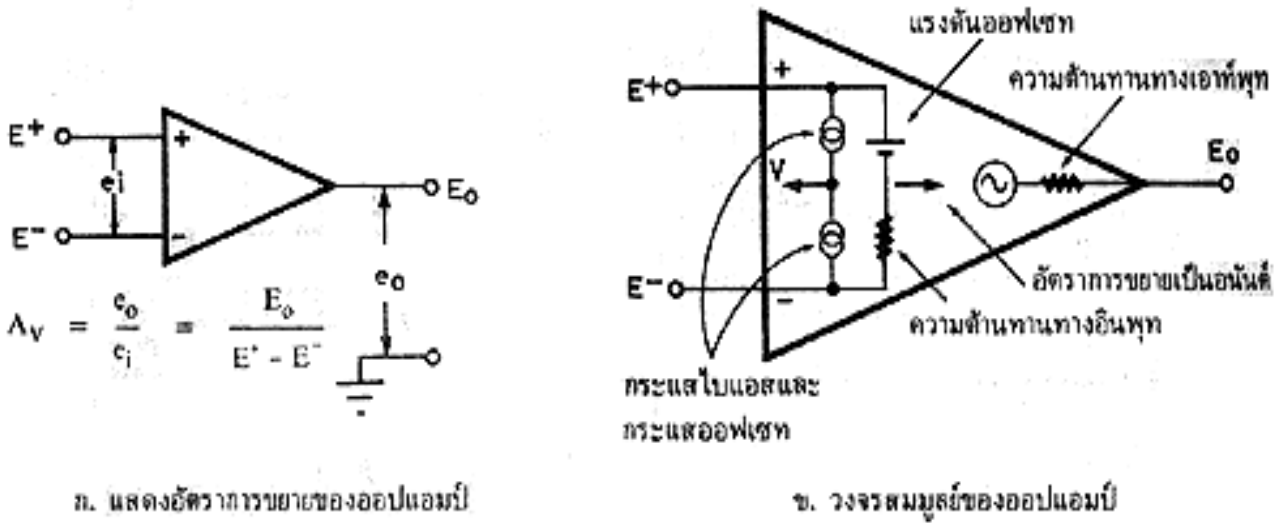
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับออปแอมป์



ก. แสดงอัตราการขยายของออปแอมป์ ข. วงจรสมมูลย์ของออปแอมป์

รูปที่ 1 แสดงการทำงานและวงจรสมมูลย์ของออปแอมป์

ออปแอมป์มีสัญลักษณ์และสัญญาณเข้าออก ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของสัญญาณเข้าและออก แสดงด้วยสูตรง่าย ๆ คือ

$$E_o = A_v (E^+ - E^-)$$

Av เป็นอัตราการขยายแรงดันซึ่งมีค่าสูงมาก จึงเป็นคุณสมบัติที่พิเศษสุดของออปแอมป์ ออปแอมป์แบบอุดมคติ จะมีคุณสมบัติตามเงื่อนไขดังนี้

1. อัตราการขยายแรงดัน สูงมากจนเป็นอนันต์
2. ความต้านทานทางอินพุต สูงมากจนเป็นอนันต์
3. ความต้านทานทางเอาท์พุท ต่ำมากจนเป็นศูนย์
4. แรงดันออฟเซททางอินพุทเป็นศูนย์
5. กระแสออฟเซททางอินพุทเป็นศูนย์
6. ลักษณะสมบัติเชิงความถี่ ขยายได้ดีตั้งแต่ไฟตรง จนความถี่สูงมากเป็นอนันต์
7. ไม่มีข้อบกพร่องอื่น ๆ

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ออปแอมป์ก็ไม่ได้มีคุณสมบัติอย่างในอุดมคติเลยทีเดียว แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ สำหรับผู้เริ่มต้น ในช่วงแรกให้ถือว่า ออปแอมป์ที่ใช้ศึกษากันต่อไปนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอุดมคติมาก

การใช้ออปแอมป์ที่เป็นอุดมคติในการออกแบบวงจรนั้น เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก หลังจากออกแบบเสร็จแล้ว จึงค่อยมาพิจารณาเงื่อนไข หรือคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ไม่เป็นอุดมคติ แล้วค่อยแก้ไขและปรับปรุงวงจรให้ดีขึ้นอีกทีหนึ่ง

อัตราการขยายแรงดัน

อัตราการขยาย Go ของวงจรออปแอมป์ ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว ตามรูป 2 จะมีสูตรทั่วไปคือ

$$G_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

แต่ในความเป็นจริงอัตราการขยายจะเป็น

$$G_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + (R_1 + R_2)/A_V}$$

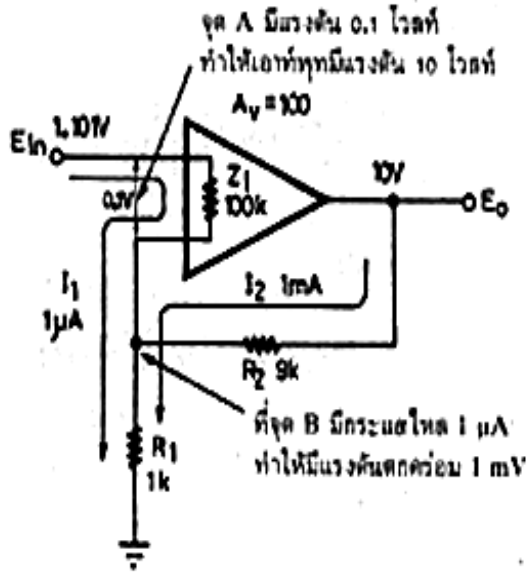
ซึ่งถ้าอัตราการขยายแรงดัน Av ของออปแอมป์มีขนาดสูงมาก ๆ แล้วเทอม (R1 +R2) /Av จะมีขนาดเล็กมาก จนเป็นศูนย์ไป จึงทำให้สูตรเหลือแต่ $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$ นั่นเอง

ความต้านทานทางอินพุท

ถ้าค่าความต้านทางอินพุทของออปแอมป์มีค่าเป็น Zi อัตราการขยายของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสเท่ากับ G จะเขียนด้วยสูตรที่ละเอียดขึ้นเป็น

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + (R_1 + R_2)/A_V + R_1R_2/A_VZ_i}$$

จากสูตรจะเห็นว่ามีเทอม เพิ่มขึ้นมา ถ้า Av มีค่ามากแล้ว จะมีค่ายิ่งมากขึ้น AvZi อีก จึงทำให้เทอมนี้มีขนาดเล็กมาก จนไม่มีผลกับค่า G เลย



$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_v} + \frac{R_1 R_2}{A_v Z_i}}$$

$$= \frac{1 + 9}{1 + \frac{1 + 9}{100} + \frac{1 \times 9}{100 \times 100}}$$

$$= 9.08 \text{ เท่า}$$

เมื่อมี Z_i ทำให้เกิดกระแสไหล 1μA (0.1V/100kΩ = 1μA) กระแสนี้ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่จุด B เพิ่มขึ้นอีก 1mV ทำให้แรงดันทางอินพุทรวมเป็น 1.101V

รูปที่ 4 แสดงอัตราการขยายของออปแอมป์เมื่อต้านทานทางอินพุทไม่ถึงอนันต์

ยกตัวอย่างเช่น ให้ Av = 100 และ Zi = 100 k Ωคำนวณตามในรูปที่ 4 จะพบว่าได้อัตราการขยาย 9.08 เมื่อเปรียบเทียบกับ 9.09 ซึ่งคำนวณไปแล้วโดยคิดว่า Zi มีค่าใหญ่มากจนเป็นอนันต์จะเห็นว่าผลต่างนั้นน้อยมาก

และถ้าลองเพิ่ม Av เป็น 10,000 จะได้อัตราขยายเป็น 9.9900 และ 9.9899 ซึ่งก็ต่างกันน้อยมาก จนโวลต์มิเตอร์ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปก็ไม่สามารถวัดถึงความแตกต่างนี้ได้

ออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วไปนั้นมี Av สูงมาก จนสามารถทิ้งค่า Zi ได้แต่อย่างไรก็ตาม Zi ก็ยังมีผลต่อวงจรบ้างโดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวพันกับกระแสไบแอสทางอินพุท ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป ซึ่งถ้ากระแสไบแอสนี้ไหลเข้าไปในออปแอมป์จะทำให้ไม่สามารถใช้ตัวต้านทานค่าสูง ๆ ต่อเข้ากับวงจรออปแอมป์ได้

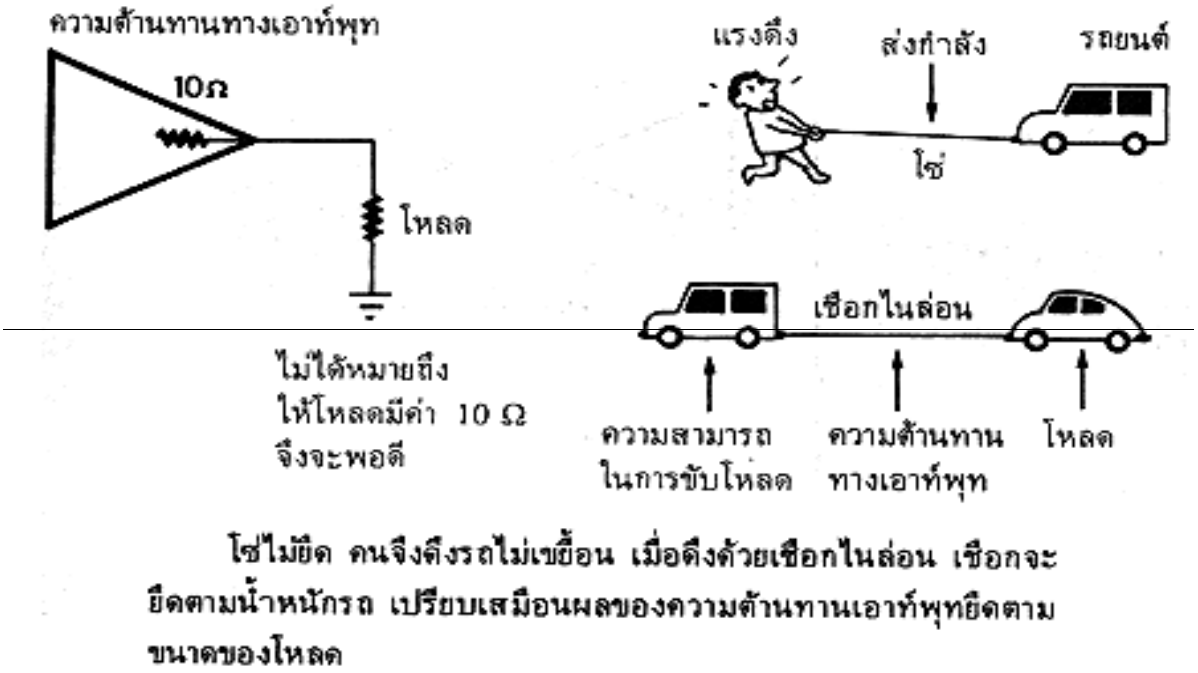
ลองดูในรูปที่ 4 แรงดันอินพุท 1.101 V และกระแสไหลเข้าออปแอมป์ 1 μA จะทำให้วงจรเหมือนกับมีค่าความต้านทานอินพุทรวมเป็น 1.1 MΩ ซึ่งเป็นค่าที่นับได้ว่าสูงทีเดียว

ความต้านทานทางเอาท์พุท

ความต้านทานทางเอาท์พุทของออปแอมป์จะมีขนาดเพียงไม่กี่โอห์มหรือไม่กี่สิบโอห์มเท่านั้น ดูเผิน ๆ แล้วอาจเห็นว่าไม่สำคัญเท่าไร แต่อย่างไรก็ตามยังมีผู้สับสนใน ความหมายอันนี้ และมักจะเข้าใจกันผิดเสมอ คือแยกความแตกต่างระหว่างความต้านทานทางเอาท์พุทกับความสามารถในการขับโหลดได้ไม่

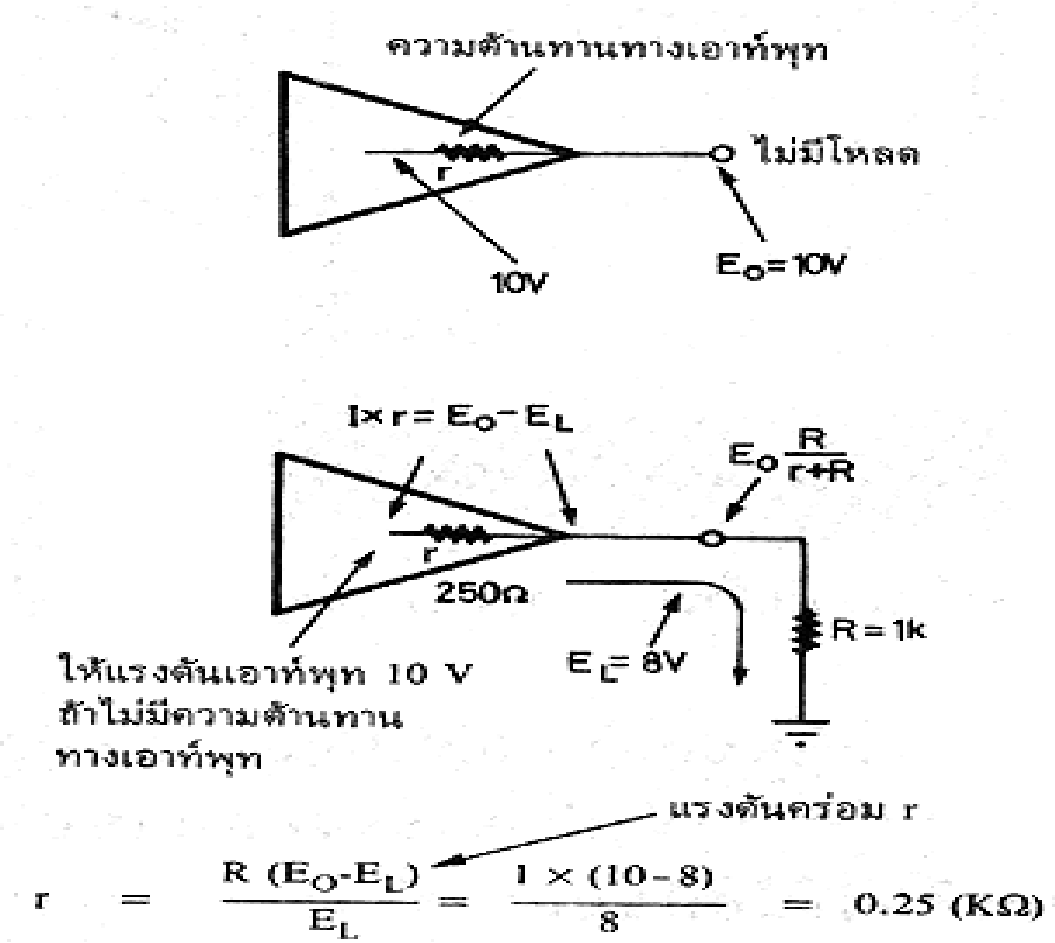
ถูกต้องความสามารถในการขับโหลดหมายถึง ความสามารถในการจ่ายกระแสและแรงดันให้กับโหลด ซึ่งอาจจะเป็นตัวต้านทานหรือวงจรซึ่งมาต่อทางด้านเอาท์พุทของออปแอมป์

สมมติให้ออปแอมป์มีความต้านทานทางเอาท์พุท 10 Ω ไม่ได้หมายความว่า ให้ต่อกับโหลดที่มีขนาด 10 Ωพอดี ตามความคิดเรื่องการแมทช์อิมพีแดนซ์ ซึ่งตามความเป็นจรงินั้น ความต้านทานทางเอาท์พุทกับความสามารถในการขับโหลดจะไม่เกี่ยวข้องกันเลยลองดูรูปเปรียบเทียบในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงความหมายของความต้านทานเอาท์พุทและความสามารถในการขับโหลด

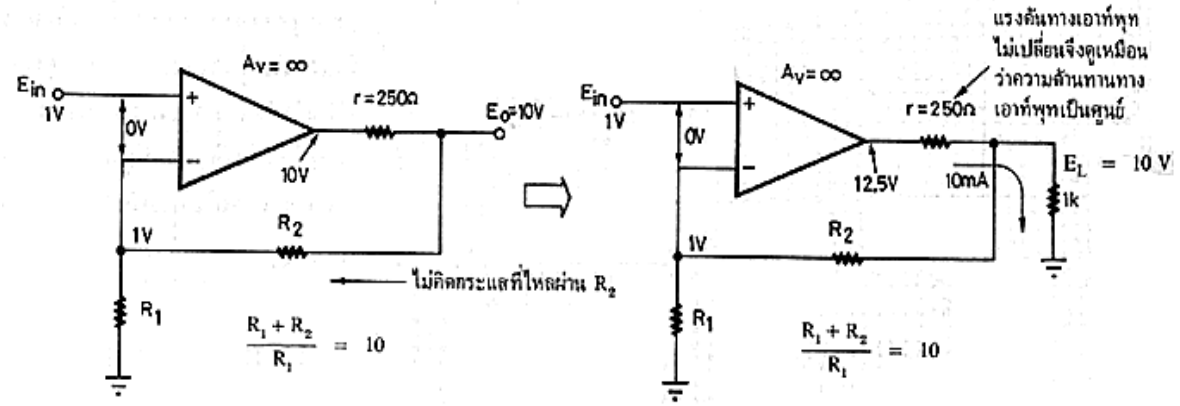
ความต้านทานทางเอาท์พุท จะเปรียบเหมือนกับการดึงรถยนต์ด้วยโซ่หรือเชือกไนล่อน แต่ความสามารถในการขับโหลด จะเปรียบเหมือนแรงของคนดึง ว่ามีมากแค่ไหน ความต้านทานทางเอาท์พุทจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุท เมื่อโหลดเปลี่ยนไป ซึ่งจะคล้ายกับเชือกไนล่อน ซึ่งยืดออกมายาวไม่เท่ากัน เมื่อรถหนักไม่เท่ากัน หมายความว่าความต้านทานทางเอาท์พุท เปลี่ยนไปเมื่อแรงดันเอาท์พุทเปลี่ยนไปด้วยผลของโหลด



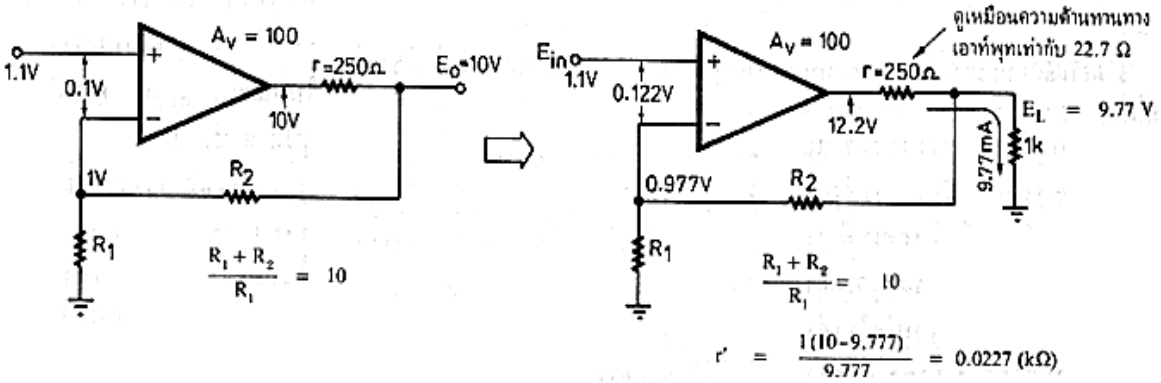
รูปที่ 6 แสดงความต้านทานเอาท์พุทของออปแอมป์

ตัวอย่างในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลของแรงดันเอาท์พุทในขณะที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ ออปแอมป์จะได้แรงดันเอาท์พุท 10 V แต่เมื่อต่อโหลดขนาด 1 k Ωเข้าไปเท่านั้น แรงดันเอาท์พุทลดลงมาเหลือเพียง 8 V ในกรณีนี้ ความต้านทานทางเอาท์พุทมีค่า 250 Ω

อัตราขยายของออปแอมป์ Av จะมีผลทำให้ความต้านทานทางเอาท์พุทของวงจรดูเหมือนจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยลองมาดูรูปที่ 7 เพื่อเข้าใจได้ง่ายขึ้นให้ออปแอมป์ เป็นอุดมคติทุกประการยกเว้นมีความต้านทานทางเอาท์พุท และนำความต้านทานอันนี้มาเขียนไว้ข้างนอกตัวออปแอมป์



ก เมื่อ $A_v = \omega$, $r = 250\ \Omega$



ข เมื่อ $A_V = 100$, $r = 250\ \Omega$

รูปที่ 7 เมื่อมองดูจากวงจรนี้ จะดูเหมือนว่าความต้านทานทางเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการขยายเปลี่ยนไป

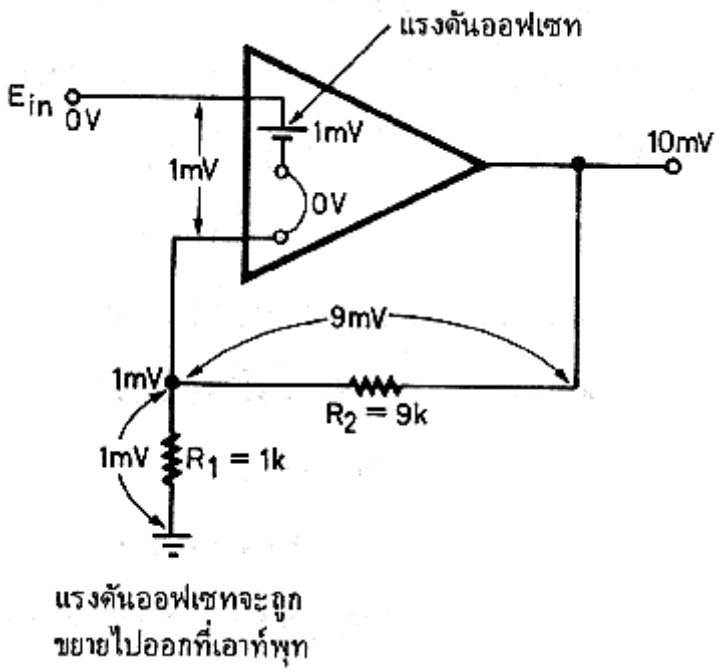
รูปที่ 7 ก. เป็นกรณีที่ Av = a และรูปที่ 7 ข. เป็นกรณีที่ Av = 100 จะเห็นว่าทั้งสองกรณีเมื่อต่อโหลดให้กับวงจร ออปแอมป์จะพยายามยกแรงดันเอาท์พุท ของตัวเองให้สูงขึ้นเพื่อให้แรงดันที่คร่อมโหลดมีค่าใกล้เคียงของเดิม จึงทำให้แลดูเห็นว่าความต้านทานทางเอาท์พุทของวงจรมีค่าน้อยลงไป

กรณี Av = ∞ จะคำนวนความต้านทานทางเอาท์พุทได้ศูนย์ และกรณี Av = 1000 จะคำนวณความต้านทานทางเอาท์พุทได้เพียง 22.7 Ω เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานทางเอาท์พุทจริงของออปแอมป์

ข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานทางเอาท์พุทของออปแอมป์นั้น มักจะไม่ค่อยมีแสดงในคู่มือออปแอมป์ของผู้ผลิต แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานทางเอาท์พุทนี้ไม่ค่อยก่อปัญหา แก่ผู้ออกแบบเท่ากับความสามารถในการขับโหลดของออปแอมป์

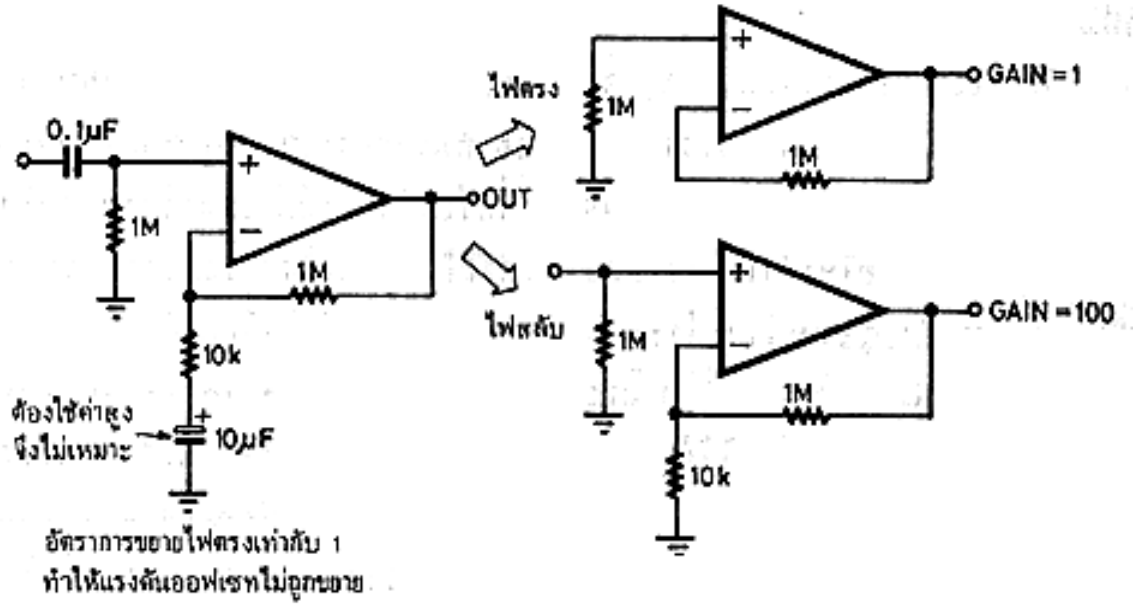
แรงดันออฟเซททางอินพุท

แรงดันออฟเซททางอินพุทเป็นเรื่องสำคัญมากเรื่องหนึ่ง เมื่อเราศึกษาเรื่องออปแอมป์ แรงดันออปเซททางอินพุทหมายถึง แรงดันขนาดเล็กที่ปรากฏระหว่างอินพุทบวกลบ ของออปแอมป์ในขณะที่แรงดันอินพุทเป็นศูนย์ ลองดูรูปที่ 8 ประกอบ



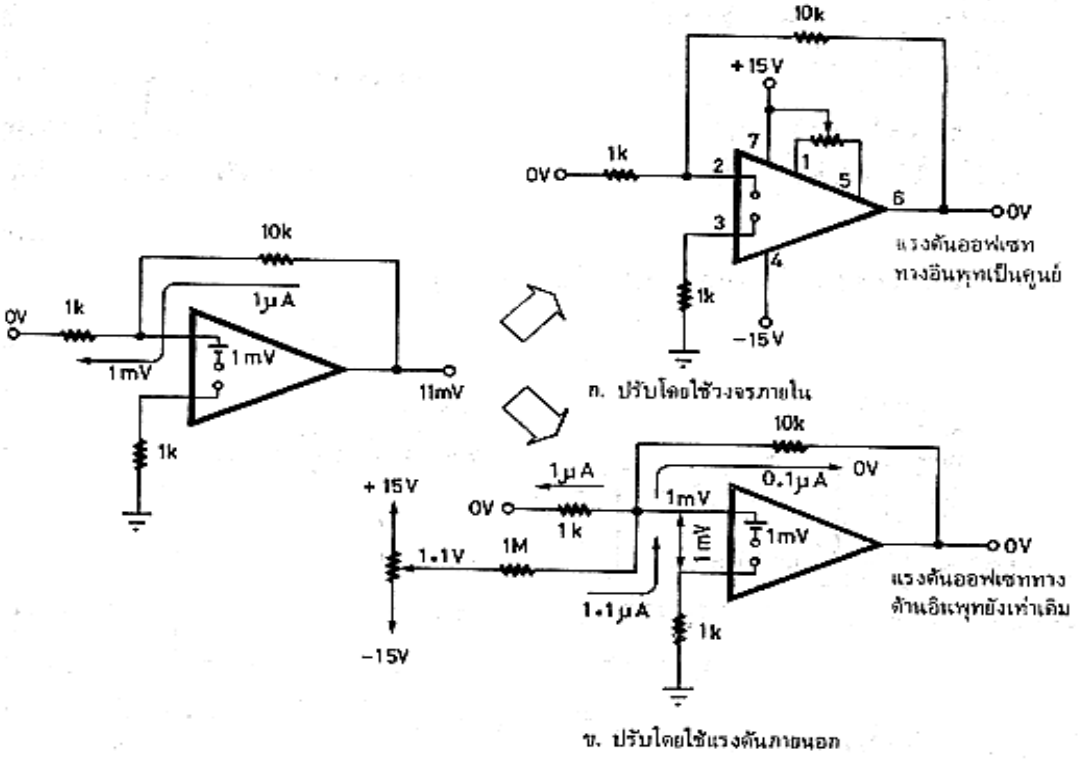
รูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าแรงดันออฟเซ็ทเพียง 1 mV จะกลายเป็น 10 mV ที่เอาท์พุท เมื่อออปแอมป์มีอัตราการขยายเพียง 10 เท่า

สำหรับวงจรที่ไม่ต้องการขยายแรงดันไฟตรง มักพยายามกำจัดผลของแรงดันออฟเซทนี้ ไม่ให้ไปปรากฏที่เอาท์พุท อย่างเช่น วิธีการในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นวงจรขยายแรงดัน ไฟสลับด้วยออปแอมป์สังเกตจากรูปทางซ้าย มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ ซึ่งคุณสมบัติของตัวเก็บประจุคือจะกันไฟตรงเอาไว้ และยอมให้ผ่านเฉพาะไฟสลับ ดังนั้น เมื่อมีแรงดันไฟตรง ป้อนกลับมาที่อินพุทลบ ตัวเก็บประจุจะทำให้สัญญาณไฟตรงทั้งหมดไหลผ่านเข้าอินพุทลบ หักล้างกับแรงดันไฟตรง ที่จะออกทางเอาท์พุทได้อัตราการขยายเท่ากับ 1



รูปที่ 9 แสดงการกำจัดแรงดันออฟเซ้ทโดยการให้ขยายเฉพาะแรงดันที่เป็นไฟสลับ

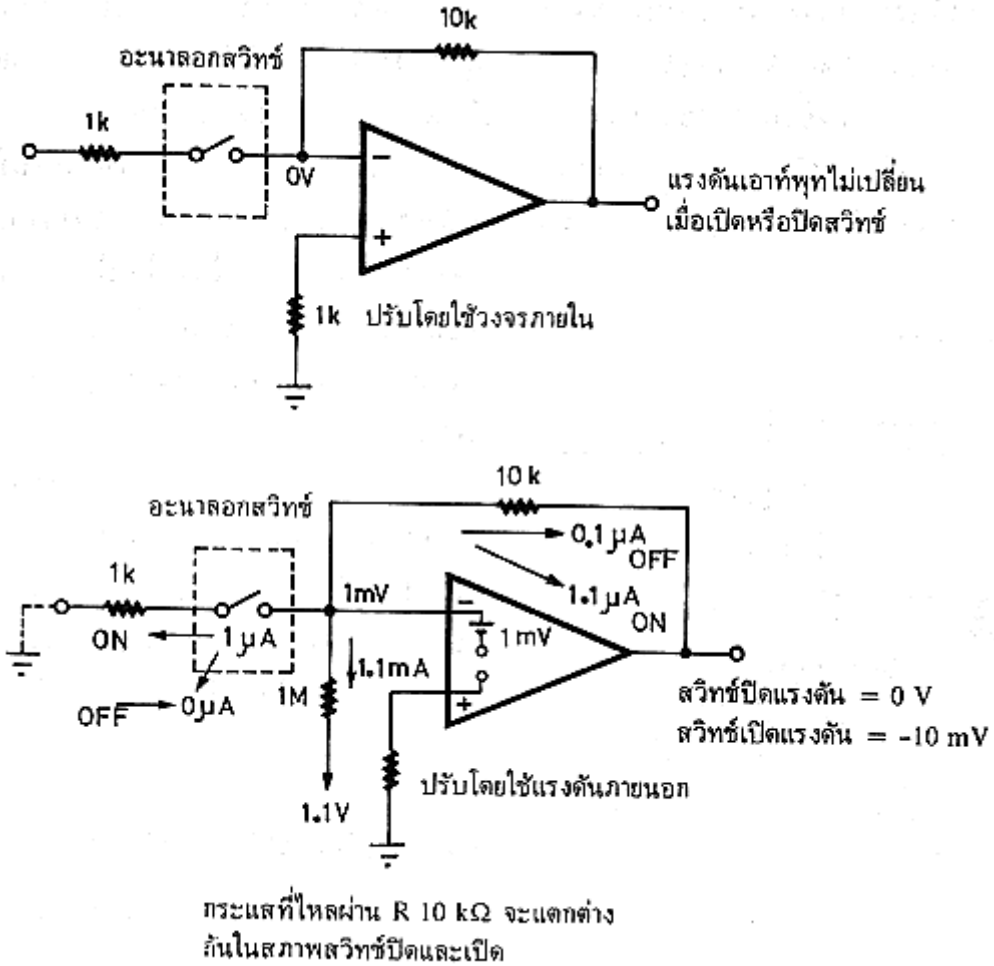
เมื่อมีสัญญาณไฟสลับผ่านเข้ามาจากเอาท์พุท มันจะเลือกไหลผ่านตัวเก็บประจุลงดินไป เสมือนกับว่าตัวต้านทานค่า 10 kΩ ในวงจรถูกต่อลงดินกลายเป็นรูปทางขวามือ ล่าง เมื่อคำนวณอัตราการขยายจากค่าของอุปกรณ์แล้วได้เท่ากับ 100 เท่า



รูปที่ 10 แสดงวิธีการปรับแรงดันออฟเซ็ท

การปรับเพื่อลดขนาดแรงดันออฟเซทที่อินพุทสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้วงจรภายในของออปแอมป์เอง โดยต่ออุปกรณ์ปรับเข้ากับขาของออปแอมป์และอีกวิธีหนึ่งคือ ป้อนแรงดันจากภายนอกเข้าไปลบล้างผลของแรงดันออฟเซทนี้การป้อนแรงดันจากภายนอกแม้จะลดผลของออฟเซท ไม่ให้ไปปรากฏที่เอาท์พุทได้จริง แต่อย่าลืมว่า แรงดันออฟเซททางอินพุทของออปแอมป์ ก็ยังไม่ได้หายไปไหน ดูรูปที่ 10 ประกอบ

ซึ่งเรื่องนี้อาจจะเป็นปัญหาได้เมื่อวงจรออปแอมป์ซับซ้อนขึ้น หรือในวงจรที่ใช้อะนาลอก สวิทช์ (analog switch) อะนาลอกสวิทช์เป็นสวิทช์อิเลคทรอนิคส์ ชนิดหนึ่งมีการทำงานคล้ายคลึงกับรีเลย์ เพียงแต่ไม่มีหน้าสัมผัสเชิงกลแบบรีเลย์ ใช้ในการเปิดปิดสัญญาณไฟฟ้าภายในมักจะทำด้วยทรานซิสเตอร์หรือเฟท อะนาลอกสวิทช์ที่มีขายตามท้องตลาดในปัจจุบัน มักจะเป็นชนิดที่ทำจากเฟททั้งนั้น



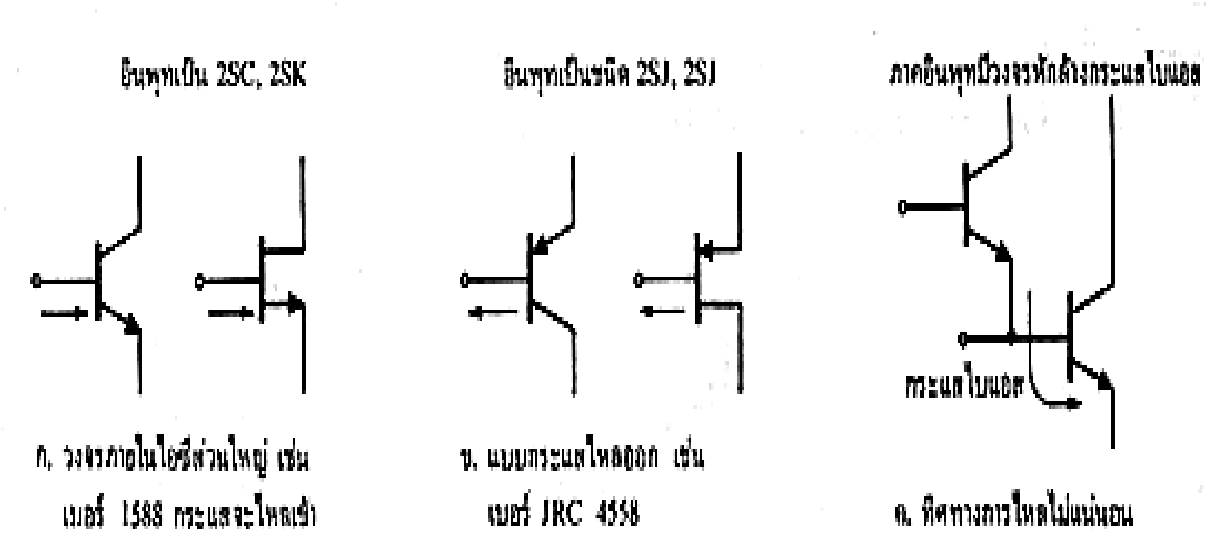
รูปที่ 11 แสดงการใช้อนาลอกสวิทช์เพื่อเปิดปิดวงจรทางอินพุท

ดูตัวอย่างในรูปที่ 11 จะเห็นว่าการปรับออฟเซทโดยใช้แรงดันภายนอกจะทำให้เอาท์พุท มีแรงดันแตกต่างกันเมื่อสวิทช์อยู่ในสภาพเปิดหรือปิด

กระแสไบแอสทางอินพุท

กระแสไบแอสทางอินพุท หมายถึง กระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขั้วบวกหรือลบ ของอินพุทของออปแอมป์ไม่เกี่ยวข้องกับความต้านทานทางอินพุทของออปแอมป์ ปกติกระแสไบแอสทางอินพุท จะมีองค์ประกอบไฟตรงเป็นหลักในขณะที่ความต้านทานทางอินพุท จะมีองค์ประกอบทางไฟสลับเป็นหลัก

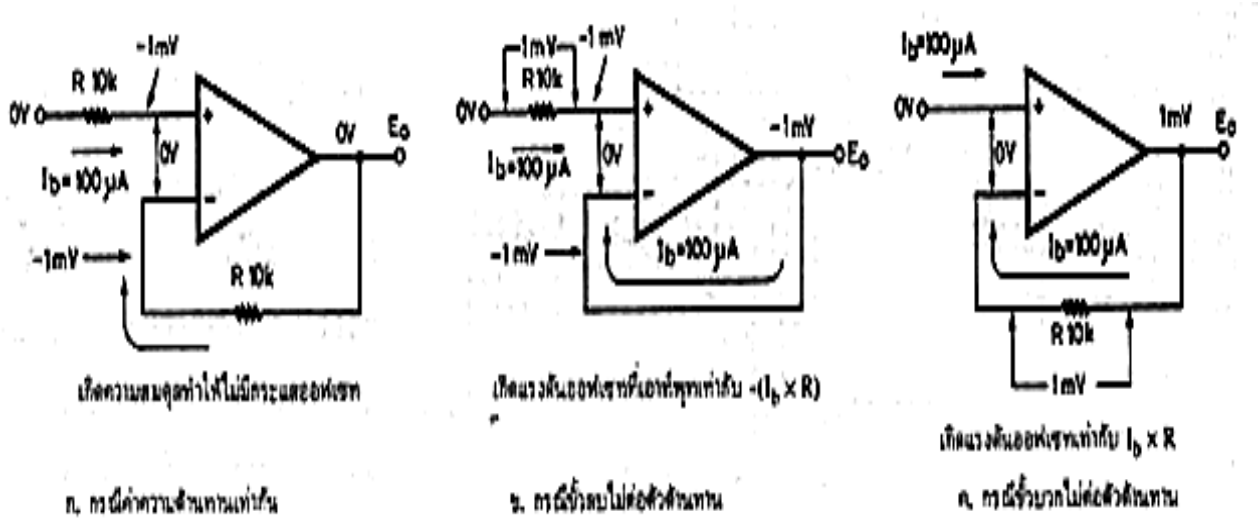
ทิศทางการไหลของกระแสไบแอสนี้ จะเป็นการไหลเข้าหรือออกจากออปแอมป์จะกำหนดจากชนิดของทรานซิสเตอร์หรือเฟ็ท ที่ขั้วอินพุทภายในออปแอมป์นั้น ๆ ส่วนใหญ่แล้วกระแสจะไหลเข้า แต่มีออปแอมป์บางตัว (เช่นเบอร์ 4558) กระแสจะไหลออก จึงควรระวังในจุดนี้ด้วย



รูปที่ 12 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไบแอสที่อินพุทในไอซีแบบต่าง ๆ

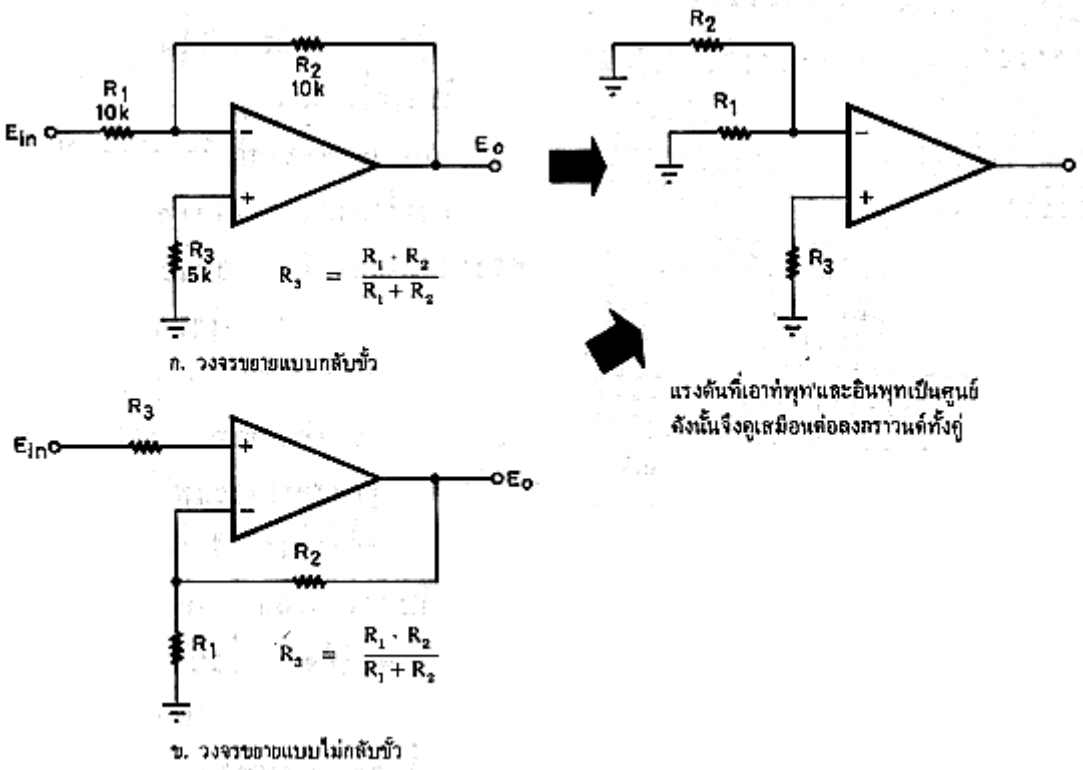
นอกจากนั้น ยังมีออปแอมป์ชนิดที่มีความต้านทานทางอินพุทสูงมากและกระแสไบแอสต่ำ ภายในออปแอมป์จะมีวงจรต้านกระแสไบแอสนี้ เลยทำให้ทิศทางของกระแส ไบแอสไม่แน่นนอนลองดูรูปที่ 12 ประกอบ

ลองดูผลของกระแสไบแอสในรูปที่ 13 ก. นั้นออปแอมป์ต้องการกระแสไบแอส 100 μA กระแสนี้จะไหลเข้าออปแอมป์ทั้งทางขั้วบวกและลบ ถ้าค่าความต้านทานที่ต่อ บนทางเดินของกระแสทั้งสองด้านเท่ากัน ก็จะไม่มีผลทำให้เกิดแรงดันออฟเซทที่เอาท์พุท แต่ค่าความต้านทานที่ต่อกับขั้วบวกและลบนี้แตกต่างกันละก็จะทำให้เกิดแรงดันออฟเซท ที่เอาท์พุทของวงจรทันที



รูปที่ 13 ผลของกระแสไบแอสทางอินพุท

ในรูปที่ 13 ให้ค่าความต้านทานที่ต่อวงจรเท่ากับ 10 kΩ เมื่อก ระแสไบแอสไหลผ่านตัวต้านทาน จะทำให้เกิดแรงดันเท่ากับ 100 mA x 10 k = 1 m Ω V ในกรณีรูป ก. ทั้งขั้วบวกและลบมีแรงดัน 1 mV เท่ากัน จึกหักล้างกันเอง ไม่ทำให้เกิดแรงดันออฟเซทที่ขั้วเอาท์พุท ในกรณีรูป ข. และ ค. นั้น มีตัวต้านทานต่ออยู่เพียงข้างเดียว จึงไม่เกิดความสมดุล เป็นผลทำให้เกิดแรงดันออฟเซท



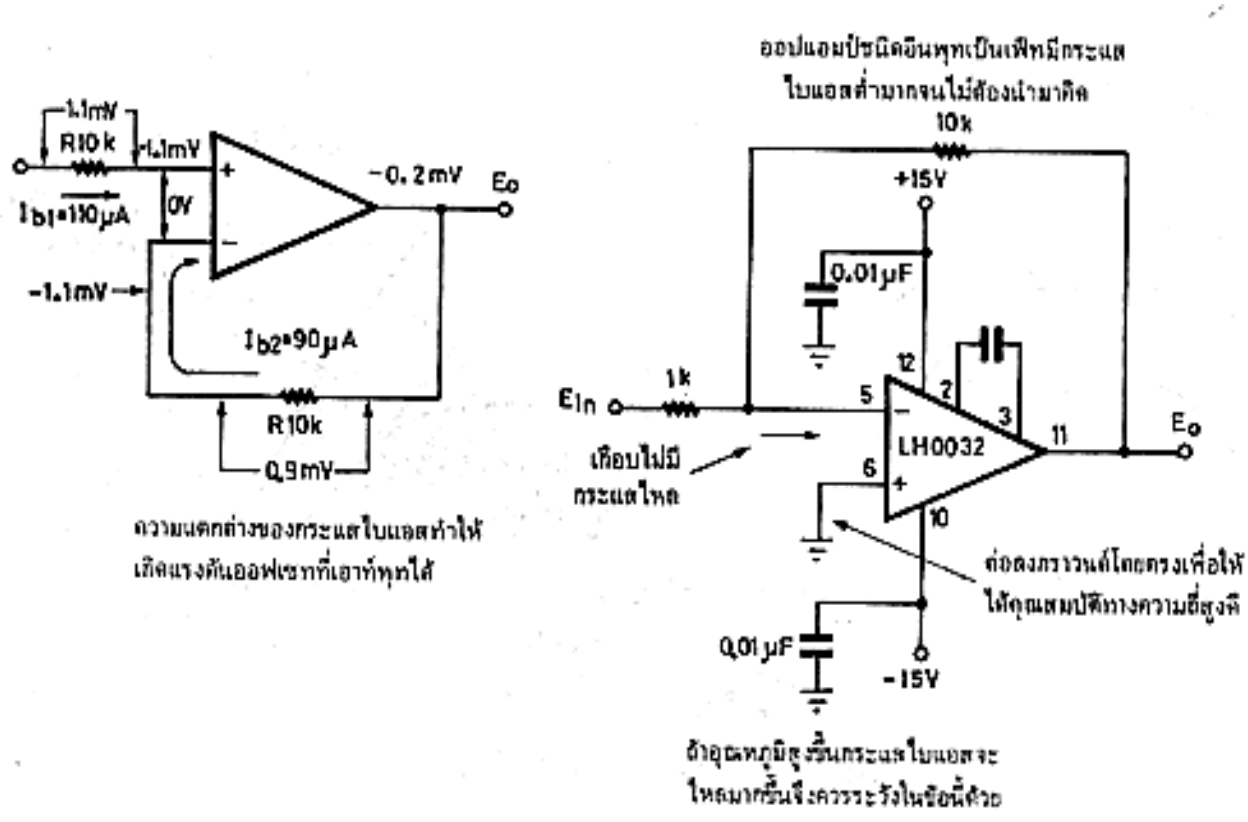
รูปที่ 14 แสดงการต่อตัวต้านทานที่อินพุททั้งสองให้สมดุลกัน

ถ้าที่ขั้วอินพุทของออปแอมป์มีตัวต้านทานมาต่อด้วยหลายตัว ตัวต้านทานที่จะต้องต่อเข้าที่อีกขั้วหนึ่งเพื่อให้เกิดความสมดุลจะต้องมีค่าเท่ากับการต่อขนานของ ตัวต้านทานทุกตัวนั้น ดูตัวอย่างในรูปที่ 14

ในปัจจุบันมีออปแอมป์ที่ใช้เฟ็ทเป็นอินพุทอยู่หลายตัว ที่นิยมใช้แพร่หลายกันดูในตารางที่ 1 ออปแอมป์ชนิดนี้ จะมีกระแสไบแอสที่อินพุทต่ำมาก จนไม่ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน

กระแสออฟเซททางอินพุท

ตามปกติกระแสไบแอสที่ไหลเข้าขั้วบวกและลบของออปแอมป์จะไม่เท่ากันทีเดียวนัก ความแตกต่างของกระแสทั้งสองนี้ เรียกว่ากระแสออฟเซททางอินพุทของออปแอมป์ ยกตัวอย่างเช่น กระแสไบแอสที่ไหลเข้าทางขั้วบวกเป็น 110 μA และที่ขั้วลบเป็น 90μA เราจะเขียนว่ากระแสไบแอสเท่ากับ 100 μA และกระแสออฟเซททางอินพุทเท่ากับ 20 μA เป็นต้น



รูปที่ 15 แสดงผลของกระแสออฟเซ็ท

รูปที่ 15 จะแสดงให้เห็นว่ากระแสออฟเซทนี้ จะทำให้เกิดแรงดันออฟเซทขึ้นที่ขั้วเอาท์พุทได้โดยยังไม่คิดผลของกระแสไบแอส การหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดแรงดันออฟเซทเนื่อง มาจากกระแสออฟเซทนี้ สามารถทำได้โดยการลดขนาดของค่าความต้านทานในวงจรลง อันจะเป็นผลทำให้แรงดันตกคร่อมมีขนาดเล็กลง

ออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วไป จะมีขนาดของกระแสออฟเซทมากน้อยตามขนาดของกระแสไบแอส แต่ถ้าเป็นออปแอมป์คุณภาพดี จะมีกระแสออฟเซทน้อยเป็นไม่กี่สิบเท่า ของกระแสไบแอสยิ่งถ้าเป็นออปแอมป์ชนิดที่อินพุทเป็นเฟ็ท จะมีกระแสไบแอสน้อยมาก ทำให้กระแสออฟเซทยิ่งน้อยลงไปใหญ่ จนไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง และถ้าใช้ออปแอมป์ชนิดนี้ ในงานความถี่สูง ควรต่อขั้วบวกของออปแอมป์ลงกราวนด์โดยตรง เพื่อให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ดีขึ้น

แต่จุดอ่อนของออปแอมป์ชนิดที่อินพุทเป็นเฟ็ท จะอยู่ที่คุณสมบัติเปลี่ยนตามอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ลองดูจากคู่มือของออปแอมป์ ชนิดที่มีอินพุทเป็นเฟ็ทนั้น แล้วเปรียบเทียบค่ากระแสไบแอสและกระแสออฟเซททางอินพุท ที่อุณหภูมิ 20 องศา และ 70 องศา จะเห็นว่าแตกต่างกันมาก บางตัวที่ 70 องศา จะมีกระแสไบแอสมากกว่า ออปแอมป์ชนิดอินพุทเป็นทรานซิสเตอร์เสียอีก

ลองดูตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ในตารางที่ 1 จะเห็นว่ากระแสไบแอสและกระแสออฟเซท จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิการเพิ่มนี้จะมากถึง ขนาดหลายร้อยหลายพันเท่า และเป็นเงื่อนไขเดียวที่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นมากที่สุดในบรรดาคุณสมบัติอื่น ๆ

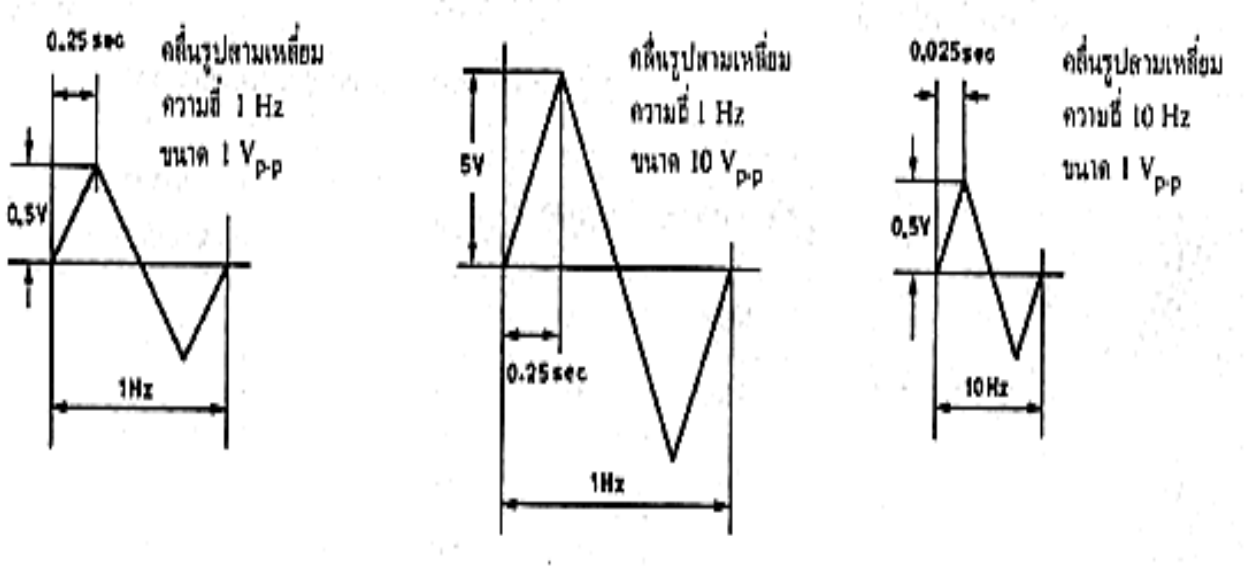
ฉะนั้นจึงควรทดสอบวงจรที่ต้องการอินพุทพีแดนซ์สูง ๆ และทดสอบที่อุณหภูมิสูงด้วย แล้วทำการวัดผลของกระแสไบแอสนี้ จึงจะทำให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานได้ สำหรับคุณสมบัติทางด้านอื่นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นกัน แต่จะไม่มากเท่ากับกระแสไบแอสนี้

ลักษณะสมบัติเชิงความถี่

คุณสมบัติข้อนี้เรียกว่าเป็นตัวกำหนดความสามารถของออปแอมป์ทีเดียว ออปแอมป์จะดีไม่ดีก็มักดูกันที่ลักษณะเชิงความถี่นี้

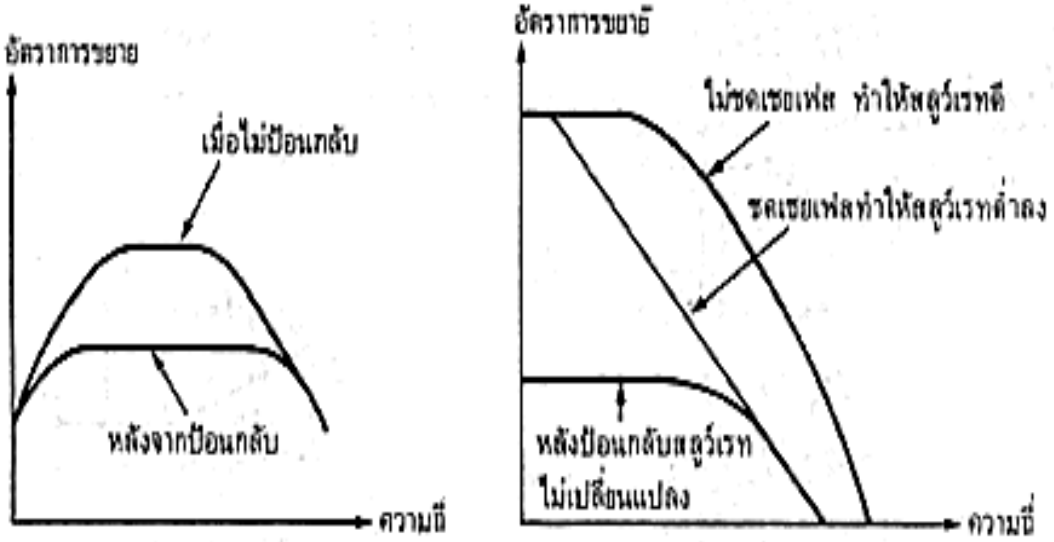
แต่มีคุณสมบัติอีกข้อหนึ่งที่มักจะดูควบคู่กันไปคือ สลูว์เรท (Slew rate) สลูว์เรท หมายถึงความสามารถในการให้เอาท์พุท เพื่อไล่ให้ทันการเปลี่ยนแปลงทางอินพุท ที่ป้อนเข้ามา ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีแอมปลิจูดใหญ่ให้กับออปแอมป์ แล้ววัดดูความเร็วในการขึ้นลงของรูปคลื่นทางเอาท์พุทจะได้เป็นค่าสลูว์เรทออกมา

ตัวอย่างเช่นเอาท์พุทให้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป 10 V ในเวลา 0.1 mS แสดงว่ามีสลูว์เรท เท่ากับ 10 / 0.1 μS = 100V / μS คลื่นสามาเหลี่ยมความถี่ 1Hz ขนาด 1 Vpp จะมีสลูว์เรทเท่ากับ 0.5 V / 0.25 μS หรือ 2 V / Sec แต่ถ้าขนาดเพิ่มเป็น 10 Vpp ค่าสลูว์เรทจะเป็น 5 V / 0.25 Sec หรือ 20 V / Sec นั่นเอง ซึ่งจะเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่าตัว อัตราการเปลี่ยนแรงดันนี้เราเรียกว่า สลูว์เรท



รูปที่ 16 จะเห็นว่ารูปคลื่นที่เหมือนกัน ความถี่เท่ากันแต่ขนาดต่างกัน สลูว์เรทจะไม่เท่ากัน

จากรูปที่ 16 การเพิ่มความถี่หรือเพิ่มขนาดสัญญาณ ให้ออปแอมป์ จะเป็นปัญหาทางด้านสลูว์เรททั้งสิ้น การป้อนกลับจะทำให้ผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยายดีขึ้นจริง แต่จะไม่ทำให้สลูว์เรทสูงขึ้นเลย แนวความคิดของการใช้วงจรป้อนกลับในสมัยก่อนนั้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทางความถี่ให้ดีขึ้น ตามรูปที่ 17 แต่การใช้งานออปแอมป์ในปัจจุบัน มักจะไม่คำนึงถึงผลตอบสนองความถี่มากนัก บางครั้งเพื่อให้ได้อัตราขยายของระบบสูงขึ้น อาจจะต้องทำให้ผลตอบสนองความถี่เลวลง โดยพยายามไม่ให้เกิดการออสซิลเลทเกิดขึ้นได้ง่าย

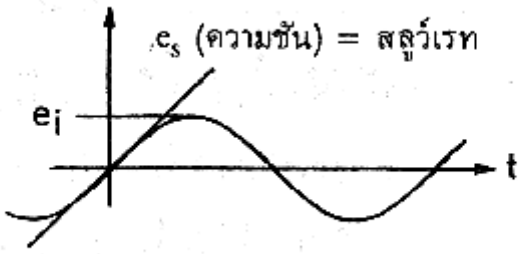


ก. แสดงการป้อนกลับเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทางความถี่

ข. การเพิ่มอัตราการขยายโดยยอมให้ผลตอบสนองทางความถี่เสียลง

รูปที่ 17 แสดงผลของการป้อนกลับ

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสลูว์เรท คือการที่จะให้รูปคลื่นที่สมบูรณ์มีขนาดใหญ่ได้เท่าใด ในขณะที่ความถี่สูงขึ้น ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนองทางความถี่เลย



$$e_s = \omega e_i \cos \omega t$$

$$e_{s\,(max)} = 2\pi f e_i \text{ (V/sec)}$$

ที่ความถี่ 1 MHz ขนาด 20 $V_{p\text{-}p}$ จะได้สลูว์เรทเท่ากับ

$$e_s \text{ (max)} = 2 \times 3.14 \times 10^6 \times 10$$

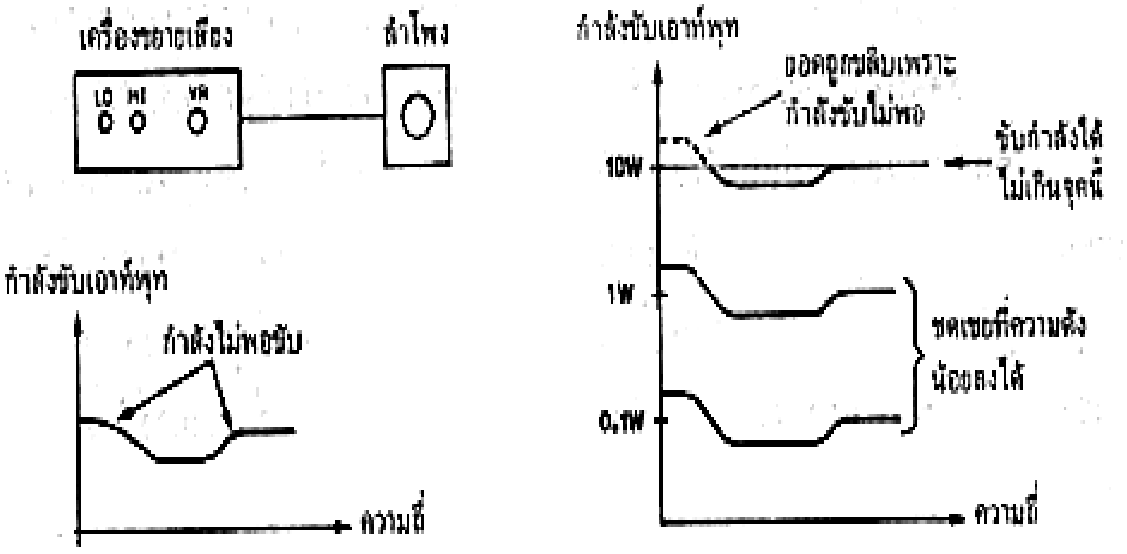
$$= 62.8 \times 10^6 \text{ (V/sec)}$$

$$= 62.8 \text{ (V/}\mu\text{s)}$$

รูปที่ 18 อัตราสลูว์เรทที่ดีทำให้ได้รูปซายน์ที่ไม่ผิดเพี้ยนจากการขยาย

ลองดูในรูปที่ 18 การที่ออปแอมป์จะสามารถผลิตสัญญาณรูปซายน์ความถี่ 1 MHz ขนาด 20 Vp-p ได้นั้น ออปแอมป์จะต้องมีสลูว์เรทดีถึง 62.8 V / μS

ออปแอมป์เบอร์ LM741 ที่นิยมใช้กันนั้น มีสลูว์เรทเพียง 0.5 V / μS ถ้าจะนำมาผลิตรูปคลื่นซายน์ที่มีขนาด 20 Vp-p ก็คงจะได้ความถี่เพียงประมาณ 10 KHz เท่านั้นเอง แต่ถ้าใช้ LM741 เป็นบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเพียง 1 เท่า และพยายามผลิตสัญญาณให้ได้ 1 MHz ก็จะได้ขนาดสัญญาณเพียง 0.1 V เท่านั้น



รูปที่ 19 แสดงขีดความสามารถของโทนคอนโทรล

เปรียบเหมือนการพยายามใช้โทรคอนโทรล ในการปรับให้เครื่องขยายเสียงที่มีกำลังน้อยขับเสียงต่ำให้ดังขึ้น ตามในรูปที่ 19 นั่นเอง

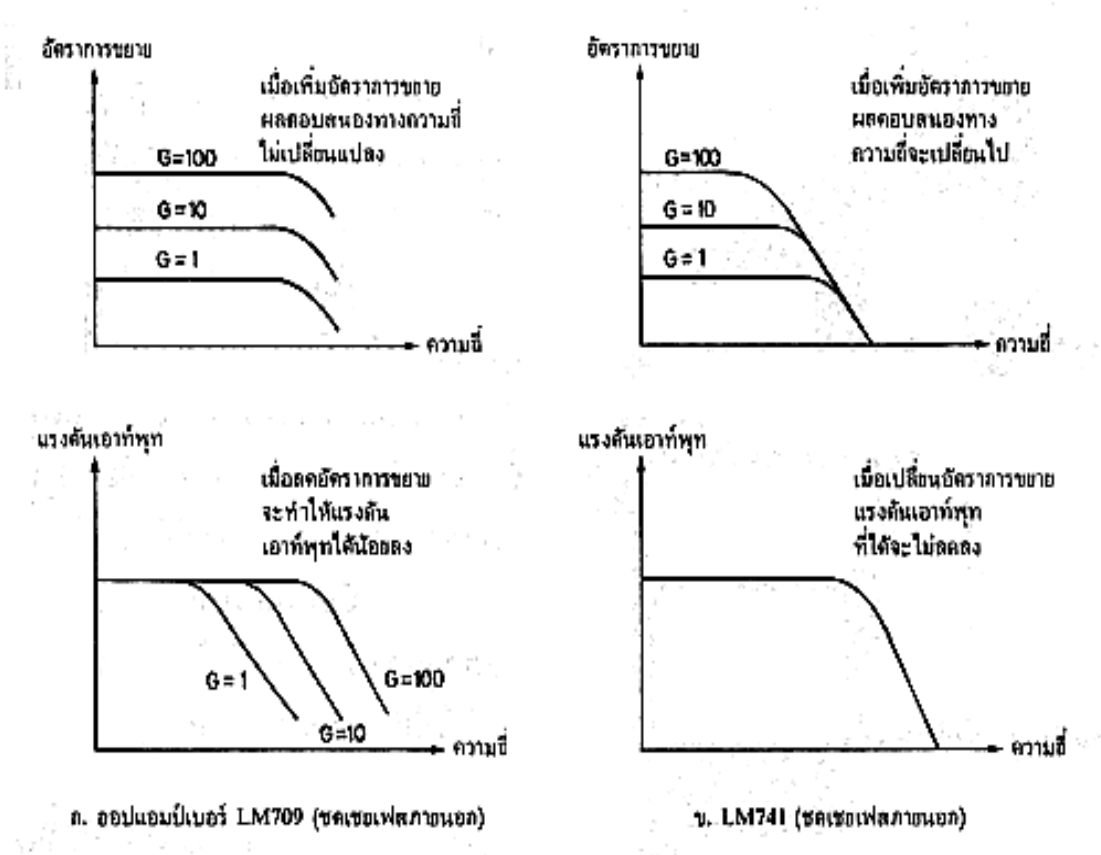
แต่ถ้าสลูว์เรทดีก็ไม่ได้หมายความว่าผลตอบสนองทางความถี่จะดีตามไปด้วย ออปแอมป์ในสมัยแรก ๆ นิยมใช้เบอร์ LM709 ซึ่งเป็นออปแอมป์เบอร์ที่มีสลูว์เรท 2 V / μS แต่ในการใช้งานทุกครั้งจะต้องต่ออุปกรณ์ เพื่อชดเชยเฟสเสมอ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าสลูว์เรทต่ำลงจนอาจจะเลวกว่า LM741 ซึ่งมีสลูว์เรทเพียง 0.5 V / μS ดูรูปที่ 20 ประกอบ

การชดเชยเฟส มักจะทำให้ค่าสลูว์เรทต่ำลง แต่ก็มีวิธีชดเชยที่จะไม่ทำให้สลูว์เรทต่ำลง บางครั้งอาจทำได้ดีขึ้นด้วย แต่ถ้าใช้ออปแอมป์หลายตัวทำงานร่วมกัน จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องเสถียรภาพของการทำงานได้

อัตราการขยาย	C_1 (pF)	C_2 (pF)	R_1 (kΩ)	ผลตอบสนองความถี่	สลูเรท
1000	10	3	0	↑ เหมือนเดิม ↓	ดี ↕ เลว
100	100	3	1.5		
10	470	22	1.5		
1	4700	220	1.5		

รูปที่ 20 แสดงการชดเชยเฟสของออปแอมป์เบอร์ LM709

จากรูปที่ 20 จะเห็นว่า การชดเชยเฟสให้ LM709 จะทำให้ผลตอบสนองความถี่ดีขึ้น แต่จะทำให้สลูว์เรทเลวลง เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชย ดูผลจากรูปที่ 21

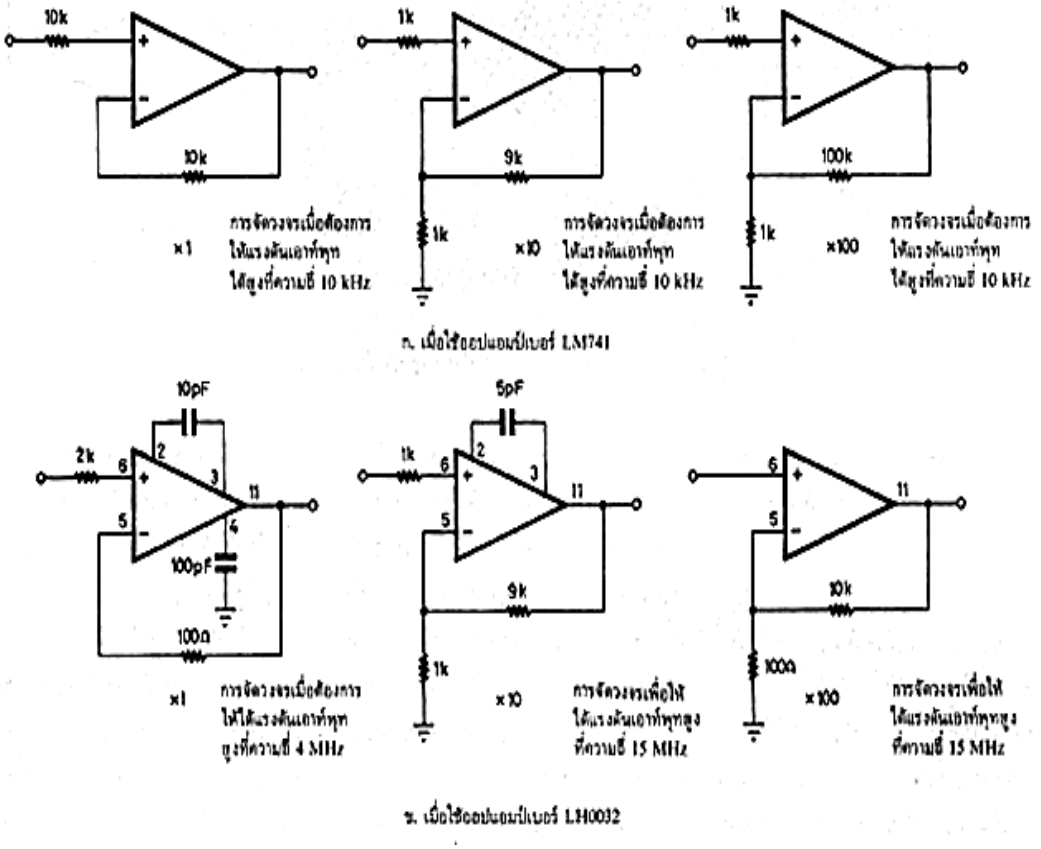


รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายกับสลูว์เรท

การชดเชยเฟสจะต้องต่ออุปกรณ์ภายนอก แต่ค่า C และ R ที่เหมาะสมจะต้องปรับไปตามอัตราการขยายที่ต้องการ

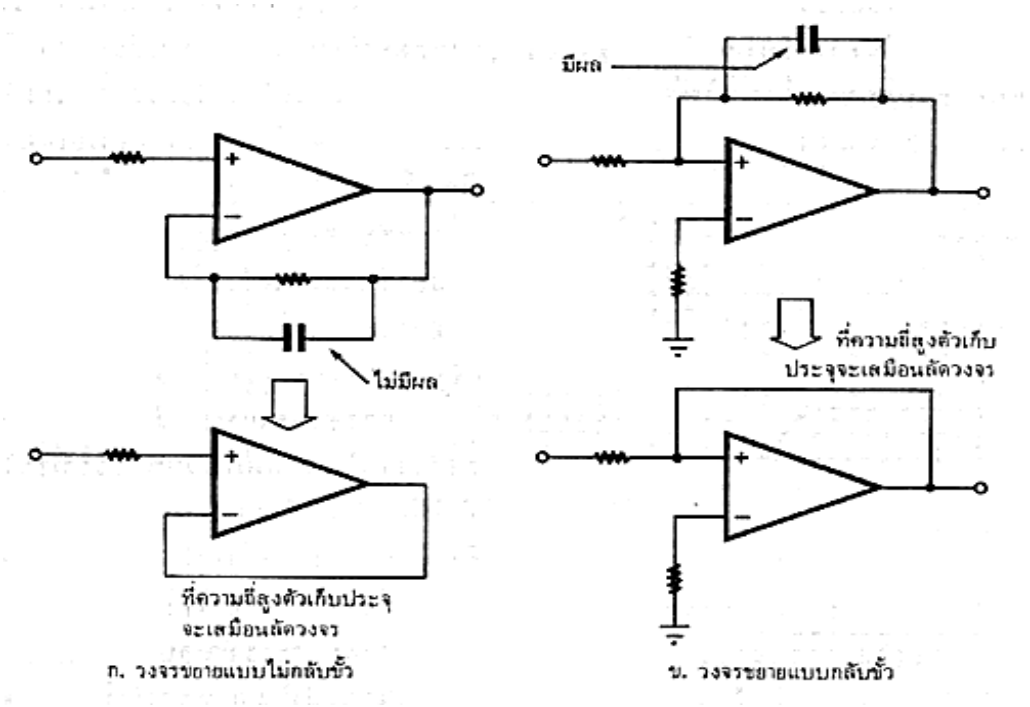
ออปแอมป์ในปัจจุบันนั้น จะมีวงจรชดเชยเฟสใส่ไว้ภายในตัวไอซี ไม่จำเป็นจ้องต่ออุปกรณ์ภายนอก และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ตามอัตราขยายที่ได้ แต่ถ้าใช้ในกรณีที่อัตราการขยายสูงมาก จะทำให้ผลตอบสนองความถี่เลวลงไปได้

ออปแอมป์ความเร็วสูง ก็มีการชดเชยเฟสภายในเช่นเดียวกัน แต่การชดเชยจะน้อยที่สุด ดังนั้นในบางครั้งอาจจะต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกช่วย เช่น เมื่อใช้กรณีที่อัตราการขยายสูงไม่ต้องต่ออุปกรณ์ชดเชย แต่ถ้าอัตราการขยายต่ำจะต้องต่อตัวเก็บประจุชดเชยเป็นต้นดูรูปที่ 22 ประกอบ



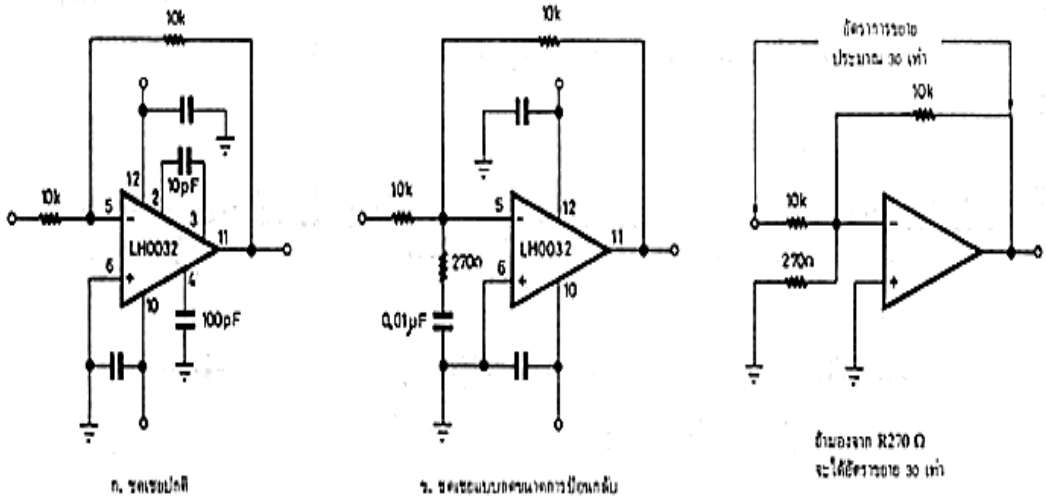
รูปที่ 22 อัตราการขยายของออปแอมป์มีผลทำให้ผลตอบสนองความถี่ของออปแอมป์เปลี่ยนไป

ถ้าใช้ออปแอมป์ความเร็วสูง ที่อัตราการขยายเพียง 1 จะต้องต่ออุปกรณ์ชดเชยให้หลายตัว มิฉะนั้นการทำงานจะขาเสถียรภาพ (ออสซิสเลทได้ง่ายมาก) การใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปเพื่อชดเชยจะทำให้สลูว์เรทเลวลง และคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ในย่านความถี่สูงจะเกิดยอดทำให้ไม่เป็นผลดีต่อการใช้งาน



รูปที่ 23 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยเฟสขนานเข้ากับตัวต้านทานป้อนกลับ

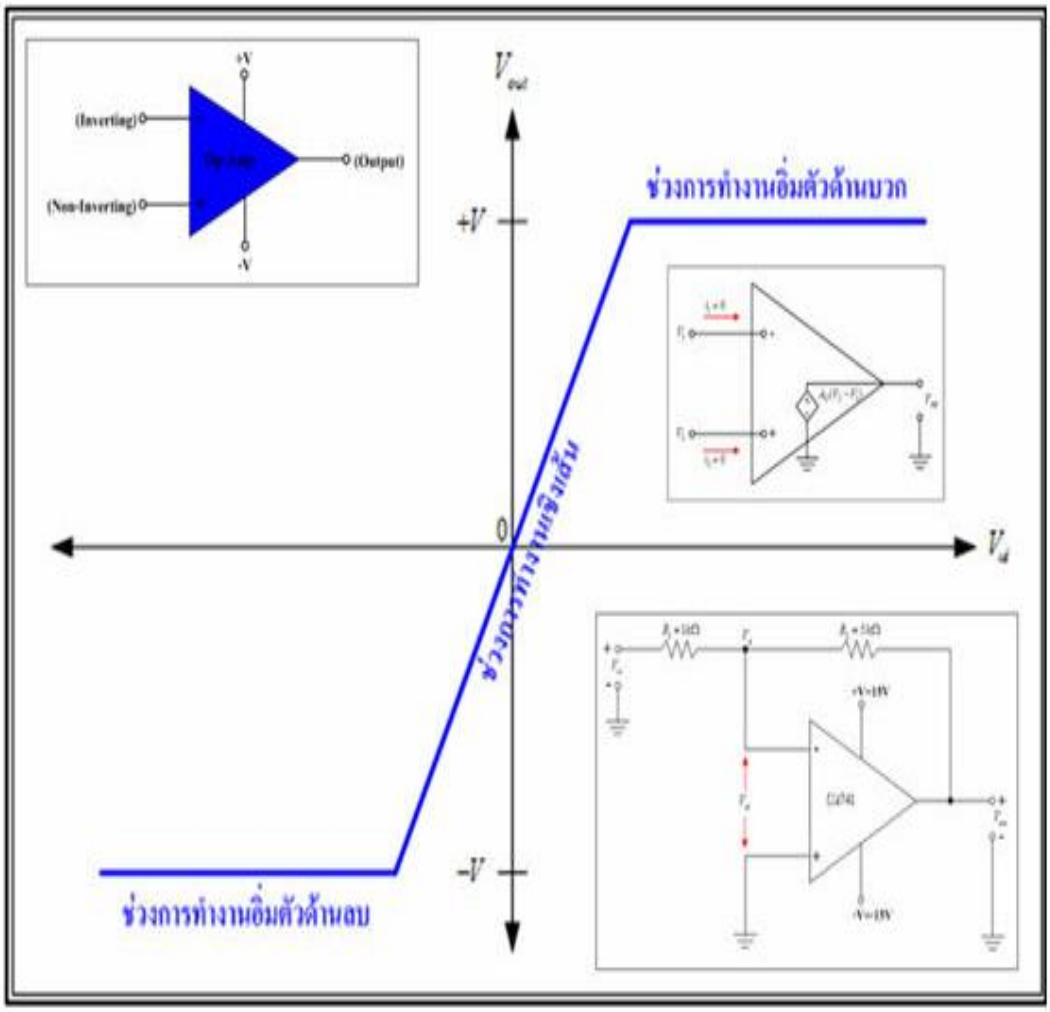
การชดเชยเฟสในรูปที่ 23 จะใช้การต่อตัวเก็บประจุ คร่อมตัวต้านทานที่ใช้ในการป้อนกลับซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก จากในรูปจะเห็นว่า ในย่านความถี่สูงจะทำให้เสมือนเกิดลัดวงจรที่ตัวเก็บประจุ เป็นผลให้วงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว จะมีอัตราการขยายเหลือเพียง 1 และวงจรขยายแบบกลับขั้วจะมีอัตราการขยายเป็นศูนย์ ถ้าป้อนกลับมากเกินไป จะทำให้ออสซิลเลทง่าย แต่ถ้าป้อนกลับน้อยไปจะทำให้อัตราขยายสูงเกินไป



รูปที่ 24 แสดงการชดเชยเฟสที่ทำให้สลูว์เรทไม่เลวลง

วิธีการชดเชยเฟส โดยไม่ทำให้สลูว์เรทเลวลง แสดงในรูปที่ 24 รูป ก. การต่อตัวเก็บประจุจะทำให้สลูว์เรทเลวลง แต่รูป ข. สลูว์เรทไม่เลวลง

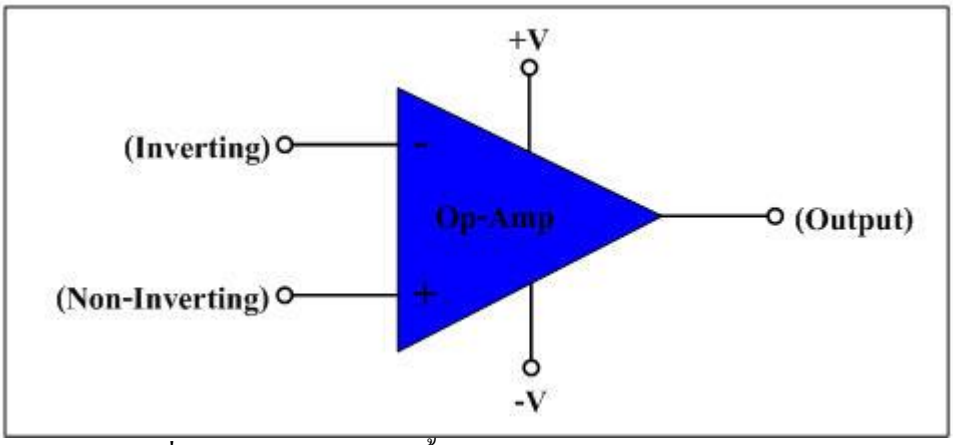
ในย่านความถี่ต่ำตัวเก็บประจุขนาด 0.01μF จะมีอิมพีแดนซ์สูง จนละเลยได้ แต่ในย่านความที่สูงจะเปรียบเหมือนลัดวงจร ทำให้อัตราการขยายของวงจรยังเท่าเดิม คือประมาณ 30 เท่า ขนาดของการป้อนกลับจะลดลง จึงไม่จำเป็นต้องมีการชดเชยเฟส



กลับมาพบกันอีกครั้งแล้วนะครับ ซึ่งในบทความนี้ก็จะขอกล่าวถึงพื้นฐานการออกแบบวงจรด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ออปแอมป์ (Op-Amp : Operational Amplifier) นะครับ โดยเราจะเริ่มจากการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของออปแอมป์ ก่อนนะครับ ต่อจากนั้นก็จะขอกล่าวถึงพื้นฐานในการคำนวณของออปแอมป์ ครับ ก่อนที่จะนำพื้นฐานที่ได้ศึกษานี้ไปทำการออกแบบวงจรที่ใช้ออปแอมป์ มาเป็นส่วนประกอบของวงจรต่อไปนะครับ เพื่อที่จะทำให้ผู้ที่ได้อ่านหรือผู้ที่ได้ทำการศึกษาเกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นนั้นเองครับ ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับที่สูงขึ้นต่อไปครับ… มาเริ่มจากความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับออปแอมป์กันเลยนะครับ..??

ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับออปแอมป์ (Op-Amp)

ถ้าจะกล่าวถึงอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp)นั้น ก็สามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้ครับ โดยอุปกรณ์ออปแอมป์นั้นจะเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งครับ ที่สร้างขึ้นมาโดยโครงสร้างภายในนั้นจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวอยู่หลายชนิดครับ เช่น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์(BJT) อุปกรณ์มอสเฟต(MOSFET) อุปกรณ์ไดโอด(Diode) และยังมีตัวต้านทาน(R) โดยอุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะถูกประกอบและต่อรวมกันที่อยู่ในรูปของวงจรรวมนั้นเองครับ ที่เรารู้จักกันดีในชื่อที่เรียกว่า ไอซี (IC : Integrated Circuit) ซึ่งวงจรรวมที่ได้นี้นะครับจะมีลักษณะของวงจรเป็นวงจรขยายสัญญาณ โดยมีอัตราการขยายแรงดันที่สูงครับ หรือที่เรียกว่า (Voltage Gain) ซึ่งเราสามารถเขียนสัญลักษณ์ของออปแอมป์ ที่แสดงถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) ดังแสดงใน รูปที่ 1



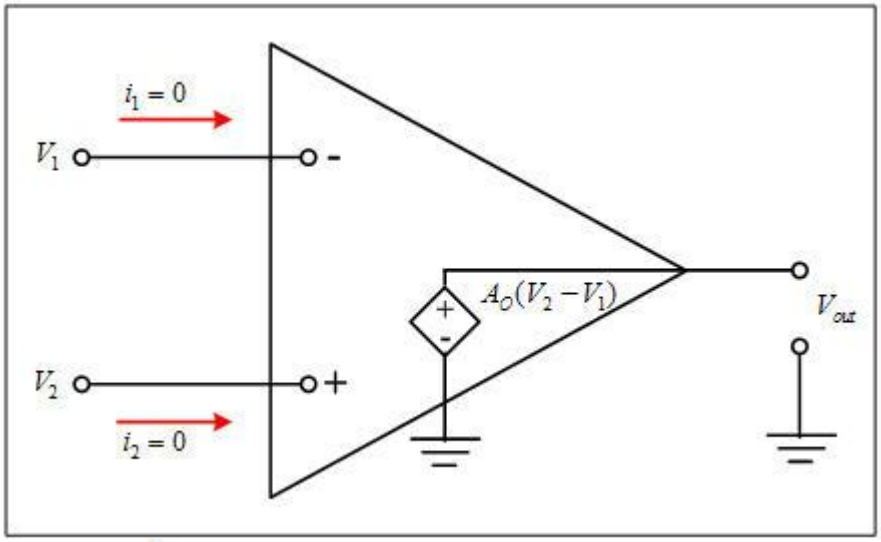
รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp)

จากในรูปที่ 1 จะเห็นถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของออปแอมป์นั้นจะมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ครับ คือ อินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าที่สูง ,เอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำ และอัตราขยายแรงดันจะมีค่าที่สูงมาก นั้นเองและถ้าดูจากลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) นั้นจะประกอบด้วยขาที่จะนำมาใช้งานดังต่อไปนี้ คือ

1. ขา Inverting ซึ่งเป็นขาอินพุตของออปแอมป์ โดยมีไว้เพื่อป้อนสัญญาณ ที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขา Inverting นี้ เราก็จะได้สัญญาณที่ตรงกันข้ามหรือกลับเฟสที่จะออกมาทางขา Output
2. ขา Non-Inverting ซึ่งเป็นขาอินพุตของออปแอมป์ โดยมีไว้เพื่อป้อนสัญญาณ ที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขา Non-Inverting นี้ เราก็จะได้สัญญาณที่ไม่กลับเฟสหรืออินเฟสที่จะออกมาทางขา Output
3. ขา Output ซึ่งเป็นขาเอาท์พุตของออปแอมป์ โดยมีไว้เพื่อบอกถึงสภาวะการทำงานของออปแอมป์ ซึ่งจะ

เกิดขึ้นจากการที่เราทำการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์
4. ขา +V ซึ่งเป็นขาป้อนไฟบวก โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ 9 V ถึง 18 Vซึ่งโด ยทั้วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ 15 V ครับ
5. ขา -V ซึ่งเป็นขาป้อนไฟลบ โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ -9 ถึง -1 V 8 V ซึ่งโดยทั้วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ -15 V ครับ

แต่ในส่วนของการที่จะนำอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) ไปใช้งานและมีการใช้งานที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น เราจะต้องทำความเข้าใจในคุณสมบัติของออปแอมป์ดังต่อไปนี้ คือ คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งก็สามารถที่จะเขียนวงจรสมบูรณ์ได้ดังในรูปที่ 2



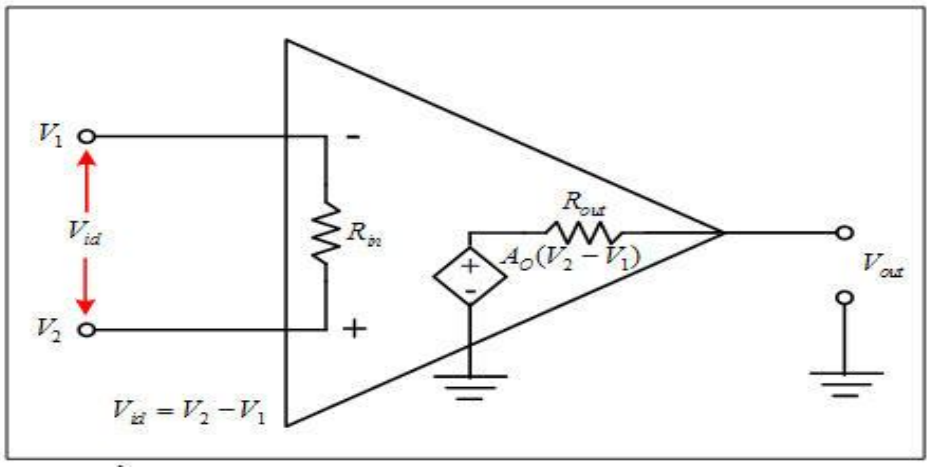
รูปที่ 2 ลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในอุดมคติ

จากรูปที่ 2 จะเป็นลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งถ้าพิจารณาดูแล้วก็จะเห็นว่าขาบวก (+) และขาลบ(-) นั้นต่อไม่ครบวงจร จึงส่งผลให้กระแส และกระแส นั้นไม่ส ามารถที่จะไหลออกจาก และได้นั้นเอง ซึ่งก็หมายความว่าค่าของกระแสที่ไหลเข้าขาอินพุทของออปแอมป์ทั้งสองขานั้นมีค่าเป็นศูนย์นั้นเอง หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่มีกระแสที่ไหลเข้าที่ขาอินพุทของออปแอมป์ครับ และถ้าเราพิจารณาถึงค่าของความต้านทานที่ขาอินพุทของออปแอมป์ หรือค่าความต้านทานอินพุทก็จะพบว่ามันจะมีค่าเป็นอนันต์ และในส่วนของอัตราขยายแรงดันลูปเปิด หรือที่เราเรียกว่า (Open-Loop-Gain :) ก็จะมีค่าเป็นอนันต์ และค่าความต้านทานเอาท์พุทนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์นั้นเอง ซึ่งทั้งหมดที่ได้กล่าวนี้ก็คือออปแอมป์ในอุดมคติ

แต่ในทางปฏิบัตินั้นมันไม่ได้เป็นไปตามคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคตินะครับ เพราะว่าเราสามารถที่จะทำการสร้างหรือออกแบบออปแอมป์ในอุดมคติได้ แต่เราสามารถที่จะสร้างและออกแบบออปแอมป์ที่จะนำมาใช้งานจริงให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับออปแอมป์ในอุดมคติได้ ซึ่งก็ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่จะนำมาใช้งานจริงกับออปแอมป์ในอุดมคตินั้นเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์หลายตัวครับที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ออปแอมป์ที่เราจะต้องนำไปใช้พิจารณาในการออกแบบวงจรต่อไป

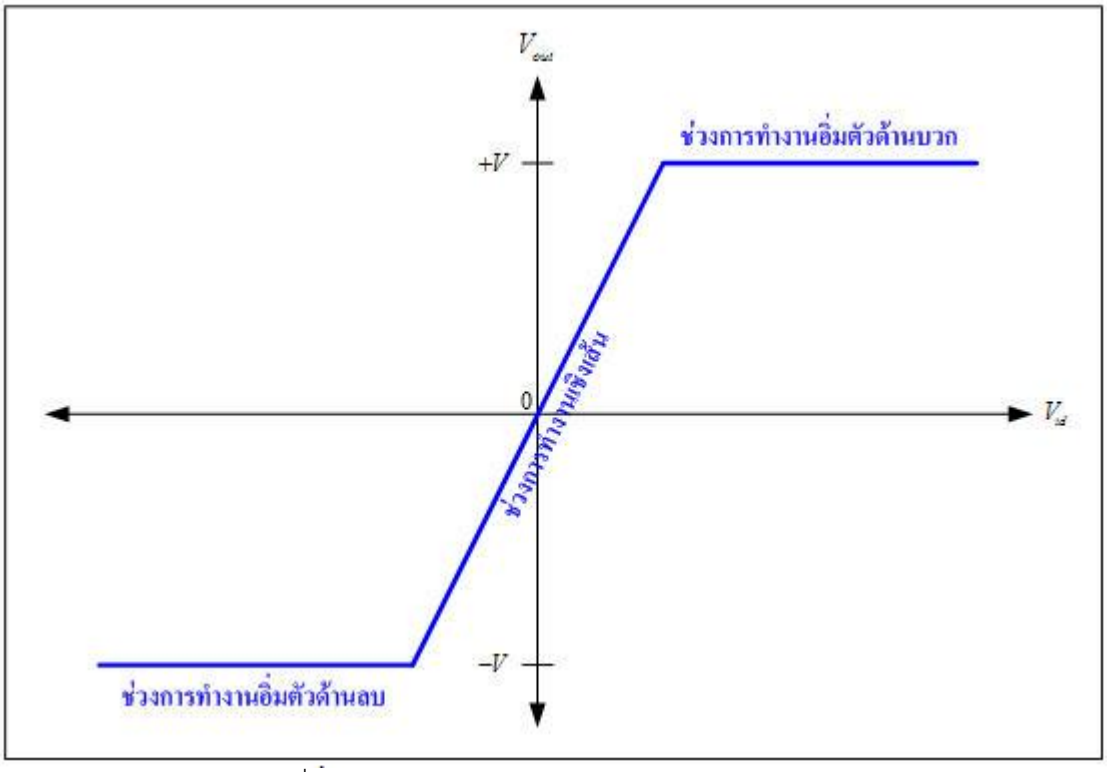
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้งานจริงกับออปแอมป์ในอุดมคติ

ของออปแอมป์	ในอุดมคติ	เบอร์ UA741	เบอร์ LF351
อัตราขยายแรงดันลูปเปิด : A_O	∞	200,000	300,000
ต้านทานอินพุท : R_{in}	∞	$1M\Omega$	$1\times10^{12}\Omega$
ความต้านทานเอาท์พุท : R_{out}	0	75Ω	100Ω
ช่วงความถี่แบนด์วิดท์ : BW	∞	$1MHz$	$4MHz$
แรงดันออฟเซทอินพุท : V_{io}	0	$1mV$	$5mV$
กระแสออฟเซทอินพุท : I_{io}	0	$1nA$	$25pA$
อัตราสลูว์ : S_R	∞	$0.5V/\mu S$	$13V/\mu S$



รูปที่ 3 ลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในการใช้งานจริง

และจากรูปที่ 3 ก็จะเป็นลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในการใช้งานจริง ซึ่งถ้าพิจารณาดูแล้วก็จะเห็นว่าภายในนั้นก็จะมีตัวต้านทานทางด้านอินพุท และตัวต้านทานทางด้านเอาท์พุท ต่ออยู่ด้วยครับ ซึ่งก็จะมีค่าอยู่ค่าหนึ่ง โดยที่ออปแอมป์แต่ละเบอร์นั้นก็จะมีค่าดังกล่าวนี้แตกต่างกันไปครับ ดังเช่นที่ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้งานจริงกับออปแอมป์ในอุดมคติ ไว้ในตารางที่ 1 นั้นเอง

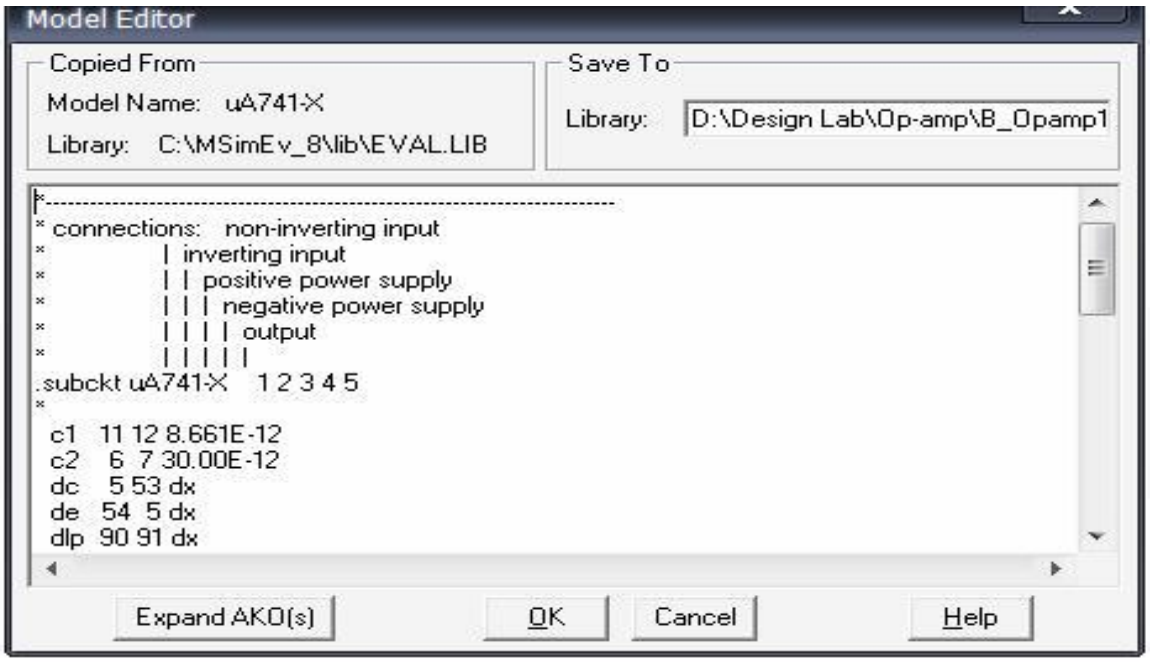


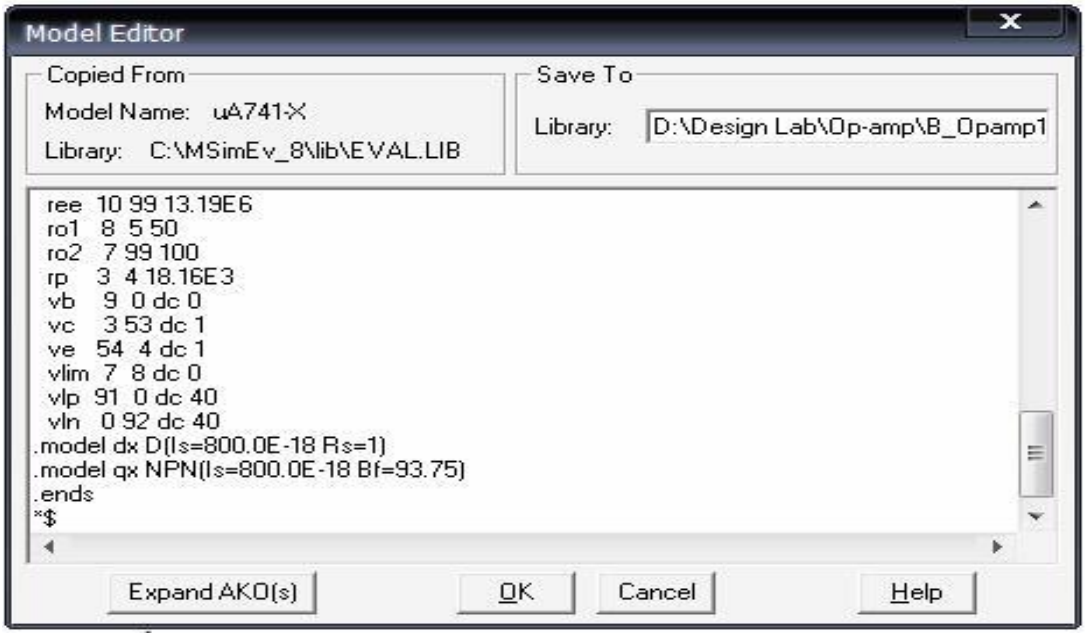
รูปที่ 4 กราฟแสดงช่วงการทำงานของออปแอมป์

จากรูปที่ 4 นั้นจะเป็นกราฟที่แสดงถึงช่วงการทำงานของออปแอมป์ โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงการทำงานด้วยนะครับ คือ

- ช่วงการทำงานในสภาวะอิ่มตัวด้านบวก หรือเรียกว่า (Positive Saturation)
- ช่วงการทำงานในสภาวะอิ่มตัวด้านลบ หรือเรียกว่า (Negative Saturation)
- ช่วงการทำงานในสภาวะเชิงเส้น หรือเรียกว่า (Linear Region)

ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อที่จะได้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์บ้างส่วนของออปแอมป์ครับ



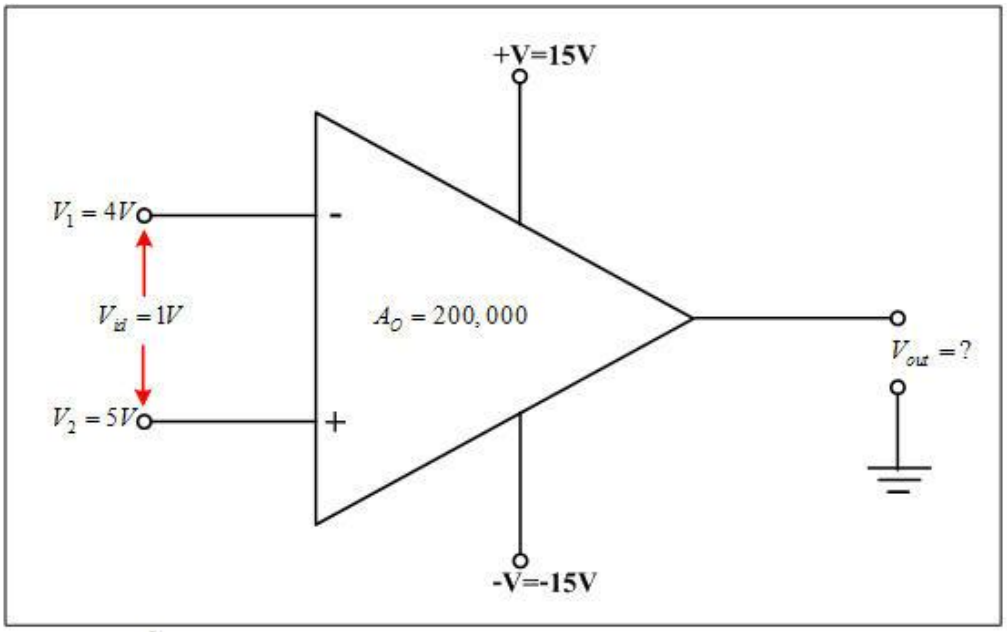


รูปที่ 5 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์บ้างส่วนของออปแอมป์ เบอร์ UA741

- พื้นฐานการคำนวณอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp)

ในหัวข้อนี้เราจะขอกล่าวถึงพื้นฐานการคำนวณที่สำคัญๆ ของตัวอุปกรณ์ออปแอมป์ (Op-Amp) นะครับ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นนะครับ ซึ่งในส่วนแรกนี้จะขอกล่าวถึงการคำนวณหาค่าต่างๆ ที่สำคัญของอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) มาดูกันเลยนะครับ

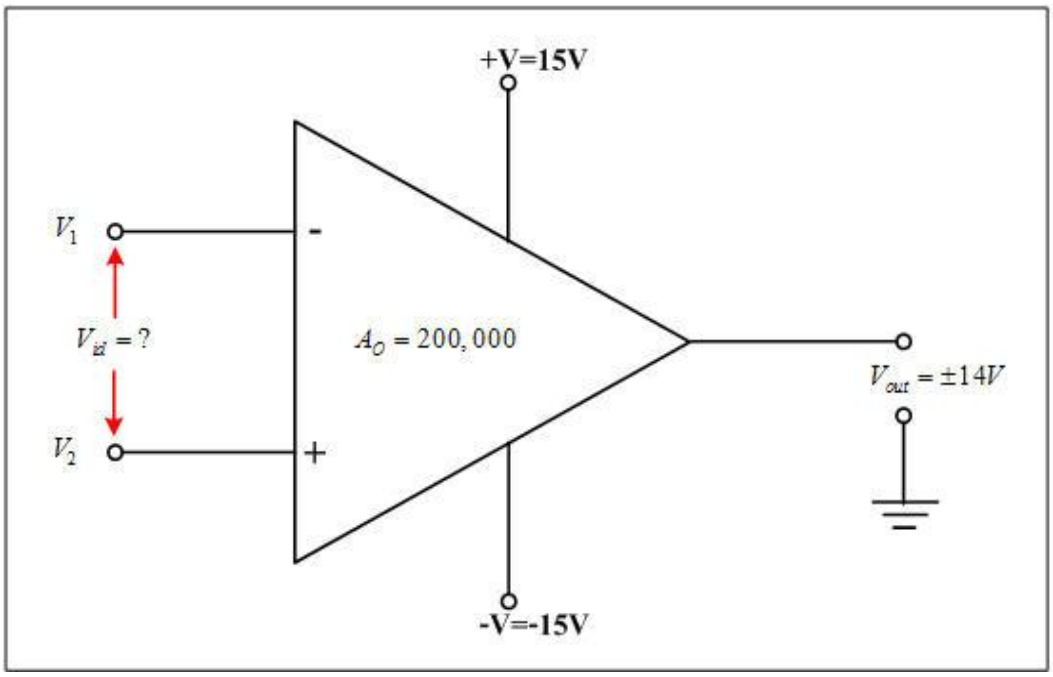
จากสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) มีข้อมูลดังต่อไปนี้ก็จะสามารถแสดงวิธีการคำนวณหาค่าแรงดันเอาท์พุท ได้ดังนี้ครับ ดังแสดงใน รูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการคำนวณหาค่าแรงดันเอาท์พุท ของอุปกรณ์ออปแอมป์

จากการคำนวณก็จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาท์พุท ที่ได้นั้นมีค่าสูงมากครับ คือ 200,000V ซึ่งไม่มีทางเป็นไปได้ครับ เพราะว่าแรงดันเอาท์พุท ที่จะได้ออกมานั้นไม่มีทางมากไปกว่าแรงดัน และ ดังนั้นก็สามารถที่จะสรุปได้ว่าค่าแรงดันเอาท์พุท นั้นจะมีค่าประมาณ นั้นเองครับ

และในส่วนที่สองนี้ก็จะขอกล่าวถึงการคำนวณหาค่าแรงดันระหว่างขาอินพุท ซึ่งจากสมการที่ 2 ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp) มีข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 7 แสดงการคำนวณหาค่าแรงดันระหว่างขาอินพุท ของอุปกรณ์ออปแอมป์

จากการคำนวณก็จะเห็นได้ว่าถ้าอุปกรณ์อุปกรณ์ออปแอมป์ มีค่าแรงดันระหว่างขาอินพุท เท่ากับ ก็จะทำให้เราได้ค่าแรงดันเอาท์พุท ออกมามีค่าเท่ากับ ได้นั้นเองครับ ซึ่งการที่จะนำออปแอมป์ไปใช้งานนั้นต้องเข้าใจถึงการทำงานของตัวออปแอมป์นะครับ เพื่อที่จะได้นำออปแอมป์ไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นเองครับ

- พื้นฐานการออกแบบวงจรด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์(Op-Amp)

ในส่วนของหัวข้อนี้ก็จะขอกล่าวถึงพื้นฐานการออกแบบวงจรด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์ (Op-Amp) นะครับ โดยจะได้นำเอาหลักการทำงานและคุณสมบัติของอุปกรณ์ออปแอมป์ (Op-Amp) ที่กล่าวไว้ในตอนต้นมาใช้ในการสร้างวงจรต่างๆ กันดูนะครับ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในอุปกรณ์ออปแอมป์ (Op-Amp) นี้มากขึ้นนะครับ มาดูกันเลยนะครับ

วงจรที่จะขอกล่าวก็คือวงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower) ,วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) และวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส(Non-Inverting Amplifier) มาดูกันเลยนะครับ

- การออกแบบวงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower) มีวิธีการออกแบบดังนี้

จากรูปวงจรดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นวงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower) ซึ่งในการออกแบบวงจรนี้

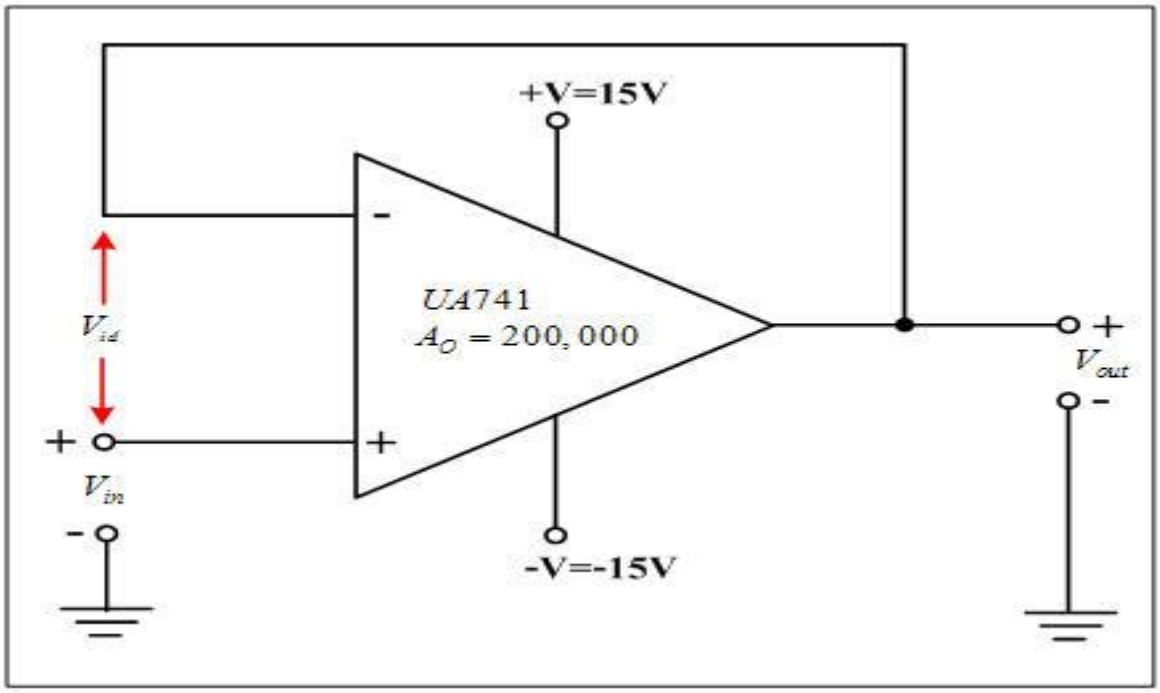
จะขอกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

กำหนดให้ - แรงดัน ที่ป้อนให้วงจรมีค่าเท่ากับ

- แรงดันอินพุท ที่ป้อนให้วงจรมีค่าเท่ากับ

- และวงจรนี้ใช้ออปแอมป์(Op-Amp) เบอร์ UA741

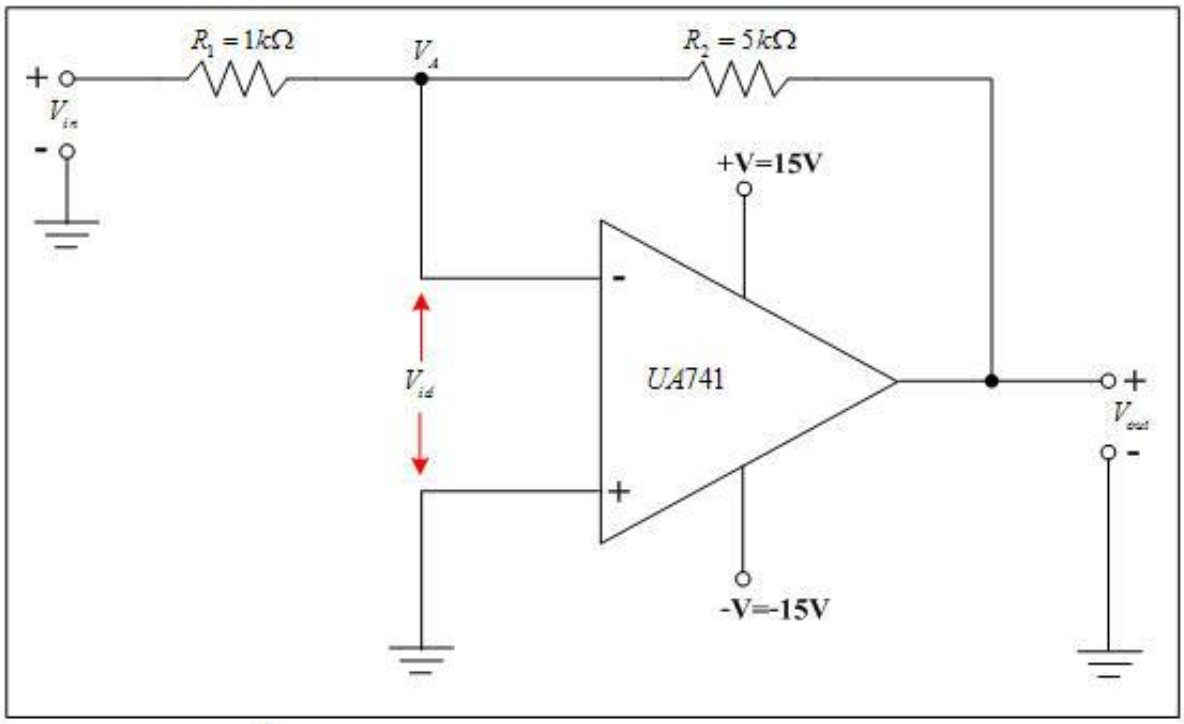
ซึ่งจากข้อมูลที่กำหนดให้มานั้นเราจะทำการหาค่าแรงดันเอาท์พุท ที่จะได้จากวงจรว่ามีค่าเท่าไรครับ



รูปที่ 8 วงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower)

มาเริ่มการวิเคราะห์วงจรที่จะออกแบบกันเลยนะครับ เพื่อให้ได้สูตรที่จะใช้ในการคำนวณต่อไปครับ ซึ่งถ้าดูจากวงจรในรูปที่ 8 เราก็จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันทางด้านเอาท์พุทนั้นจะถูกป้อนกลับเข้ามาที่ขา Inverting หรือขา ของออปแอมป์ทางด้านอินพุทครับ โดยจะเห็นว่าออปแอมป์ที่เราใช้นี้เป็นออปแอมป์เบอร์ UA741 ซึ่งจะมีค่าอัตราขยายแรงดันลูปเปิด เท่ากับ 200,000 นั้นเองครับ โดยในที่นี้จะกำหนดให้แรงดันอินพุท มีค่าเท่ากับ โดยที่ค่าแรงดันเอาท์พุท นั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้ค่าแรงดันระหว่างขาอินพุทนั้นมีค่าเป็น และก็จะทำให้แรงดันอินพุทนั้นมีค่าเท่ากับแรงดันเอาท์พุทนั้นเอง

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส(Inverting Amplifier) มีวิธีการออกแบบดังนี้

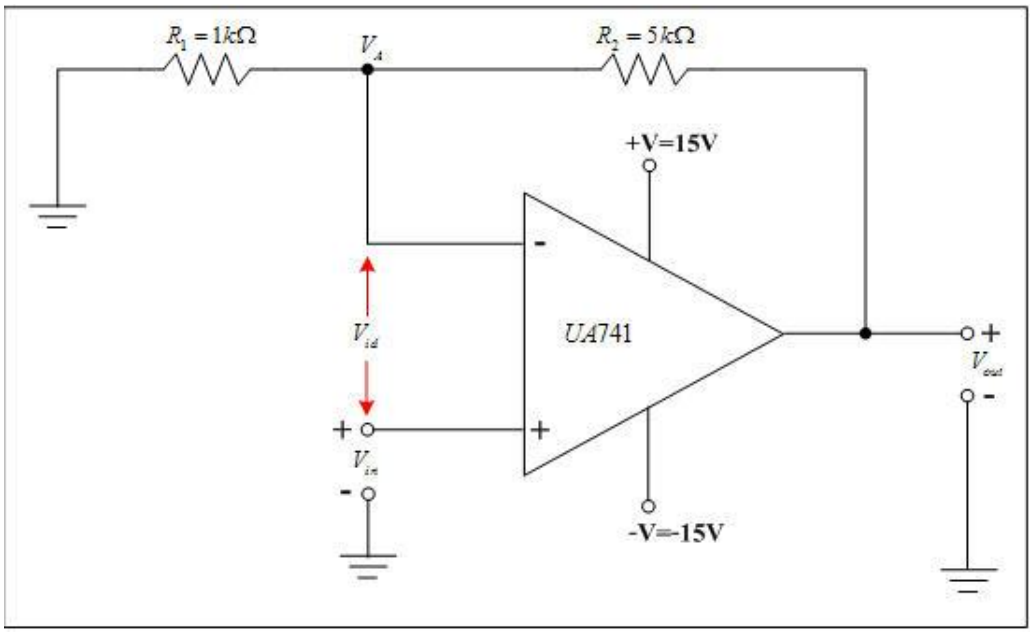


รูปที่ 9 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

จากรูปวงจรดังแสดงในรูปที่ 9 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ซึ่งในการออกแบบวงจรนี้จะขอกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ ซึ่งจากข้อมูลที่กำหนดให้มานั้นเราจะทำการหาค่าแรงดันเอาท์พุท ที่จะได้จากวงจรว่ามีค่าเท่าไรครับ มาเริ่มการวิเคราะห์วงจรที่จะออกแบบกันเลยนะครับ เพื่อให้ได้สูตรที่จะใช้ในการคำนวณต่อไปครับ ซึ่งถ้าดูจากวงจรในรูปที่ 9 เราก็จะเห็นว่าวงจรนี้จะให้สัญญาณแรงดันที่กลับเฟสนั้นเองครับ โดยสัญญาณแรงดันทางด้านเอาท์พุทนั้นจะมีความต่างเฟสไปจากสัญญาณแรงดันทางด้านอินพุทอยู่ 180 องศานั้นเองครับ และถ้าพิจารณาที่ขั้วแรงดัน ก็จะพบว่ามีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ครับ และในส่วนของตัวต้านทาน และตัวต้านทาน นั้นก็จะทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งค่าแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างค่าแรงดันเอาท์พุท กับค่าแรงดันอินพุท นั้นเอง - การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส(Non-

Inverting Amplifier

มีวิธีการออกแบบดังนี้

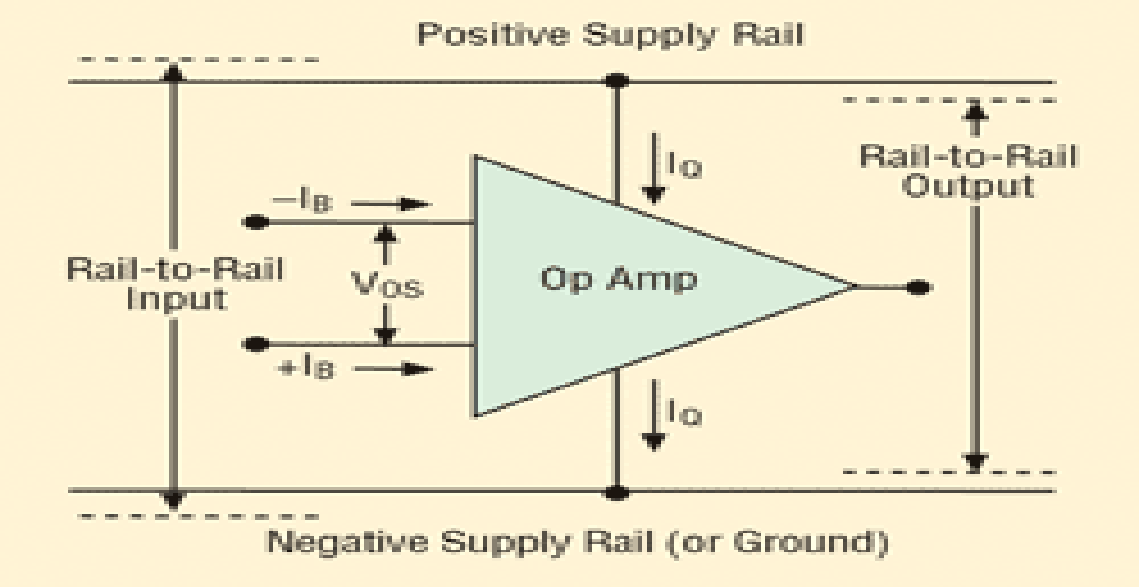


รูปที่ 10 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส(Non-Inverting Amplifier)

จากรูปวงจรดังแสดงในรูปที่ 10 เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) ซึ่งในการออกแบบวงจรนี้จะขอกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

เทคนิคการเลือกใช้ ออปแอมป์

ออปแอมป์ (Op-Amp) เป็นอุปกรณ์ที่จะพบเห็นได้ทั่วไปในส่วนวงจรอะนาล็อกของหลายๆระบบ ออปแอมป์ในปัจจุบันมีให้เลือกใช้มากมายจนตาลาย เมื่อนักออกแบบจะเลือกออปแอมป์มาใช้สักตัว ก็ต้องลดจำนวนตัวเลือกลงโดยพิจารณาจากเกณฑ์ หรือคุณสมบัติบางประการ แต่คุณสมบัติของออปแอมป์นั้น มีเคล็ดลับและเทคนิคในการเลือกอยู่ ซึ่งถ้าเลือกผิดอาจจะทำให้ได้ตัวเลือกที่ไม่ดีพอ หรือผิดพลาดไปเลย



Micropower

ออปแอมป์ชนิดกินกำลังไฟต่ำ (Low-power) ที่มีการกินกระแสในสภาวะปกติ (quiescent current) ประมาณ 1 A หรือต่ำกว่านี้ เป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการประหยัดพลังงาน หรือพวกที่ใช้แบตเตอรี่

หากพิจารณาในแง่ของการประหยัดพลังงาน โดยการทำให้กระแสในสภาวะปกตินั้นต่ำ ความต้านทานป้อนกลับ (feedback resistor) จะเลือกใช้กันที่ค่าสูงๆ ในย่านเมกะโอห์ม (megaohm) เลยทีเดียว ซึ่งผลข้างเคียงคือ สัญญาณรบกวนสูงขึ้น และความแม่นยำต่ำลง (accuracy)

นอกจากนั้นแล้ว ออปแอมป์ ที่โฆษณาว่าประหยัดพลังงานแบบสุดๆ ทั้งหลาย (ultra-low-supply-current) มักจะมีการตอบสนองที่ช้ามากๆ มีแบนด์วิดท์ต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับสัญญาณช้าๆ หรือความถี่ต่ำ มากกว่า นักออกแบบจะต้องระวังไว้ว่า เนื่องจากการที่มันกินพลังงานต่ำ พลังงานที่มันจะจ่ายได้ (output current) ก็ย่อมจะต่ำลงตามไปด้วย รวมถึงค่าประจุของโหลดที่สามารถขับได้ (capacitive load) ก็จะต่ำลงไปด้วยเช่นกัน

ยิ่งไปกว่านั้น นักออกแบบต้องระวังเรื่องระดับสัญญาณรบกวนด้วย เพราะสัญญาณรบกวนในออปแอมป์กำลังงานต่ำนั้นเยอะ ไม่เหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงเอาซะเลย

ทางเลี่ยงสำหรับการใช้งานในวงจรที่ต้องการความแม่นยำและเที่ยงตรงสูง และต้องการพลังงานต่ำ คือการปิดๆเปิดๆออปแอมป์ โดยใช้ขา Enable หรือ Shutdown ของตัวไอซี เพื่อการประหยัดพลังงาน และสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของออปแอมป์ได้อีกหลายปีด้วย

Bandwidth

การแลกเปลี่ยนแบบได้อย่างเสียอย่าง ระหว่าง ความเร็ว และ ประหยัดพลังงาน นั้นเกิดขึ้นในหลายๆจุดของการออกแบบวงจร รวมถึงการเลือกใช้ ออปแอมป์ด้วย โดยทั่วไปแล้ว ออปแอมป์ต้องการพลังงานมากเพื่อที่จะตอบสนองความถี่ในช่วงกว้างขึ้น แต่ถึงอย่างไร ก็มีช่วงความถี่ให้เลือกหลากหลาย สำหรับช่วงการกินกระแสปกติ (quiescent current) ที่นักออกแบบต้องการ

ออปแอมป์บางตัว จะมีการชดเชยอัตราส่วนของ ความเร็ว และ พลังงาน ที่ดีมาก แต่อาจจะมีข้อเสียแอบแฝง การปรับปรุงหรือชดเชยอัตราส่วนของ ความเร็ว/พลังงาน จะถูกแลกด้วยความสามารถในการขับค่าประจุของโหลด (capacitive load) ต่ำลง

วิธีหนึ่งที่ผู้ออกแบบไอซีทำเพื่อจะเพิ่มอัตราส่วนของ ความเร็ว/พลังงาน โดยการชดเชย (decompensated) ในการออกแบบไอซีออปแอมป์ สามารถบ่งบอกว่าไอซีตัวไหนมีการออกแบบแบบ decompensated ได้โดยดูที่คุณลักษณะในส่วนของ อัตราขยายต่ำสุดที่เสถียร (minimum stable gain) หรือคำพูดในดาต้าชีทที่สื่อทำนองนี้ เช่น "for G > 3"

ออปแอมป์ชนิดนี้จะให้ผลได้ดีที่สุด ถ้าถูกใช้งานในวงจรที่มีอัตราขยายเท่ากับ หรือสูงกว่า อัตราขยายต่ำสุดที่กำหนดไว้ แต่ก็มีข้อควรระวัง การใช้ตัวเก็บประจุป้อนกลับ (feedback capacitor) เพื่อที่จะควบคุมแถบความถี่ที่ตอบสนอง จะส่งผลให้ออปแอมป์มีอัตราขยายเป็นหนึ่ง เมื่อทำงานที่ความถี่สูง และอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรได้

วงจรชนิดพิเศษ เช่น วงจรกรองความถี่ หรือวงจรที่มีการป้อนกลับซับซ้อน (feedback networks) แบบแปลกๆ อาจจะไม่เสถียรเมื่อใช้ออปแอมป์ชนิด decompensated หากว่าเราไม่แน่ใจก็สามารถทดสอบได้กับสัญญาณพัลส์ (pulse) ถ้ามีการสั่นของเอาท์พุตมากเกินไป ควรพิจารณาเลือกออปแอมป์อัตราการขยายเป็นหนึ่ง (unity gain) ทั่วๆไปแทน

Rail-to-rail op amps

rail-to-rail คือระดับแรงดันตั้งแต่ระดับไฟเลี้ยงด้านลบ จนถึงระดับไฟเลี้ยงด้านบวกเลย นักออกแบบมักจะถามหาคุณสมบัติแบบ rail-to-rail เมื่อเลือกใช้ออปแอมป์ มันเป็นทางเลือกที่ค่อนข้างเห็นบ่อย เนื่องจากในอุปกรณ์หลายๆประเภท ต้องการให้มีสัญญาณออกที่มีช่วงกว้างของระดับแรงดันสูงที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้ว บางวงจรอาจจะไม่ต้องการให้ช่วงแรงดันกว้างเท่ากับไฟเลี้ยงก็ได้ นอกจากนั้นยังอาจมีผลเสียต่อวงจรได้อีกด้วย

คำว่า rail-to-rail สื่อความหมายว่า ออปแอมป์ตัวนั้นมีความสามารถในการรับระดับสัญญาณเข้าได้กว้าง และขับสัญญาณออกได้กว้าง สำหรับ **Rail-to-rail output** นั้นมีความหมายเป็นเชิงประมาณ ไม่มีมาตรฐานอุตสาหกรรมใดๆมากำหนด ว่า rail-to-rail output ควรจะขับแรงดันได้กว้างเท่าไหร่ เพราะมันขึ้นอยู่กับโหลด แรงดันขาออกของ rail-to-rail output อาจแกว่งอยู่ในช่วงไม่กี่มิลลิโวลท์ ถึงหลายร้อยมิลลิโวลท์ จากระดับไฟเลี้ยง

ออปแอมป์บางตัว ทำมาเพื่อการใช้งานที่แรงดันสูง อาจจะมีการแกว่งของแรงดันขาออกประมาณ 1V จากระดับไฟเลี้ยงได้ ขอให้พิจารณาดาต้าชีทให้ดีๆ มองไปมากกว่าแค่ 'ราคาคุย' ในส่วนแรกหรือหน้าปกของดาต้าชีท เพื่อให้ได้รู้ความกว้างของการแกว่งของแรงดันขาออก สำหรับสภาวะโหลดที่ต้องการ

อีกอย่างที่ควรระวัง คือการที่ผู้ผลิตใช้วิธีการทดสอบไอซีที่แตกต่างกัน บางรายใช้วิธี กระแทกกระทั้น เพื่อจะวัดการแกว่งของแรงดันขาออก ในการทดสอบแบบนี้ ออปแอมป์จะถูกขับด้วยแรงดันที่เกินขนาด (overdriven) เพื่อให้ได้แรงดันขาออกสูงสุด

ออปแอมป์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในกับสัญญาณความละเอียดสูง (precision signal) จะรับรองให้ได้ค่าอัตราการขยายแบบเปิดวงจร (open-loop gain) ที่ดีในระหว่างการทดสอบการแกว่งของแรงดันขาออก ซึ่งสิ่งนี้ทำให้แน่ใจได้ว่า สัญญาณที่แม่นยำและไม่บิดเบียนจะถูกส่งผ่านมาที่ขาออก ในสภาวะแรงดันที่ใกล้กับระดับไฟเลี้ยง

สำหรับ Rail-to-rail input นั้นหมายถึงว่า สัญญาณขาเข้าสามารถเป็นเท่าไหร่ก็ได้ระหว่างระดับแรงดันไฟเลี้ยงทั้งบวกและลบ (หรืออาจจะน้อยกว่า 100mV จากไฟเลี้ยง) rail-to-rail input นี้มักจะเป็นที่ต้องการในกรณีที่อัตราการขยายเป็น 1 หรือบัฟเฟอร์นั่นเอง มันไม่จำเป็นสำหรับวงจรอัตราขยายที่มากกว่าหนึ่ง ส่วนวงจรขยายกลับขั้ว (inverting amplifier) นั้น ไม่ต้องการ rail-to-rail input

การทำงานที่แรงดันต่ำ (Low-voltage operation)

การทำงานที่แรงดันต่ำเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาอย่างมาก สัญญาณแรงดันที่แกว่งแม้เพียงมิลลิโวลท์จะมีผลกระทบมาก ออปแอมป์ที่ไม่ใช่ rail-to-rail จะต้องเลือกให้ดี เพราะอาจจะทำให้ช่วงการทำงานนั้นแคบเกินไป ช่วงของแรงดัน การแกว่งของแรงดันขาออก อาจจะแตกต่างกันในแต่ละไอซี และแปรผันกับอุณหภูมิภายนอกด้วย

ความแม่นยำ (Precision)

ความแม่นยำมักจะถูกระบุไว้ในความต้องการของการออกแบบ ควรพิจารณาค่าออฟเซต (offset voltage) และการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของค่านี้ การผลิตไอซีให้ได้ค่าออฟเซตต่ำทำได้โดยกระบวนการปรับแต่งโดยเลเซอร์ในระหว่างการผลิต (Trimming) ควรพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนโดยรวมของค่าออฟเซตตามอุณหภูมิ เพื่อให้ได้การออกแบบที่ทนทานและมั่นคง ค่าออฟเซตเริ่มต้นที่ต่ำอาจจะเหมาะสมหรือไม่เหมาะสมก็ได้ แล้วแต่ความต้องการของค่าเบี่ยงเบนอัตราขยาย (amplifier drift) และช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน ออปแอมป์ที่ประกอบด้วย bipolar transistor ที่ขาเข้า มักจะมีค่าแรงดันออฟเซตและค่าเบี่ยงเบนที่ดีกว่า ไอซีที่ผ่านกระบวนการปรับแต่ง (trim) ที่มีค่าออฟเซตต่ำ ก็อาจจะมีค่าเบี่ยงเบนต่ำไปด้วย แม้ว่าดาต้าชีทหลายตัวจะไม่บอกข้อมูลด้านการผลิต แต่เราสามารถสังเกต bipolar input ได้จากการที่มันมีกระแสไบอัสขาเข้าที่มากกว่า ปกติแล้วจะประมาณ 1nA หรือมากกว่า ไอซีแบบที่เป็น CMOS input โดยส่วนมากแล้วจะมีกระแสไบอัสขาเข้าในช่วง 10-100 pA สำหรับความแม่นยำสูงมากๆ ออปแอมป์แบบ auto-zero หรือ chopper จะ

ทำให้ได้ค่าออฟเซตและค่าเบี่ยงเบนที่ต่ำมาก เนื่องจากมันใช้เทคนิคที่ปรับแต่งความสมดุลย์ภายในตลอดเวลา มันสามารถคงค่าออฟเซตที่ใกล้เคียงศุนย์ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และยังเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอายุการใช้งานอีกด้วย

ที่มาของออฟเซตอีกแหล่งคือกระแสไบอัสขาเข้า บ่อยครั้งที่จะเข้าใจผิดว่ามันเป็น input impedance ความจริงแล้วประเด็นคือ การมีกระแสขนาดเล็กไหลเข้ามาที่อินพุตกระแสไบอัสขาเข้า คือกระแสขนาดเล็กที่ไหนเข้าหรือออกจากขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ ไหลผ่านตัวต้านทานของแหล่งจ่าย และป้อนกลับมาจนครบวงจร ทำให้เกิดแรงดันออฟเซตและการเบี่ยงเบนได้

ออปแอมป์แบบ CMOS และ FET input สามารถลดค่ากระแสไบอัสขาเข้านี้ได้ จนใกล้เคียงกับระดับที่ไม่มีผลกระทบต่อวงจรปกติ อาจจะมีผลแต่กับวงจรที่มีค่า impedance สูงมากเป็นพิเศษเท่านั้น แต่ก็ต้องพิจารณาเรื่องอุณหภูมิด้วยเช่นกัน เนื่องจากกระแสไบอัสขาเข้าของออปแอมป์แบบ CMOS และ FET นี้จะเพิ่มขึ้นแบบ exponential ตามอุณหภูมิ (เท่าตัวทุกๆ 10C) ให้ดูกราฟกระแสไบอัสขาเข้าเทียบกับอุณหภูมิในดาต้าชีท

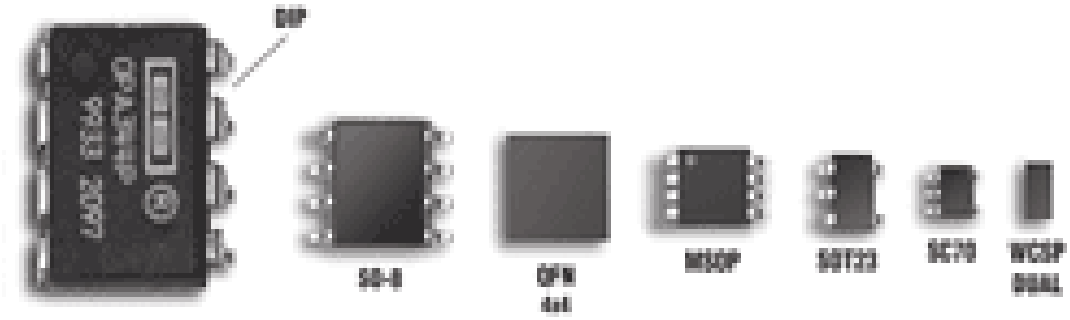
สัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise)

วงจรประสิทธิภาพสูงส่วนใหญ่แล้วจะต้องการให้มีสัญญาณรบกวนต่ำ นักออกแบบมักจะมุ่งเน้นไปที่ค่าสัญญาณรบกวนเพียงตัวเดียว คือแรงดันรบกวน โดยคิดว่านั่นคือแหล่งกำเนิดตัวหลักของสัญญาณรบกวนการขยาย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพสัญญาณรบกวนโดยรวมนั้น เกิดจากการรวมของแหล่งสัญญาณรบกวนหลายตัว ทั้งแรงดันรบกวน และกระแสรบกวน กระแสรบกวนของออปแอมป์นั้นก่อให้เกิดแรงดันรบกวนเมื่อมันไหลผ่านความต้านทานภายในวงจร นอกจากนั้น ในตัวความต้านทานต่างๆ ยังมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิภายใน ซึ่งแปรผันตามรากที่สองของค่าความต้านทานนั้น

การแสวงหาสัญญาณรบกวนให้ต่ำอาจทำให้คุณหลงทางได้ ออปแอมป์ที่มีสัญญาณแรงดันรบกวนต่ำๆนั้นจะเป็น bipolar input (ไม่ใช่แบบ CMOS หรือ FET input) ซึ่งมีผลที่ตามมาคือมันมีกระแสรบกวนที่สูงกว่า การจะใช้ประโยชน์จากการมีสัญญาณรบกวนแรงดันต่ำ คือต้องออกแบบวงจรให้มีค่าความต้านทานต่ำๆ (low impedance)

Package types

ไอซีออปแอมป์มีทั้งแบบที่มีออปแอมป์ หนึ่งตัว สองตัว สี่ตัว หรือมากกว่า อยู่ในไอซีตัวเดียว การเปลี่ยนความต้องการในการออกแบบ อาจจะทำให้ต้องเปลี่ยนไอซี จำนวนไอซี และต้องจัดวางอุปกรณ์บนบอร์ดใหม่



ไอซี Package แบบใหม่ๆมีให้เลือกมากมาย เพื่อลดขนาดของบอร์ด

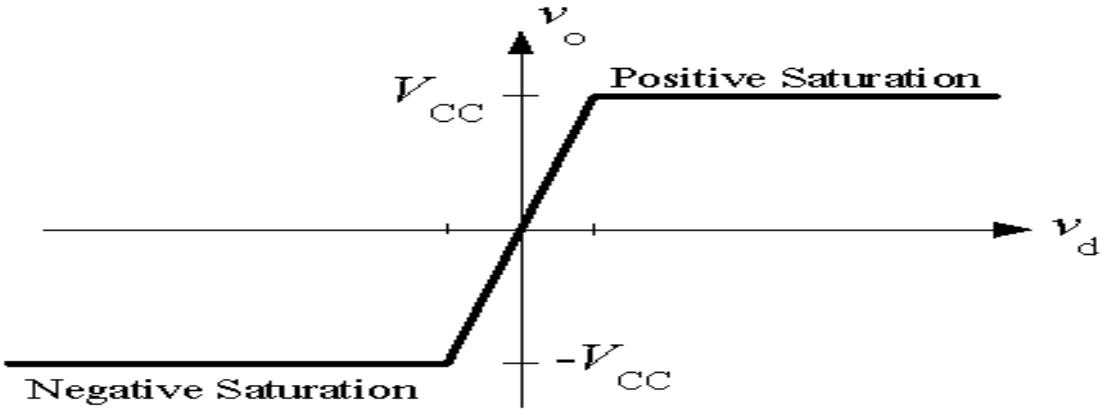
ออปแอมป์ในหลายๆตระกูล มีให้เลือกว่าจะมีออปแอมป์กี่ตัวในหนึ่งไอซี ข้อจำกัดของขนาดบอร์ดอาจทำให้คุณต้องสะดุดจากแผนที่วางไว้ ไอซีที่มีออปแอมป์สี่ตัว อาจจะดูว่าดี แต่การเดินลายทองแดงก็จะซับซ้อนกว่า

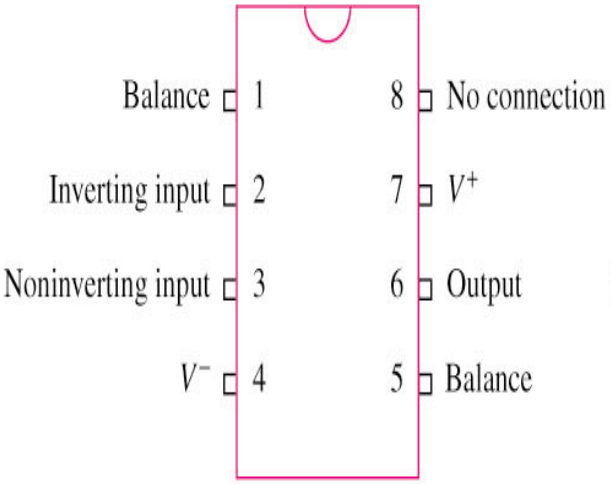
ไอซี Package แบบใหม่ๆมีให้เลือกมากมาย เพื่อลดขนาดของบอร์ด ออปแอมป์แบบเดี่ยวมีให้เลือกในแบบ SOT23 และเล็กกว่าคือ SC70 แบบคู่ก็มีในแบบ SOT-23-8 ในขณะที่แบบ WCSP นั้นยิ่งเล็กลงไปอีก ตรวจสอบความสามารถในการผลิตของคุณก่อนที่จะเลือกใช้ เพราะคุณอาจจะไม่สามารถประกอบไอซีตัวเล็กจิ๋วลงบอร์ดได้ทุกแบบ

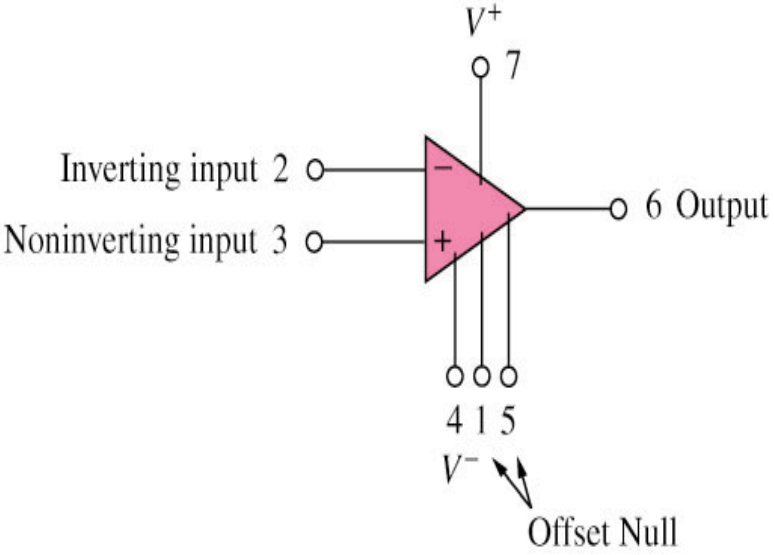
ออปแอมป์ (*Op-Amp, Operational Amplifier*)

อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ 3 ขา ที่มีการทำงานคล้ายกับแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (*Voltage-Controlled Voltage Source, VCVS*)
ออปแอมป์สามารถนำมาใช้ในการขยายสัญญาณ , รวมสัญญาณหรือนำมาทำเป็นตัวกระทำทางคณิตศาสตร์ อาทิเช่น

โวลเตจแอมปลิไฟเออร์
ซัมมิ่งแอมปลิไฟเออร์
อินทิเกรเตอร์ (Integrator)
ดิฟเฟอร์เรนทิเอเตอร์ (Differentiator)


v_o
V_{CC}
Positive Saturation
v_d
$-V_{CC}$
Negative Saturation


Balance 1
Inverting input 2
Noninverting input 3
V^- 4
8 No connection
7 V^+
6 Output
5 Balance


V^+
7
Inverting input 2
Noninverting input 3
6 Output
4 1 5
V^-
Offset Null

แบบฝึกหัด

1. ความหมายของออปแอมป์ ข้อใดถูกต้องที่สุด

- ก. วงจรขยายสัญญาณไฟสลับที่ใช้ในงานทั่วไป
- ข. วงจรขยายสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ในคอมพิวเตอร์
- ค. วงจรที่ทำงานในภาพขยายเสียงของเครื่องขยาย
- ง. วงจรขยายสัญญาณไฟตรงที่มีอัตราขยายสูงมาก

2. อุปกรณ์ประเภทวงจรรวม มีลักษณะข้อใดที่เหมาะสมที่สุด

- ก. มีตัวต้านทานต่อร่วมอย่างเดียว
- ข. มีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประกอบร่วม
- ค. มีหลอดสูญญากาศต่อร่วม
- ง. มีตัวเก็บประจุต่อร่วมอย่างเดียว

3. คุณสมบัติพิเศษของไอซีออปแอมมีลักษณะตามข้อใด

- ก. มีหลายขาใช้งาน
- ข. ใช้ขยายสัญญาณได้ 1 เท่า
- ค. เป็นไอซีที่ไม่เป็นเชิงเส้น
- ง. มีความต้านทานทางอินพุตสูงมาก

4. ไอซีดิจิตอลต่างจากไอซีอนาล็อกอย่างไร

- ก. ไอซีดิจิตอลสามารถเปรียบเทียบสัญญาณทางอินพุตได้
- ข. ไอซีดิจิตอลมีโครงสร้างภายในเป็นทรานซิสเตอร์
- ค. ไอซีดิจิตอลมีโครงสร้างภายในเป็นตัวต้านทาน
- ง. ไอซีดิจิตอลมีโครงสร้างภายในเป็นตัวเก็บประจุ

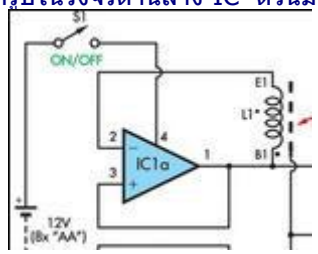
5. ออปแอมป์ จัดเป็นไอซีชนิดใด

- ก. ไอซีตีนตะขาบ
- ข. ไอซีดิจิตอล
- ค. ไอซีอนาล็อก
- ง. ไอซีคอนโทรลเลอร์

6. เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ไอซีชนิดใดเป็นส่วนประกอบวงจร

- ก ไอซีอนาล็อก
- ข. ไอซีดิจิตอล
- ค. ไอซีออปแอมป์
- ง. ไอซีตีนตะขาบ

7. จากรูปในวงจรด้านล่าง IC ตัวนี้มีกี่ขา



- ก. 1 ขา
- ข. 2 ขา
- ค. 3 ขา
- ง. 4 ขา

8. อุปกรณ์ที่ใช้พิมพ์วงจรเพื่อผลิตไอซีคืออะไร

- ก. ซิลิกอน
- ข. คาร์บอน
- ค เซรามิก
- ง. กระเบื้อง

9. โทรศัพท์เคลื่อนที่หรือที่เรียกว่าโทรศัพท์ถือปัจจุบันสามารถใช้งานได้หลายอย่างเช่น ทั้ง ดูหนัง ฟังเพลง เล่นเกม นักเรียนคิดว่าใช้ไอซีชนิดใดเป็นส่วนประกอบสำคัญ

- ก. ไอซีตีนตะขาบ
- ข. ไอซีอนาล็อก
- ค. ไอซีดิจิตอล
- ง. ไอซีออปแอมป์

10. เครื่องใช้ไฟฟ้าในข้อใดไม่มีไอซีเป็นส่วนประกอบของวงจร

- ก. โทรทัศน์
- ข. หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
- ค. เครื่องเล่นเกม
- ง. เครื่องอ่านบาร์โค้ด