บทที่ 8
วงจรป้อนกลับ

8.1 บทนำ

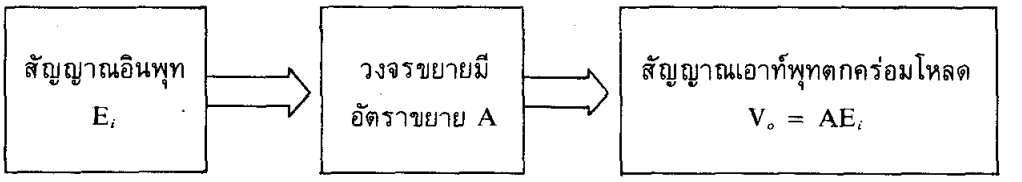
ธรรมชาติทั่วไปของวงจรขยาย จะมีอัตราขยายขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าในวงจร ถ้าปริมาณดังกล่าวมีการแปรค่า ย่อมก่อให้ลักษณะการทำงานของวงจรขยายแปรค่าไป วิธีการหนึ่งที่ใช้รักษาเสถียรภาพของวงจรขยายคือ ป้อนบางส่วนของสัญญาณเอาท์พุทให้กลับคืนสู่ด้านอินพุทของวงจรขยายเดียวกันนั้น จากนั้นจะเกิดผลอะไรขึ้น? คำตอบคือ เกิดการรวมคลื่นสัญญาณทางพีชคณิต ซึ่งมีทั้งการเพิ่มคลื่น เรียกเป็น "การป้อนกลับแบบบวก" (positive feedback) และการลดคลื่น เรียกเป็น "การป้อนกลับแบบลบ" (negative feedback)

ความสัมพันธ์ของปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ทางด้านอินพุทและเอาท์พุท คือ อัตราขยาย (กระแส หรือแรงดันไฟฟ้า) ความต้านทานส่งผ่าน (เป็นอัตราส่วนของ V_o/I_i) หรือความนำส่งผ่าน (คืออัตราส่วนของ I_o/V_i) ซึ่งรายละเอียดในบทนี้จะได้เสนอการหาค่าปริมาณต่าง ๆ ดังกล่าวทั้งในวงจรป้อนกลับแบบลบและแบบบวก อนึ่ง วงจรป้อนกลับแบบบวกนั้นมักเรียกเป็น "ออสซิลเลเตอร์" (oscillator) ซึ่งแยกได้เป็นหลายแบบ ขึ้นกับความต้องการใช้งาน

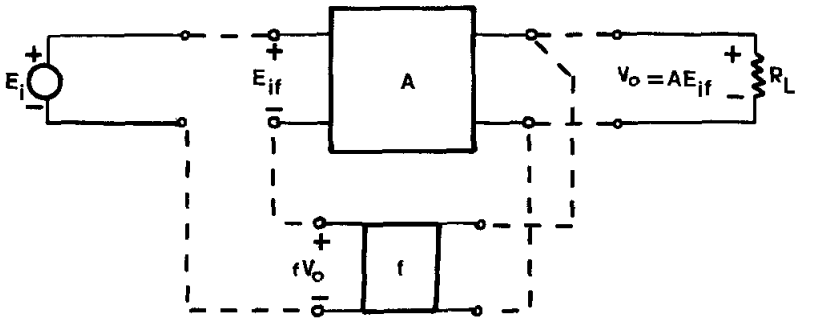
8.2 วงจรป้อนกลับแบบลบ

8.2.1 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจร

กำหนดใช้ตัวห้อย f แทนปริมาณการป้อนกลับของสัญญาณโดยทั่วไป แผนภาพการทำงานของวงจรขยายเป็นดังแสดงในรูป 8.1 ซึ่งสัญญาณอินพุทคือ E_i ป้อนเข้าในวงจรขยายซึ่งมีอัตราขยายเป็น A สัญญาณเอาท์พุทที่ตกคร่อมโหลด (ในขั้นพื้นฐาน คือ ตัวต้านทาน) คือ V_o มีขนาดเป็น AE_i การต่อวงจรป้อนกลับ เพื่อนำ**บางส่วน**ของสัญญาณเอาท์พุทกลับสู่ด้านอินพุทอีกครั้งหนึ่ง แสดงในรูป 8.2 โดยวงจรป้อนกลับต่อขนานกับโหลด จะเป็นตัวนำปริมาณ fV_o ป้อนกลับสู่ด้านอินพุท ซึ่งวงจรป้อนกลับต่ออนุกรมระหว่างต้นกำเนิดสัญญาณอินพุทและวงจรขยาย ดังนั้น สัญญาณอินพุทที่เกิดจากการป้อนกลับดังกล่าวมีค่าเป็น



รูป 8.1 โครงร่างส่วนประกอบของวงจรขยายทั่วไป



รูป 8.2 โครงร่างวงจรป้อนกลับ (f) ต่ออนุกรมด้านอินพุทและต่อขนานกับด้านเอาท์พุท ของวงจรขยาย (A)

$$E_{if} = E_i - fV_o \qquad \text{.....(8.1)}$$

และเอาท์พุทใหม่ $V_o = AE_{if}$ เขียนค่าได้เป็น

$$V_o = AE_{if} = A(E_i - fV_o) \qquad \text{.....(8.2)}$$

จากสมการ (8.2) จัดรูปให้เป็นปริมาณ $\frac{V_o}{E_i}$ ดังนี้

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{A}{1 + fA} = A_f \qquad \text{.....(8.3)}$$

โดยผลคูณ fA เป็นเกนที่ถูกป้อนกลับ แยกพิจารณาสมการ (8.3) ดังนี้

(1) ถ้า fA มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ จนสามารถละทิ้งค่านี้ได้ ดังนั้น A_f มีค่าใกล้เคียงกับ A และ E_i มีค่าใกล้เคียงกับ E_{if} เห็นได้ว่า กรณีนี้ ปริมาณป้อนกลับไม่มีผลต่อวงจรขยายเลย

(2) ถ้า fA มีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ สามารถเขียนสมการ (8.3) ได้ใหม่

$$A_f = \frac{V_o}{E_i} \sim \frac{1}{f} \qquad (fA >> 1) \qquad \text{.....(8.4)}$$

หรือ $fV_o \sim E_i \qquad (fA >> 1)$ .....(8.5)

จากสมการ (8.5) กล่าวได้ว่า สัญญาณอินพุทมีปริมาณใกล้เคียงกับส่วนป้อนกลับ ดังนั้นโดยทั่วไปจะทำให้ fA มีค่ามาก โดยให้ A มีค่ามาก จากนั้นหาค่า f โดยทราบค่า V_o/E_i

สิ่งที่ควรพิจารณาคือ

(1) ปริมาณสัญญาณอินพุทจะส่งผ่านไปด้านเอาท์พุทโดยตรง คือ ไม่ผ่านวงจรป้อนกลับจะมีหรือไม่? เพื่อความง่ายในการศึกษา กำหนดให้ปริมาณดังกล่าวมีค่าน้อยมาก (จนสามารถละทิ้งได้)

(2) วงจรป้อนกลับจะส่งผลใด ๆ ไปยังโหลดของวงจรขยายหรือไม่? กรณีนี้ถือว่าโหลดของวงจรป้อนกลับไม่มีผลต่อโหลดของวงจรขยาย

8.2.2 สัญญาณป้อนกลับในหน่วยเดซิเบล

ระดับของปริมาณสัญญาณป้อนกลับอาจแสดงในหน่วยเดซิเบล dB ซึ่งถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของเกนเมื่อมีการป้อนกลับ ต่อเกนเมื่อไม่มีการป้อนกลับ ดังนี้

$$dB = 20 \log \frac{A_f}{A} = 20 \log \frac{1}{1 + fA} \qquad \text{.....(8.6)}$$

(หาค่า A_f/A จากสมการ (8.3))

สมมุติ ค่า $A = 10^4$, $A_f = 99$ ดังนั้น สัญญาณป้อนกลับในหน่วยเดซิเบลคือ

$$dB = 20 \log \left(\frac{1}{101}\right) = -40 \text{ dB}$$

8.2.3 เสถียรภาพของการขยายเมื่อใช้การป้อนกลับสัญญาณ

ในการอธิบาย แยกพิจารณา ดังนี้

(1) การแปรค่าของอัตราขยาย อธิบายโดยทำการดิฟเฟอร์เรนจิเอต สมการ (8.3) ตลอดสมการ นั่นคือ

$$dA_f = \frac{dA}{(1 - fA)^2} \qquad \text{.....(8.7)}$$

(2) พิจารณาการแปรค่าในข้อ (1) เปรียบเทียบกับเกน A_f เดิมในสมการ (8.3) กล่าวคือเป็นการหาเศษส่วนที่แปรค่าของ A_f ซึ่งเกิดจาก A แปรค่า ทำโดยหารสมการ (8.7) ด้วยสมการ (8.3)

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + fA)} \cdot \frac{dA}{A} \qquad \text{.....(8.8)}$$

สมมุติ ถ้า A เพิ่มจาก 1000 เป็น 3000 และ $f = 0.01$

ดังนั้น $$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + (0.01)(3000)} \times 0.67 = 0.021$$

8.3 วงจรขยายภาคเดี่ยว

8.3.1 หลักการพื้นฐานในการประยุกต์ใช้วงจรป้อนกลับ

กำหนด f แทนสัญลักษณ์การป้อนกลับ สำหรับวงจรป้อนกลับแบบลบ ตัวแปรเอาท์พุท จะต้องมีปริมาณป้อนกลับตรงข้ามกับตัวแปรอินพุท (ทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า) เกนของการป้อนกลับมีค่าเป็น V_f ถ้าตัวแปรป้อนกลับมีค่าใกล้เคียงตัวแปรของด้านอินพุท จากสมการ (8.4) เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

f (ปริมาณเอาท์พุท) = (ตัวแปรป้อนกลับ) ~ (ตัวแปรอินพุท)

$$A_f = \frac{1}{f} \cdot \frac{\text{ตัวแปรเอาท์พุท}}{\text{ตัวแปรอินพุท}} \qquad \text{.....(8.9)}$$

ปัญหาคือ

(1) ตัวแปรอินพุท และเอาท์พุท เป็นปริมาณกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า?

(2) ปริมาณป้อนกลับ จะแทนด้วยตัวแปรกระแส หรือแรงดันไฟฟ้า?

เพื่อจะหาคำตอบ พิจารณาลักษณะการต่อวงจรป้อนกลับกับวงจรด้านอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งเป็นไปได้ 4 แบบ ถ้าต่อวงจรป้อนกลับให้**ขนาน**กับวงจรเอาท์พุท (อาจเป็นโหลดหรือเครื่องขยายอีกตัวหนึ่ง) เลือกใช้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_o ซึ่งถือว่ามีค่าคงที่ และ fV_o เป็นตัวแปรป้อนกลับ

ถ้าต่อวงจรป้อนกลับแบบอนุกรมกับวงจรเอาท์พุท ตัวแปรเอาท์พุทคือ I_o ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณคงที่เช่นกัน ตัวแปรป้อนกลับคือ fI_o

ส่วนด้านอินพุท ถ้า E_i แทนต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และต้องการให้ตัวแปรป้อนกลับ E_f มีเฟสตรงข้ามกับปริมาณอินพุทเดิม ดังนั้นควรต่อวงจรป้อนกลับอนุกรมกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ และขั้วอินพุทของวงจรขยาย ถ้าต่อวงจรป้อนกลับแบบขนานกับด้านอินพุท ผลจะเกิดอะไรขึ้น? ผลคือตัวแปรป้อนกลับจะเป็นปริมาณกระแส I_f แทน ซึ่งตัวแปรอินพุทคือ I_i

คำถามต่อไปคือ เมื่อได้มีการต่อวงจรป้อนกลับ จะเป็นการรักษาเสถียรภาพของปริมาณอะไร? คำตอบสำหรับปัญหานี้ ขึ้นกับลักษณะการต่อวงจรป้อนกลับ ดังนี้

(1) ถ้าเป็นกรณีต่อแบบ**ขนาน**กับด้านเอาท์พุท และ**อนุกรม**กับด้านอินพุท เรียกย่อเป็น PO-SI (คำเต็มคือ parallel-output, series-input) ปริมาณป้อนกลับคือแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะรักษาเสถียรภาพของเกนแรงดันไฟฟ้า $V_o/E_i = A_{fv}$ เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$fV_o = E_f \sim E_i \qquad \text{และ} \qquad A_{fv} = \frac{1}{f} = \frac{V_o}{E_i} \text{ PO-SI} \qquad \text{.....(8.10)}$$

(2) กรณีต่อ**ขนาน**กับทั้งด้านเอาท์พุทและอินพุท เรียกย่อ ๆ เป็น PO-PI (คำเต็มคือ parallel-output, parallel-input) จะเป็นการรักษาเสถียรภาพของปริมาณความต้านทานส่งผ่าน (transresistance) $A_{fr} = \frac{V_o}{I_i}$ ดังนี้

$$fV_o = I_f \sim I_i \qquad \text{และ} \qquad A_{fr} = \frac{V_o}{I_i} = \frac{1}{f} \qquad .....(8.11)$$

(3) กรณีต่อ**อนุกรม**กับด้านเอาท์พุท และต่อ**ขนาน**กับด้านอินพุท เรียกย่อ ๆ เป็น SO-PI วงจรป้อนกลับจะรักษาเสถียรภาพของเกนกระแส A_{fi} ดังนี้

$$fI_o = I_f \sim I_i \qquad A_{fi} = \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{f} \qquad .....(8.12)$$

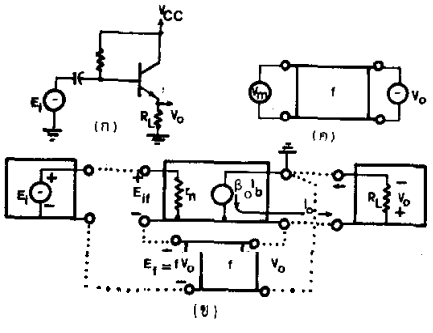
(4) กรณีสุดท้าย คือ ต่ออนุกรมกับด้านเอาท์พุทและด้านอินพุท เรียกย่อ ๆ เป็น SO-SI ปริมาณความนำส่งผ่าน (transconductance) A_{fg} จะถูกรักษาเสถียรภาพ เขียนสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$fI_o = E_f \sim E_i \qquad A_{fg} = \frac{I_o}{E_i} = \frac{1}{f} \text{ SO-SI} \qquad .....(8.13)$$

8.3.2 วงจรป้อนกลับแบบลบต่อกับวงจรขยายภาคเดี่ยว

แยกพิจารณาวงจรเอมมิตเตอร์ตามในรูป 8.3 (ก) ซึ่งต่อกับวงจรป้อนกลับในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

(1) PO-SI แสดงลักษณะการต่อวงจรในรูป 8.3 (ข) ซึ่ง V_o จะถูกป้อนกลับ และสัญญาณจะมีวงจรป้อนกลับช่วยรักษาปริมาณไว้ ทำให้ $fV_o = E_f = V_o$ แต่เครื่องหมายตรงข้ามกัน และมีค่าเกือบเท่า E_i นั่นคือ V_o/E_i คงค่าเดิม ทดสอบได้โดยใช้โครงร่างในรูป 8.3 (ค) เริ่มจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_o

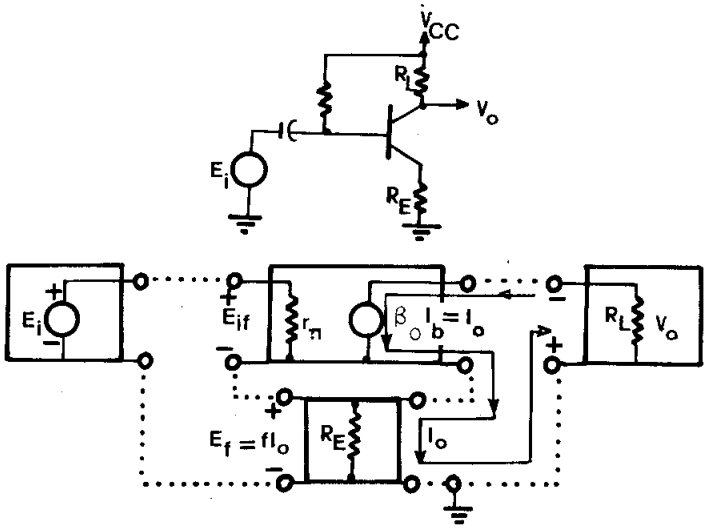


รูป 8.3 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ตาม (ข) แผนภาพของวงจรใน (ก) ต่อแบบ PO-SI *กับวงจรป้อนกลับ (ค) วงจรใช้ทดสอบค่า* f = 1

ให้กับวงจรป้อนกลับ โดยลูปอินพุทเปิดวงจร และเนื่องจาก $fV_o = E_f = V_o$ ดังนั้น $f = 1$ แทนค่าลงในสมการ (8.10)

$$A_{fv} = \frac{V_o}{E_i} = \frac{1}{1} = 1 \qquad \text{.....(8.14)}$$

(2) SO-SI วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วมในรูป 8.4 (ก) ถูกย่อส่วนเป็นไปตามแบบจำลองในรูป 8.4 (ข) ซึ่งได้แสดงการต่อวงจรป้อนกลับ ทำการวัดกระแสเอาท์พุท จากนั้นป้อนกลับในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเกือบเท่า E_i แต่ต่างเฟสกัน ถ้าต้องการหยุดการป้อนกลับ ทำโดยเปิดวงจรด้านอินพุท ตัวแปรป้อนกลับ fI_o จะถูกวัดค่าในรูปของ I_oR_E ดังนั้น $f = R_E$ และจากสมการ (8.13)



รูป 8.4 (ก) วงจรขยายแบบเอมมิตเตอร์ร่วม
(ข) แบบจำลองของรูป (ก) โดยแสดงชัดเจนถึงแนวทางป้อนกลับสัญญาณ

$$A_{fg} = \frac{I_o}{E_i} = \frac{1}{R_E} \qquad \text{.....(8.15)}$$

สมการ (8.15) เป็นค่าเกนความนำส่งผ่าน ซึ่งไม่คุ้นเคยนัก จึงจัดรูปให้อยู่ในนิพจน์ของ V_o/E_i ที่รู้จักกันทั่วไป ทำโดยแทนค่า $I_o = V_o/R_L$ ในสมการ (8.15) ดังนี้

$$\frac{I_o}{E_i} = \frac{V_o}{R_L} \cdot \frac{1}{E_i} = \frac{1}{R_E}$$

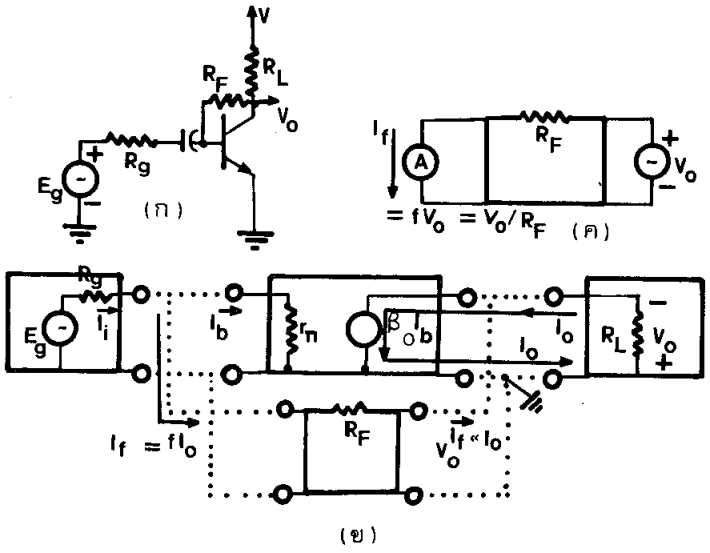
$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{R_L}{R_E} = A_{fv} \qquad \text{.....(8.16)}$$

(3) PO-PI สมมุติตัวอย่างวงจรในรูป 8.5 (ก) เลือกวัดแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ปริมาณป้อนกลับคือกระแส ในการวิเคราะห์วงจรเกี่ยวกับต่อขนานด้านอินพุทต้องคำนึงถึงความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิดสัญญาณเสมอ เพื่อสะดวกในการอธิบายพิจารณารูป 8.5 (ข) ถ้า $R_g = 0$ ปริมาณ I_g ทั้งหมดจะผ่านไปยัง E_g และสำหรับการต่อวงจรลักษณะเช่นนี้ $I_f = fV_o$ ซึ่งมีค่าเกือบเท่า I_i แสดงว่า สัญญาณส่วนที่ป้อนกลับไม่มีบทบาทในการรักษาเสถียรภาพของ A_{fr} $(= V_o/I_i)$ เลย ในรูป 8.5 (ค) ป้อนแรงดันไฟฟ้า V_o ให้วงจรป้อนกลับ จากนั้นหยุดการป้อนกลับโดยลัดวงจรขั้วอินพุทผ่านแอมมีเตอร์ และทำการวัด $I_f = V_o/R_F$ แต่ $I_f = fV_o$ ดังนั้น $f = 1/R_F$ แทนค่านี้ลงในสมการ (8.11)

$$A_{fr} = \frac{V_o}{I_i} = R_F \qquad \text{.....(8.17)}$$

สมการ (8.17) เป็นเกนของปริมาณความต้านทานส่งผ่าน (transresistance) ซึ่งไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย จุดประสงค์คือ พยายามจัดรูปสมการให้เป็นปริมาณ V_o/E_g นั่นคือ จะต้องจัดค่าของ I_i ให้ขึ้นกับ R_g และ E_g หรือกล่าวว่า จัดให้แรงดันตกคร่อม R_g มีค่าเป็น E_g พิจารณารูป 8.5 (ข) กรณีดังกล่าวนี้ I_i จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ I_f มาก ซึ่ง I_b จะมีค่าน้อย ๆ เท่านั้น ดังนั้น เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\frac{V_o}{I_i} = V_o\left(\frac{R_g}{E_g}\right) = R_F$$



รูป 8.5 (ก) วงจรป้อนกลับแบบลบ ต่อในลักษณะ PO-PI
(ข) แบบจำลองของรูป (ก) และ (ค) วงจรทดสอบเพื่อแสดงว่า $f = 1/R_F$

$$\frac{V_o}{E_g} = \frac{R_F}{R_g} \qquad \text{.....(8.18)}$$

(4) SO-PI จะวิเคราะห์รายละเอียดในตอน (8.4)

8.3.3 การลดความเพี้ยนด้วยวงจรป้อนกลับแบบลบ

ถ้ามีการต่อวงจรขยายมากกว่า 1 ภาค ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือ การเพี้ยนไปจากสัญญาณเดิมของปริมาณเอาท์พุท ในขั้นแรก ถือว่าวงจรภาคแรกไม่มีการเพี้ยนใด ๆ และมีเกนสูง แต่เกิดการเพี้ยนในวงจรขยายภาคหลัง กำหนดให้

D แทน ส.ป.ส. ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท

V_o' เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของกรณีเกิดความเพี้ยน ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$V_o' = V_o + DA_{v2} \qquad \text{.....(8.19)}$$

แต่ $V_o = A_{v1}A_{v2}E_i$ แทนค่านี้ลงในสมการ (8.19)

$$V_o' = A_{v1}A_{v2}E_i = DA_{v2} \qquad \text{.....(8.20)}$$

เห็นได้ว่า กรณีเกิดความเพี้ยน แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีขนาดเพิ่มขึ้น

ถ้ามีการต่อวงจรป้อนกลับแบบลบไว้ด้วยกันนี้ สัญญาณป้อนกลับจะเป็นอย่างไร? สำหรับลักษณะการต่อแบบ PO-SI สัญญาณป้อนกลับควรประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

(1) ส่วนของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ไม่มีความเพี้ยน (ให้เป็น V_{of})

(2) ส่วนของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่มีความเพี้ยน (ให้เป็น V_{of}')

ย้อนพิจารณาสมการ (8-20) หารตลอดสมการด้วย $A_{v1}A_{v2}$

$$V_o' = E_i + \frac{D}{A_{v1}} \qquad \text{.....(8.21)}$$

ซึ่งกล่าวได้ว่า ส่วนของสัญญาณที่มีความเพี้ยนคือ D/A_{v1} และสัญญาณป้อนกลับด้านอินพุทมีค่าดังนี้

$$E_{if} = V_o' - fV_{of}' \qquad \text{.....(8.22)}$$

ต้องการหาค่า V_{of}' ในนิพจน์ของ E_i และนิพจน์อื่นที่เกี่ยวข้อง ยกเว้น E_{if} และ V_o' ดังนั้นแทนค่าจากสมการ (8.21) และอาศัยความสัมพันธ์ $V_{of}' = A_{v1}A_{v2}E_{if}$ เพื่อแทนค่าของ E_{if} ในสมการ (8.22) ดังนั้น

$$\frac{V'_{of}}{A_{v1}A_{v2}} = E_i + \frac{D}{A_{v1}} - fV'_{of}$$

$$V'_{of}\left(\frac{1}{A_{v1}A_{v2}} + f\right) = E_i + \frac{D}{A_{v1}}$$

$$V'_{of}(1 + fA_{v1}A_{v2}) = A_{v1}A_{v2}E_i + DA_{v2}$$

$$V'_{of} = \frac{A_{v1}A_{v2}E_i}{1 + fA_{v1}A_{v2}} + \frac{DA_{v2}}{1 + fA_{v1}A_{v2}} \qquad \text{.....(8.23)}$$

ปริมาณ $fA_{v1}A_{v2}$ เรียกเป็นลูปเกน (loop gain) และจากการเปรียบเทียบสมการ (8.20) กับ (8.23) เห็นได้ว่า ปริมาณ $(1 + fA_{v1}A_{v2})$ เป็นตัวลดเกนแรงดันไฟฟ้าและส่วนที่เกิดการเพี้ยน DA_{v2} ด้วยบางครั้งเรียกปริมาณ $(1 + fA)$ เป็น "ตัวประกอบปรับปรุงคุณภาพ" (improvement factor)

ตัวอย่าง 8.1 สมมุติวงจรขยายไม่มีการเพี้ยน กำหนดให้ $A_{v1} = 100$, $A_{v2} = 1$ และ $f = 0.2$ (ก) จงหาค่า E_i ที่ทำให้ $V'_o = 2.5$ v เมื่อไม่มีการป้อนกลับ (ข) ถ้ามีการป้อนกลับ E_i จะมีค่าเท่าใด จึงทำให้

วิธี

(ก) กรณีไม่มีการป้อนกลับ หาค่า E_i

$$E_i = \frac{V'_o}{A_v} = \frac{2.5}{100} = 25 \text{ mv}$$

(ข) กรณีมีการป้อนกลับ ค่า E_i หาได้ 2 วิธี โดย E_{if} ต้องมีค่าเท่าเดิม คือ 25 mv (จากข้อ (ก)) ดังนี้

(1) หาค่า E_i โดยใช้สมการ (8.1)

$$E_i = E_{if} + fV_{of} = 0.025 + (0.2)(2.5) = 0.525 \text{ v}$$

(2) อาศัยความสัมพันธ์

$$E_i = E_{if}(1 + fA_v) \qquad \text{.....(i)}$$

แสดงว่า E_i จะต้องเพิ่มค่าขึ้นด้วยปริมาณ $(1 + fA)$ เพื่อชดเชยเกนที่สูญเสียไปเนื่องจากการป้อนกลับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (i)

$$E_i = 0.025\ (1 + 20) = 0.525 \text{ v}$$

ตัวอย่าง 8.2 จากตัวอย่าง 8.1 ถ้ามีการเพี้ยน 10% V_o (= 0.25 v) จงคำนวณหาส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเพี้ยนในเอาท์พุทของแต่ละกรณี คือ (1) ไม่มีการป้อนกลับ (2) มีการป้อนกลับ

วิธี

(1) ไม่มีการป้อนกลับสัญญาณ จากสมการ (8.20)

$$V_o' = A_{v1}A_{v2}E_i + DA_{v2}$$

ให้ $A_{v1}A_{v2} = A_v = 100$ และ $E_i = 0.025$ v

แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการข้างต้น

$$V_o' = \frac{100(0.025)}{1 + 20} + 1(0.25) = 2.5 + 0.25 \text{ v}$$

(2) ถ้ามีการป้อนกลับ จากสมการ (8.23) ปริมาณที่เกิดการเพี้ยนจะถูกลดค่าลงด้วยปริมาณ (1 + fA)

$$V_{of}' = \frac{A_{v1}A_{v2}E_i}{1 + fA_{v1}A_{v2}} + \frac{DA_{v2}}{1 + fA_{v1}A_{v2}}$$

$$= \frac{100(0.525) + (0.25)(1)}{1 + 20} = 2.5 + 0.0119 \text{ v}$$

ตัวอย่าง 8.3 จากตัวอย่าง 8.1 และ 8.2 สำหรับกรณีมีวงจรป้อนกลับ จงหาปริมาณความเพี้ยนที่ปรากฏต่อวงจรขยาย

วิธี แทนค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดลงในสมการ (8.22)

$$E_{if} = E_i + \frac{D}{A_{v1}} - fV_{of}'$$

$$= 0.525 + \frac{0.525}{100} - 0.2(2.5 + 0.0119)$$

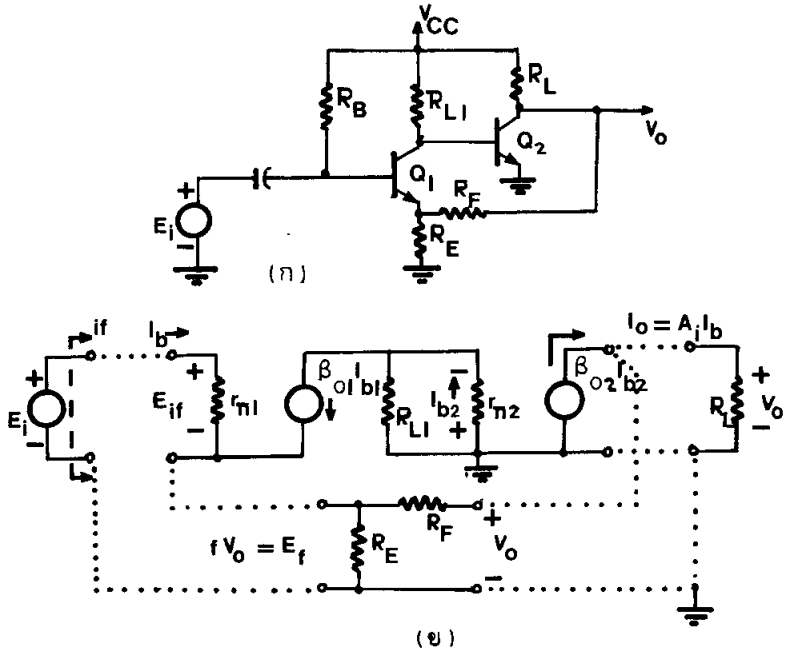
$$E_{if} = 0.025 + 0.00012 \text{ v}$$

นั่นคือ ส่วนที่เกิดการเพี้ยน = 0.00012 v

8.4 วงจรขยายหลายภาค

8.4.1 การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบในลักษณะ PO-SI

ตัวอย่างวงจรขยาย 2 ภาค ดังแสดงในรูป 8.6 (ก) เมื่อต่อวงจรป้อนกลับแบบ PO-SI แสดงแบบจำลองในรูป 8.6 (ข) แรงดันเอาท์พุท V_o จะถูกป้อนกลับด้วยปริมาณ fV_o ซึ่งมีเฟสตรงข้ามและมีขนาดเกือบเท่ากับ E_i วิธีการหาค่า f ทำโดยเปิดวงจรด้านอินพุท จากนั้นป้อน V_o ให้กับวงจรป้อนกลับ และทำการวัดค่า ดังนี้



รูป 8.6 (ก) วงจรขยาย 2 ภาคซึ่งต่อวงจรป้อนกลับ
(ข) แบบจำลองของรูป (ก) เพื่อแสดงการป้อนกลับแบบลบ

$$E_i = fV_o = \frac{R_E}{R_E + R_F} V_o$$

$$f = \frac{R_E}{R_E + R_F} \qquad \text{.....(8.24a)}$$

และ $$A_{fv} = \frac{V_o}{E_i} = \frac{1}{f} = \frac{R_E + R_F}{R_E} \qquad \text{.....(8.24b)}$$

อีกวิธีหนึ่งคือ เขียนสมการคณิตศาสตร์ โดยเริ่มพิจารณาลูปวงจรอินพุท เพื่อเขียนปริมาณ E_i จากนั้นหาค่าของ V_o/E_i ดังนี้

$$E_i = I_b R_i + \frac{R_E}{R_E + R_F} V_o = I_b R_i + fV_o \qquad \text{.....(8.25a)}$$

โดย $$R_i = r_{\pi 1} + (\beta_{o1} + 1)(R_E // R_F) \qquad \text{.....(8.25b)}$$

ในรูป 8.7 (ข) E_i ไม่ส่งผลโดยตรงต่อ V_o ทางวงจรป้อนกลับ ดังนั้นถ้ากำจัด $r_{\pi 2}$ เพื่อละทิ้งภาคที่สอง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_L (แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท) จะมีค่าประมาณ $R_L E_i/(R_F + R_E)$

โดยทั่วไป $R_F >> R_L$ ดังนั้น ปริมาณป้อนกลับดังกล่าวนี้จึงมีค่าน้อยมาก จนสามารถละทิ้งได้ ถ้าเช่นนั้น V_o เกิดได้อย่างไร? คำตอบคือ V_o เกิดจาก I_o ไหลผ่านความต้านทานลัพธ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ R_L ต่อขนานกับ $(R_F + R_E)$ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_o = A_i I_b R_L' \qquad \text{.....(8.26a)}$$

โดย

$$A_i = \beta_{01}\beta_{02}\frac{R_{L1}}{R_{L1} + r_{\pi 2}} \qquad \text{.....(8.26b)}$$

และ

$$R_L' = R_L \,//\, (R_F + R_E) \qquad \text{.....(8.26c)}$$

I_b ในสมการ (8.26a) หาค่าได้จากสมการ (8.25a) จึงเขียนสมการ (8.26a) ได้ใหม่โดยแทนค่า

$$I_b = \frac{E_i - fV_o}{R_i} \qquad \text{.....(8.27)}$$

$$V_o = A_i \frac{(E_i - fV_o)}{R_i} R_L'$$

$$= \frac{A_i E_i R_L'}{R_i} - \frac{A_i f V_o R_L'}{R_i}$$

$$V_o\left(1 + \frac{fA_i R_L'}{R_i}\right) = \frac{A_i E_i R_L'}{R_i}$$

$$\frac{V_o}{E_i}\left(1 + \frac{fA_i R_L'}{R_i}\right) = \frac{A_i R_L'}{R_i}$$

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{(A_i R_L'/R_i)}{1 + \frac{fA_i R_L'}{R_i}} \qquad \text{.....(8.28)}$$

ย้อนพิจารณาสมการ (8.3) ซึ่งเป็นรูปมาตรฐานของปริมาณ V_o/E_i [$\frac{V_o}{E_i} = A_f = \frac{A}{1 + fA}$ .....(8.3)] ดังนั้น กำหนดปริมาณต่าง ๆ ในสมการ (8.28) เพื่อให้เป็นไปตามรูปสมการ (8.3) ดังนี้

(1) ให้ $A_i \frac{R_L'}{R_i} = A_v$

(2) $\frac{R_E}{R_E + R_F} = f$

นั่นคือ $$A_{vf} = \frac{V_o}{E_i} = \frac{A_i(R_L'/R_i)}{1 + (\frac{R_E}{R_E + R_F}) A_i \frac{R_L'}{R_i}} = \frac{A_v}{1 + fA_v} \quad \text{.....(8.29)}$$

สมการ (8.29) อยู่ในรูปของเกนเมื่อเปิดวงจร คือ **ไม่มีการป้อนกลับ**

ความต้านทานอินพุท จะเป็นเช่นไรถ้ามีการป้อนกลับ ? เพื่อจะหาคำตอบ ให้ R_{if} แทนความต้านทานอินพุทสำหรับกรณีมีการป้อนกลับ ซึ่ง

$$R_{if} = \frac{E_i}{I_b} \quad \text{.....(8.30)}$$

แทนค่า V_o จากสมการ (8.26 a) ลงในสมการ (8.25 a)

$$E_i = I_b (R_i + fA_iR_L') = I_bR_i (1 + f \frac{A_iR_L'}{R_i})$$

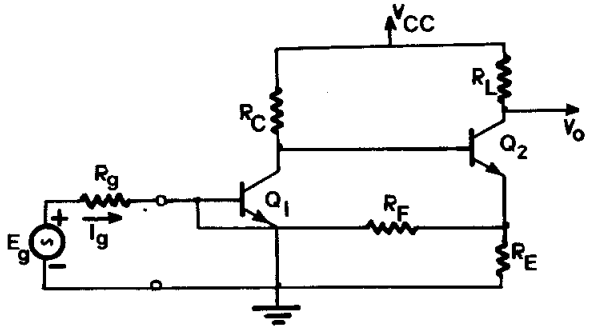
แต่ $\frac{A_iR_L'}{R_i} = A_v$ แทนค่านี้ลงในสมการข้างบน

$$R_{if} = \frac{E_i}{I_b} = R_i (1 + fA_v) \quad \text{.....(8.31)}$$

การต่อวงจรป้อนกลับแบบอนุกรมกับด้านอินพุท (SI) จะป้อนกลับแรงดันไฟฟ้าที่มีเฟสตรงข้ามกับ E_i และ**เพิ่ม**ความต้านทานอินพุทด้วยปริมาณตัวประกอบปรับปรุงคุณภาพ

8.4.2 การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบในลักษณะ SO-PI

ตัวอย่างวงจรแสดงในรูป 8.7 (ก) ปริมาณที่สนใจคือ **กระแสเอาท์พุท** และถูกป้อนกลับในรูปของกระแส ซึ่งวงจรป้อนกลับต่อขนานกับด้านอินพุทของวงจรขยาย ถ้า I_g เป็นกระแสอินพุทของวงจรขยาย และ fI_o เป็นปริมาณกระแสป้อนกลับซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับ I_g ดังนั้น เกนกระแส $A_{fi} = I_o/I_g$ จะมีความเสถียร หาค่าของตัวประกอบป้อนกลับ f ดังนี้



รูป 8.7 (ก) วงจรขยายหลายภาค พร้อมกับการต่อวงจรป้อนกลับในลักษณะ SO-PI

(1) ป้อนกระแส I_o ให้วงจรป้อนกลับ

(2) ทำการลัดวงจรขั้วอินพุทลงสู่กราวนด์ และวัดค่า fI_o โดยเริ่มพิจารณา I_o ซึ่งถูกแบ่งระหว่าง R_E และ R_F เขียนความสัมพันธ์ดังนี้

$$fI_o = \frac{R_E}{R_E + R_F} I_o$$

$$f = \frac{R_E}{R_E + R_F} \qquad \text{.....(8.32)}$$

และ $$A_{fi} = \frac{I_o}{I_g} \cdot \frac{I_o}{fI_o} = \frac{I}{f} = \frac{R_E + R_F}{R_E} \qquad \text{.....(8.33)}$$

ถ้าต้องการค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า เริ่มพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท เห็นได้ว่าเป็นแรงดันตกคร่อม R_L เมื่อกระแส I_o ไหลผ่าน นั่นคือ $I_o = V_o/R_L$ และด้านอินพุท $I_g = V_g/R_g$ แทนค่าดังกล่าวนี้ในสมการ (8.33)

$$\frac{I_o}{I_g} = \frac{V_o/R_L}{E_g/R_g} = \frac{R_E + R_F}{R_E}$$

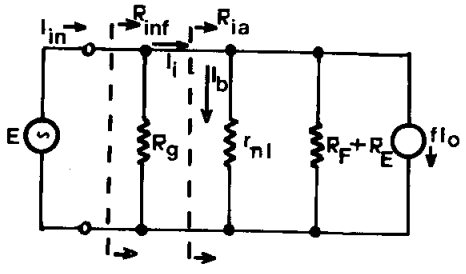
ดังนั้น $$\frac{V_o}{E_g} = \left(\frac{R_E + R_F}{R_E}\right) \frac{R_L}{R_g} \qquad \text{..... (8.34)}$$

สิ่งที่น่าสนใจ คือ **ความต้านทานอินพุท** จะมีค่าอย่างไร ? ตามแบบจำลอง ค่าของ R_g และ r_{nl} มีส่วนทั้งเกนของวงจรด้านอินพุทและค่าของความต้านทานอินพุท ดังนั้น ค่า R_g จะปรากฏอยู่ในปริมาณทั้งสองด้วย เพื่อสะดวกในการวัดความต้านทานอินพุทของส่วนป้อนกลับและของวงจรขยายแบบจำลอง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า E แทน I_g ในรูป 8.8 ซึ่ง

R_{inf} แทนความต้านทานอินพุทของปริมาณป้อนกลับ

R_{ia} แทนความต้านทานอินพุทของเครื่องขยาย (a หมายถึง amplifier)

R_s เป็นความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_g ซึ่ง $R_s = R_g + R_{ia}$



รูป 8.8 แบบจำลองซึ่งดัดแปลงจากรูป 8.8 เพื่อหาค่าความต้านทานอินพุทของส่วนป้อนกลับและของวงจรขยาย

จากรูป 8.8 ถ้าไม่มีการป้อนกลับ (คือ กำจัด fI_o ออกไป) สามารถเขียนความต้านทานอินพุทได้เป็น

$$R_{in} = R_g \,//\, r_{\pi 1} \,//\, (R_F + R_E) \qquad \text{.....(8.35)}$$

ต่อไปพิจารณาเมื่อมีการป้อนกลับด้วยปริมาณ fI_o จุดประสงค์คือต้องการเขียน R_{inf} ในนิพจน์ของ R_{in} จากการพิจารณารูป 8.8

$$R_{inf} = \frac{E}{I_{in}} \qquad \text{.....(8.36)}$$

และ

$$I_{in} = \frac{E}{R_{in}} + fI_o \qquad \text{.....(8.37)}$$

กรณีมีการป้อนกลับแบบลบ กระแสอินพุทกลายเป็น $(I_{in} - fI_o)$ ซึ่งถูกแบ่งออกตามแนวจุดเชื่อม ต้องการหาค่า I_b (เป็นกระแสไหลผ่าน $r_{\pi 1}$) ถ้าให้ D_i เป็นสัมประสิทธิ์ของการแบ่งกระแส ดังนั้น

$$I_b = D_i (I_{in} - fI_o) \qquad \text{.....(8.38)}$$

หาค่า D_i โดยอาศัยทฤษฎีการแบ่งกระแส สำหรับวงจรนี้มีความต้านทาน R_g ต่อขนานกับความต้านทาน $(R_E + R_F)$ ดังนั้น ถือเสมือนว่าความต้านทาน $R_g \,//\, (R_E + R_F)$ เป็นความต้านทานค่าหนึ่ง อีกค่าหนึ่งคือ $r_{\pi 1}$ ซึ่งต่อขนานกับ $R_g \,//\, (R_E + R_F)$ จึงเขียนค่า D_i ได้เป็น

$$D_i = \frac{r_{\pi 1} [R_g \,//\, (R_E + R_F)]}{r_{\pi 1} + R_g \,//\, (R_E + R_F)} \qquad \text{.....(8.39)}$$

แต่

$$I_b = \frac{I_o}{A_i} \qquad \text{.....(8.40)}$$

แทนค่า (8.40) ลงใน (8.38) และแยกเขียนปริมาณ I_o เป็น

$$I_o = \frac{D_i A_i I_{in}}{1 + fD_i A_i} \qquad \text{.....(8.41)}$$

ถ้าต้องการให้สมการ (8.41) อยู่ในรูปแบบมาตรฐานตามสมการ (8.3) ทำโดยแทนค่า $D_i A_i = A$ ดังนี้

$$I_o = \frac{AI_{in}}{1 + fA} \qquad \text{.....(8.42)}$$

แทนค่า I_o จากสมการ (8.42) ลงในสมการ (8.37)

$$I_{in} = \frac{E}{R_{in}} + \frac{fAI_{in}}{1 + fA}$$

$$\frac{E}{I_{in}} = \frac{R_{in}}{1+fA} = R_{inf} \qquad \text{.....(8.43)}$$

ดังนั้น R_{inf} มีค่าต่ำกว่า R_{in} ของวงจรขยาย

ต่อไปพิจารณาความต้านทานอินพุทของวงจรขยาย ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น R_{ia} ตามรูป 8.8 R_{inf} ต่อขนานกับ R_g ดังนั้น

$$R_{ia} = \frac{R_g R_{inf}}{R_g - R_{inf}} \qquad \text{.....(8.44)}$$

ในทางปฏิบัติ ผู้ใช้ต้องคำนึงถึงความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_g จึงต้องแปลงค่าจาก I_g ให้เป็น E_g โดยกำหนด R_s เป็นความต้านทานรวมที่ปรากฏต่อ E_g ซึ่งมีค่าเท่ากับความต้านทาน R_g ต่ออนุกรมกับ R_{ia} นั่นคือ

$$R_s = \frac{E_g}{I_g} = R_g + R_{ia} \qquad \text{.....(8.45)}$$

สรุปความหมายของความต้านทานที่เกี่ยวข้อง :-

$(R_E + R_F)$ เป็นโหลดเนื่องจากวงจรป้อนกลับ

R_g โหลดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

R_{in} ความต้านทานอินพุท ซึ่งรวมทั้งโหลดเนื่องจากวงจรป้อนกลับและจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

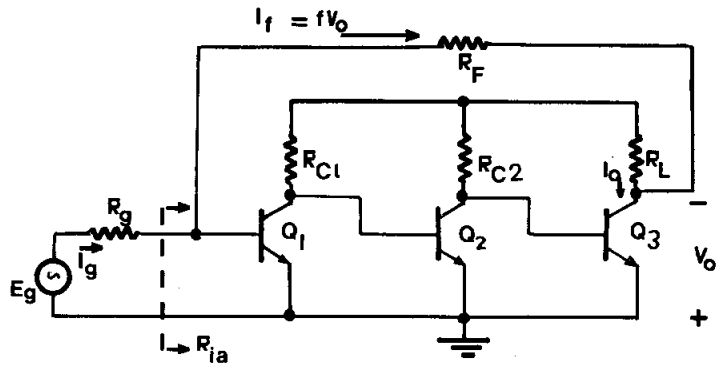
การต่อวงจรป้อนกลับแบบ PI จะทำให้ความต้านทานอินพุทลดค่าลง (ด้วยปริมาณ $(1+fA)$ เท่า) เนื่องจากวงจรป้อนกลับทำหน้าที่ดึงกระแสจากขั้วอินพุท กระแสปริมาณดังกล่าวนี้มีค่ามากกว่าเมื่อเป็นกรณีไม่มีวงจรป้อนกลับ

8.4.3 การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบในลักษณะ PO-PI

ตัวอย่างวงจรแสดงในรูป 8.9 ปริมาณที่ทำการวัด คือ V_o ส่วนกระแสป้อนกลับคือ $I_f = fV_o$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกระแสอินพุท I_g ดังนั้น ค่า V_o/I_g ถูกทำให้เสถียร เขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$I_f = fV_o = I_g \qquad \text{.....(8.46)}$$

$$\frac{V_o}{I_g} = \frac{1}{f} = A_{fr} \qquad \text{.....(8.47)}$$



รูป 8.9 ลักษณะการต่อวงจรป้อนกลับแบบลบ PO-PI กับวงจรขยายสองภาค

วัดค่า I_f โดยสัดวงจรอินพุท ป้อน V_o ให้กับวงจรป้อนกลับ นั่นคือ

$$I_f = \frac{V_o}{R_F} = fV_o \qquad \text{.....(8.48)}$$

และ

$$f = \frac{1}{R_F} \qquad \text{.....(8.49)}$$

แทนค่า (8.49) ลงใน (8.47)

$$A_{fr} = \frac{V_o}{I_g} = R_F \qquad \text{.....(8.50)}$$

เกนกระแส หาค่าโดยพิจารณา I_o ซึ่งไหลผ่าน R_L เป็นส่วนใหญ่ (ดูรูป 8.9) ดังนั้น แทนค่า $V_o = I_oR_L$ ในสมการ (8.50)

$$\frac{I_oR_L}{I_g} = R_F$$

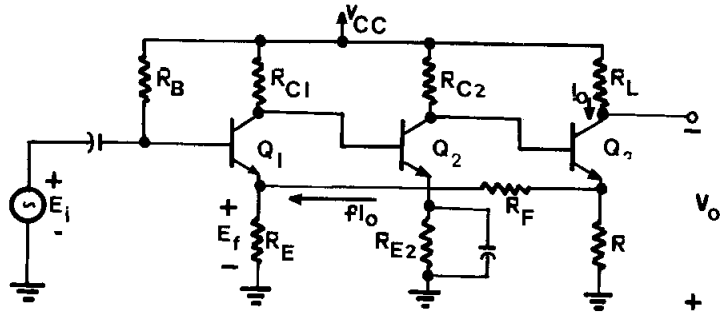
$$\frac{I_o}{I_g} = \frac{R_F}{R_L} = A_{fi} \qquad \text{.....(8.51)}$$

เกนแรงดันไฟฟ้า จากรูป 8.9 เห็นได้ว่าการต่อขนานวงจรป้อนกลับกับด้านอินพุทของวงจรขยาย แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_g เกือบทั้งหมดมีค่าเป็น E_g จึงสามารถแทน $I_g = E_g/R_g$ ในสมการ (8.50) ได้

$$\frac{V_o}{E_g} = \frac{R_F}{R_g} = A_{fv} \qquad \text{.....(8.52)}$$

8.4.4 การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบในลักษณะ SO-SI

ตัวอย่างที่ใช้อธิบายเป็นวงจรขยาย 3 ภาค ต่อกันดังแสดงในรูป 8.10 เลือกวัดกระแสเอาท์พุท ตัวแปรป้อนกลับคือ fI_o ถูกป้อนกลับในรูปของ E_f และมีขนาดเกือบเท่า E_i ดังนั้น ปริมาณ I_o/E_i จึงถูกทำให้เสถียร เรียกเป็น A_{fg} เขียนสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้



รูป 8.10 ตัวอย่างการต่อวงจรขยาย 3 ภาค และวงจรป้อนกลับแบบลบ

$$fI_o = E_f = E_i \qquad \text{.....(8.53)}$$

และ

$$\frac{I_o}{E_i} = \frac{1}{f} = A_{fg} \qquad \text{.....(8.54)}$$

หาค่า f โดยสมมุติให้ Q_3 มีกระแสไหลผ่านคอลเลคเตอร์เอมมิตเตอร์เกือบเท่าปริมาณ I_o เปิดวงจรด้านอินพุทของ Q_1 ป้อน I_o เข้าสู่วงจรป้อนกลับ ซึ่งมีความต้านทาน R ต่อขนานกับ (R_E+R_F) จากนั้นหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_E กำหนดเรียกเป็น E_f พิจารณารูป 8.10 ความต้านทานลัพธ์ในกรณีดังกล่าวนี้ คือ $R \,//\, (R_E+R_F)$ เมื่อมี I_o ไหลผ่าน ย่อมเกิดแรงดันตกคร่อมลัพธ์มีค่าเป็น $I_o\{R \,//\, (R_E+R_F)\}$ อาศัยความรู้พื้นฐานไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานหนึ่ง (ในที่นี้คือ R_E) เมื่อรู้ค่าศักย์ที่ป้อนเข้า (ในที่นี้คือ $I_o[R \,//\, (R_E+R_F)]$) และรู้ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกันอยู่ (ในที่นี้คือ (R_E+R_F)) ดังนั้น เขียนค่าได้เป็น

$$V_{RE} = E_f = \left\{\frac{R_E}{R_E+R_F}\right\}\left\{I_o\,[R \,//\, (R_E+R_F)]\right\} \qquad \text{.....(8.55)}$$

แทนค่า E_f จากสมการ (8.55) ลงในสมการ (8.53) ดังนั้น

$$E_f = fI_o = I_o \frac{RR_E}{R+R_E+R_F}$$

$$f = \frac{RR_E}{R + R_E + R_F} \qquad \text{.....(8.56)}$$

ในการเขียนสมการการป้อนกลับของ I_o/E_i ให้อยู่ในรูปมาตรฐาน (คือ $\frac{1}{f} = I_o/E_i = A_{fg} = \frac{A}{1 + fA}$) เขียนปริมาณความต้านทานอินพุทกรณีมีการป้อนกลับ ($R_{inf} = \frac{E_i}{I_b}$) และเกนแรงดันไฟฟ้า V_o/E_i วิธีการตามขั้นตอน ดังนี้

(1) อาศัยทฤษฎีเทเวนินทำให้วงจรอินพุทง่ายขึ้น

$$E_i = I_b R_i + f I_o \qquad \text{.....(8.57)}$$

โดย f เป็นไปตามสมการ (8.56) และ

$$R_i = r_{\pi 1} + (\beta_o + 1)\,[R_E \,//\, (R_F + R)] \qquad \text{.....(8.58)}$$

(2) แทนค่า $I_b = \frac{I_o}{A_i}$ ลงในสมการ (8.57)

$$E_i = I_o \frac{R_i}{A_i} + f I_o$$

$$= I_o \left(\frac{R_i}{A_i} + f A_i\right)$$

$$\frac{I_o}{E_i} = \frac{A_i}{R_i + f A_i} = \frac{A_i/R_i}{1 + f(A_i/R_i)} \qquad \text{.....(8.59)}$$

(3) เขียนสมการ (8.59) ให้อยู่ในรูปมาตรฐาน โดยแทนค่า $A_i/R_i = A$ ซึ่งทำให้

$$\frac{I_o}{E_i} = \frac{A}{1 + fA} = A_{fg} \qquad \text{.....(8.60)}$$

(4) แทนค่า $I_o = A_i I_b$ ลงในสมการ (8.57) เพื่อหาค่า E_i/I_b

$$E_i = I_b (R_i + f A_i) \qquad \text{.....(8.61)}$$

$$\frac{E_i}{I_b} = R_{inf} = R_i \left(1 + \frac{f A_i}{R_i}\right) \qquad \text{.....(8.62)}$$

ซึ่งถ้าแทนค่า $\frac{A_i}{R_i} = A$ จะเขียนสมการ (8.62) ได้เป็น

$$\frac{E_i}{I_b} = R_{inf} = R_i (1 + fA) \qquad \text{.....(8.63)}$$

(5) ขั้นสุดท้ายคือ ต้องการเขียน V_o/E_i อาศัยสมการ (8.60) แทนค่า $I_o = V_o/R_L$ ลงในสมการ

$$\frac{V_o}{E_i} = R_L A_{fg} = A_{fv} \qquad \text{.....(8.64)}$$

จากสมการ (8.54)

$$A_{fg} = \frac{1}{f} = \frac{V_o}{R_L}\left(\frac{1}{E_i}\right) \qquad \text{.....(8.65)}$$

8.5 การตอบสนองความถี่เมื่อมีวงจรป้อนกลับแบบลบ

โดยทั่วไป ถ้าไม่มีวงจรป้อนกลับ วงจรขยายจะมีเกนแปรตามความถี่ ดังนี้

$$A = \frac{A_o}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}} \qquad \text{.....(8.66)}$$

โดย A_o เป็นเกนที่ค่าความถี่กลาง (ของแถบกว้างความถี่)

ω_H ความถี่สูงคัตออฟ

ถ้าเพิ่มวงจรป้อนกลับ เกนใหม่จะกลายเป็น

$$A_f = \frac{A}{1 + fA} = \frac{\dfrac{A_o}{1 + j\,(\omega/\omega_H)}}{1 + f\dfrac{A_o}{1 + j(\omega/\omega_H)}} = \frac{A_o}{1 + j\,(\omega/\omega_H) + fA_o} \qquad \text{.....(8.67)}$$

กำหนด ω_{fH} เป็นค่าความถี่สูงคัตออฟเมื่อได้มีการต่อวงจรป้อนกลับ (แบบลบ) และ ω_{fH} เป็นค่าที่ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของความถี่ในสมการ (8.67) มีค่าเท่ากัน ($\omega = \omega_{fH}$) ดังนั้น

$$\omega_{fH} = \omega_H (1 + fA_o) \qquad \text{.....(8.68)}$$

สรุปได้ว่า ความถี่สูงคัตออฟจะเพิ่มค่าขึ้น $(1 + fA_o)$ เท่า

ต่อไปพิจารณาความถี่ต่ำคัตออฟ ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการ (7.8)

$$A = \frac{A_o}{1 + \dfrac{\omega_L}{j\omega}}$$

แต่กรณีมีวงจรป้อนกลับ เกนใหม่กลายเป็น

$$A_f = \frac{A}{1+fA} = \frac{A_o}{1+fA_o+j\frac{\omega_L}{\omega}} \qquad \text{.....(8.69)}$$

เช่นเดียวกับกรณีความถี่สูงดัตออฟ กำหนดนิพจน์ $\omega_{fL} = \omega$ เมื่อค่าของนิพจน์จริงเท่ากับค่าจินตภาพในสมการ (8.69)

$$\frac{\omega_L}{\omega_{fL}} = 1+fA_o \qquad \text{.....(8.70)}$$

$$\omega_{fL} = \frac{\omega_L}{1+fA_o} \qquad \text{.....(8.71)}$$

สรุปได้ว่า ความถี่ต่ำดัตออฟมีค่าลดลง $(1+fA_o)$ เท่า ของกรณีไม่มีวงจรป้อนกลับ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อความถี่ต่ำ

8.6 การป้อนกลับสัญญาณแบบบวกเพื่อก่อให้เกิดการแกว่ง

ความหมายของการแกว่งในหัวข้อนี้ หมายถึงลักษณะการเคลื่อนที่อย่างมีคาบเวลาที่แน่นอน คำภาษาอังกฤษคือ oscillation ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด (จะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป) ดังนั้น จึงควรเป็นลักษณะการแกว่งที่เสถียร ณ ความถี่หนึ่ง ๆ ตามกำหนด กล่าวคือ เมื่อ fV_o เป็นสัญญาณที่มีค่าเท่า E_{if} จะเกิดการแกว่งของสัญญาณ และเป็นไปแบบอาการของคลื่นซายน์ เนื่องจากเฉพาะคลื่นซายน์ (หรือเอกซ์โพเนนเชียล) เท่านั้นที่สามารถผ่านวงจร RL หรือ RC ได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จุดประสงค์ของรายละเอียดต่อไป เพื่อเสนอเงื่อนไขในการเกิดการแกว่ง

ตัวอย่างคือ วงจรขยายแบบเอมมิตเตอร์ร่วม ถ้าที่ 1 kHz ปริมาณ A_v มีความเคลื่อนเฟส (phase shift) 180° ในแต่ละภาค (ของวงจรขยาย) สมมุติมีการขยายทั้งหมด 4 ภาค (คือมีวงจรขยาย 4 ชุดต่อกันอยู่) ดังนั้น ความเคลื่อนเฟสลัพธ์มีค่า 720° ที่ 1 kHz ถ้าต่อวงจรป้อนกลับซึ่งทำให้

$$E_i = E_{if} + fV_o \qquad \text{.....(8.72)}$$

ดังนั้น fV_o ต้องต่างเฟส 180° กับ E_i ถ้าทำการลัดวงจร E_i (คือ $E_i = 0$) สมการ (8.72) กลายเป็น

$$E_{if} = -fV_o \qquad (E_i = 0) \qquad \text{.....(8.73)}$$

สมการ (8.73) แสดงถึงการต่างเฟส 180° รอบลูป เริ่มจาก E_i ไปยัง V_o และไปยัง fV_o ถ้า E_i กลายค่าเป็นศูนย์ในทันทีทันใดจะก่อให้ fV_o มีขั้วตรงข้ามกับ E_{if} และขับ V_o ให้อยู่ในสภาวะเสถียรที่มีค่าความเคลื่อนเฟสเป็นศูนย์

สมมุติที่ 100 kHz วงจรขยายแต่ละภาคมีการเพิ่มเฟส 45° จากเดิมมีการต่างเฟส 180° (ที่ 1 kHz) ดังนั้น แต่ละภาคจะมีค่าความต่างเฟส 225° ซึ่งรวมความต่างเฟสของทั้ง 4 ภาค ได้เป็น $4 \times 225° = 900°$ ซึ่งค่ายังผลของการเคลื่อนเฟสคือ $900° - 4(180°) = 180°$ ปริมาณป้อนกลับไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้น มันจะยังคงค่าต่างเฟส 180° นี้ไว้ สรุปแล้วความต่างเฟสรอบลูปเป็นอย่างไร ? หาคำตอบโดยเริ่มพิจารณาการต่างเฟสจาก E_{if} ไปยัง V_o เป็น 180° บวกกับปริมาณจาก V_o กลับไป fV_o ค่าเป็น 180° ความต่างเฟสลัพธ์ คือ $180° + 180° = 360°$ หรือเป็นศูนย์ เขียนสมการได้ว่า

$$E_{if} = fV_o \qquad (E_i = 0) \qquad \text{.....(8.74)}$$

หรือ $$E_i = E_{if} + fV_o \qquad \text{.....(8.75)}$$

ทั้งสมการ (8.74) และ (8.75) เป็นกรณีป้อนกลับแบบบวก และในสมการ (8.74) ถ้า $fV_o \geq E_{if}$ จะเกิดการแกว่ง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

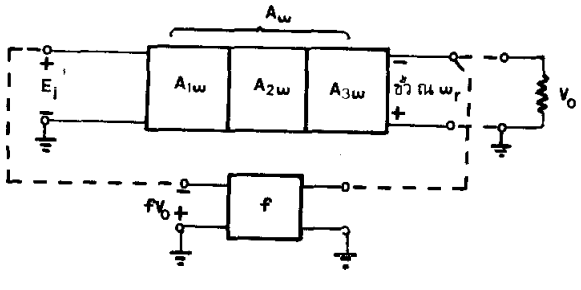
$$E_{if} = fV_o = fA_v E_{if} \qquad fA_v = 1 \qquad \text{.....(8.76)}$$

สรุปได้ว่า ที่ 100 kHz วงจรขยายจะเกิดการแกว่ง ถ้า $fA_v \geq 1$

8.7 ออสซิลเลเตอร์

8.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานของออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์ จะก่อให้เกิดออสซิลเลชัน (หรือการแกว่งโดยมีคาบเวลาที่แน่นอน) ได้ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวในตอน 8.6 แล้ว ในตอนนี้จะกล่าวถึงลักษณะของการแกว่งดังกล่าว โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวพิสูจน์ เพื่อสะดวกในการศึกษา สมมุติวงจรขยายแต่ละภาคต่อกัน ดังแสดงในรูป 8.11 และต่างมีการแปรค่าของเกนตามความถี่เดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามสมการ (8.66) กรณีไม่มีการต่อวงจรป้อนกลับ เกนลัพธ์ของวงจรขยาย คือ



รูป 8.11 วงจรออสซิลเลเตอร์ป้อนกลับ

$$A\omega = \frac{A_o^3}{(1 + j \frac{\omega}{\omega_H})^3} \qquad \text{.....(8.77)}$$

ถ้ามีการป้อนกลับสัญญาณ เขียนเกนโดยอาศัยสมการ (8.68) ดังนี้

$$\frac{V_o}{E_i} = A_f = \frac{A}{1+fA} \qquad \text{.....(8.78)}$$

โดยนิพจน์ fA เป็นรูปเชิงซ้อนทั้งขนาด (magnitude) และมุมเฟส Bark-hausen criterion กำหนดว่า การแกว่งเกิดเมื่อวงจรมีค่าเกนลูปเป็น 1 นั่นคือ $-fA_\omega = 1$ ถ้าแทนค่านี้ในสมการ (8.78) ค่า $A_{f\omega}$ ใกล้เคียงค่าอนันต์ ซึ่งกล่าวได้ว่า เฟสของ $-fA_\omega$ เป็นศูนย์ และมีขนาดเป็น 1 ต่อไปสมมุติให้แต่ละภาคขยายมีการเคลื่อนเฟสของความถี่กลาง (ในรูป 8.11) เป็น 180° ดังนั้น แต่ละภาคขยายเหล่านั้นจะต้องมีการเคลื่อนเฟสเพียง 60° เท่านั้น ทั้งนี้ เพื่อให้การเคลื่อนเฟสลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์ (หรือเท่ากับ 360°) ถ้าที่ ω_H วงจรขยายแต่ละภาคมีการเคลื่อนเฟส 45° แสดงว่าการแกว่งเกิดที่ความถี่สูงกว่า ω_H กำหนด ω_r เป็นความถี่ที่เกิดการแกว่ง ซึ่งจะหาค่าได้โดยกระจายส่วนของสมการ (8.77) (อาศัยกฎการกระจายกำลังสาม $(a+b)^3 = a^3+3a^2b+3ab^2+b^3$)

$$-fA_\omega = f \frac{A_o^3}{1+3j\left(\frac{\omega_r}{\omega_H}\right) - 3\left(\frac{\omega_r}{\omega_H}\right)^2 - j\left(\frac{\omega_r}{\omega_H}\right)^3} \qquad \text{.....(8.79)}$$

ถ้า $\omega = \omega_r$ ความต่างเฟสเป็นศูนย์ นั่นคือ ผลรวมของนิพจน์จินตภาพมีค่าเป็นศูนย์

$$3\frac{\omega_r}{\omega_H} - \left(\frac{\omega_r}{\omega_H}\right)^3 = 0$$

$$\omega_r = \sqrt{3}\,\omega_H \qquad \text{.....(8.80)}$$

แทนค่าจากสมการ (8.80) ลงในส่วนที่เป็นนิพจน์จริง ดังนั้น

$$1 - 3\left(\frac{\omega_r}{\omega_H}\right)^2 = -8$$

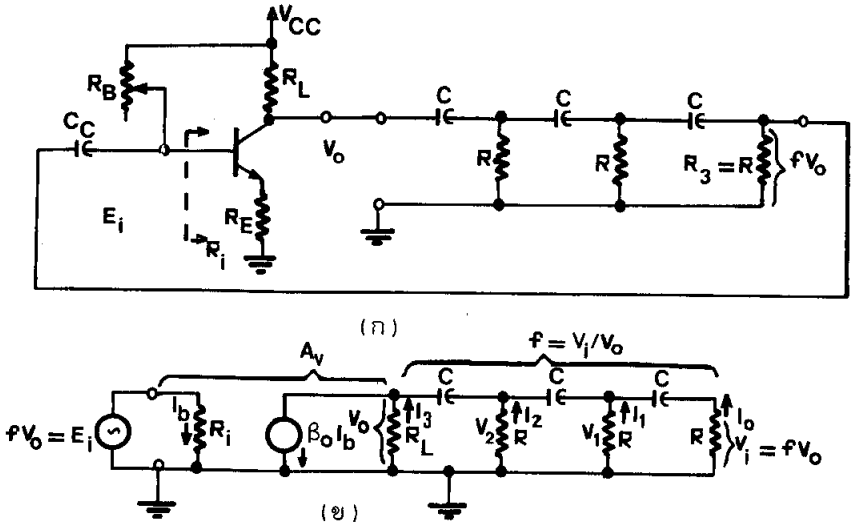
จึงเขียนสมการ (8.79) ได้ใหม่เป็น

$$fA_\omega = \frac{f(A_o)^3}{8} \quad (\omega = \omega_r) \qquad \text{.....(8.81)}$$

ในทางปฏิบัติ เกนลูปของออสซิลเลเตอร์จะมีค่ามากกว่า 1 จากรูป 8.11 ถ้าเดิมให้ $E_i = 1$ mv และ $fA_\omega = 1.1$ ดังนั้น เมื่อมีการเคลื่อนครบลูป E_i จะมีค่าเป็น 1.1 mv ถ้า T = คาบเวลาในการกระทำดังกล่าว และอำพนของออสซิลเลเตอร์จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตราบเมื่อในวงจรไม่มีการทำให้เสถียรด้วยปริมาณที่ไม่เป็นเส้นตรงต่าง ๆ ซึ่งจัดเป็นปริมาณที่ยากในการกำหนดค่าได้แน่นอน เช่น β_F จะลดค่าลงถ้ากระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น เป็นการจำกัดค่า A

8.7.2 เฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์ (Phase-shift oscillator)

วงจรนี้ทำหน้าที่เลื่อนเฟส แสดงรูปวงจรในรูป 8.12 สำหรับความถี่ต่ำ โดยถือว่าทรานซิสเตอร์จะต้องทำให้วงจรมีค่า V_o/E_i มากพอในการชดเชยการสูญเสียในวงจรป้อนกลับ RC และจากเบสไปยังคอลเลคเตอร์มีการเคลื่อนเฟส 180° วงจรป้อนกลับจะต้องออกแบบให้เป็นตัวเพิ่มการเคลื่อนเฟสอีก 180° ณ ความถี่หนึ่ง ๆ ตามกำหนด (คือ ω_r) ตัวอย่าง 8.4 ได้แสดงการวิเคราะห์วงจรนี้เพื่อสะดวกในการศึกษาได้ดีขึ้น



รูป 8.12 (ก) วงจรเฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์
(ข) แบบจำลองของรูป (ก) โดย $E_i = V_i = fV_o$

ตัวอย่าง 8.4 จากรูป 8.14 (ข) R_L มีค่าน้อยมาก และเกน $V_o/E_i \sim R_L/R_E$ ไม่แปรค่ามากนักเมื่อต่อวงจรป้อนกลับ ส่วน R_3 และ R_i มีค่ามากจนสามารถละทิ้งได้ ซึ่งมีผลให้ $R_3 = R$ ส่วน C_C มีค่ามากจนทำให้การเคลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ๆ ณ ω_r ต้องการหา (ก) ω_r ซึ่งทำให้วงจรป้อนกลับมีการเคลื่อนเฟส 180° (ข) ณ ω_r จะได้ f มีค่าเท่าใด (ค) ถ้าต้องการให้ $fA_v = 1$ จะต้องให้มีค่า $A_v = V_o/E_i$ เท่าไร

วิธี

(1) หาค่า V_i/V_o จากรูป 8.14 (ก) โดยเริ่มจาก

$$I_o = \frac{V_i}{R} \qquad \text{.....(i)}$$

(2) จากรูป $V_1 = \frac{I_o}{j\omega C} + V_i$ .....(ii)

(แทนค่า I_o จาก (i) ลงใน (ii))

$$V_1 = V_i(1 + \frac{1}{j\omega RC}) \quad \text{.....(iii)}$$

(3) $V_2 = \frac{I_1 + I_o}{j\omega C} + V_1$ .....(iv)

แทนค่า $I_1 = V_1/R$ และ I_o จาก (i) ลงในสมการ (iv)

$$V_2 = \frac{V_1 + V_i}{j\omega RC} + V_1$$

แทนค่า V_1 จาก (iii)

$$V_2 = \frac{V_i(1 + \frac{1}{j\omega RC}) + V_i}{j\omega RC} + V_i(1 + \frac{1}{j\omega RC})$$

$$= V_i\left[\frac{(1 + \frac{1}{j\omega RC}) + 1}{j\omega RC} + 1 + \frac{1}{j\omega RC}\right]$$

$$= V_i\left[\frac{2}{j\omega RC} + (\frac{1}{j\omega RC})^2 + 1 + \frac{1}{j\omega RC}\right]$$

$$= V_i\left[\frac{3}{j\omega RC} + (\frac{1}{j\omega RC})^2 + 1\right] \quad \text{.....(v)}$$

$$V_o = \frac{I_o + I_1 + I_2}{j\omega C} + V_2$$

แทนค่า $I_2 = V_2/R$

$$V_o = \frac{V_i + V_1 + V_2}{j\omega RC} + V_2$$

แทนค่า V_1 จาก (iii) และ V_2 จาก (v)

$$V_o = \frac{V_i}{j\omega RC} + \frac{1}{j\omega RC}\left[V_i(1 + \frac{1}{j\omega RC})\right] + \frac{1}{j\omega RC}\left[V_i(\frac{3}{j\omega RC} + (\frac{1}{j\omega RC})^2 + 1\right] + V_i\left[\frac{3}{j\omega RC} + (\frac{1}{j\omega RC})^2 + 1\right]$$

$$V_o = V_i \left[1 + \frac{6}{j\omega RC} + 5\left(\frac{1}{j\omega RC}\right)^2 + \left(\frac{1}{j\omega RC}\right)^3\right] \quad \text{.....(vi)}$$

ณ ω_r นิพจน์จินตภาพใน (vi) มีผลรวมเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{6}{\omega RC} - \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^3 = 0$$

$$-6(\omega RC)^2 + 1 = 0$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{6}\,RC} \quad \text{.....(vii)}$$

ต่อไปหาค่า $f = V_i/V_o$ พิจารณาค่าของนิพจน์จริงในสมการ (vi) โดยแทนค่าจากสมการ (vii) เมื่อ $\omega_2 = \omega_r$

$$1 - 5\left(\frac{1}{\omega_r RC}\right)^2 = 29$$

$$f = \frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{29}$$

คำตอบของ ข้อ (ค) คือ $A_v \geq 29$ เพื่อให้ค่า $fA_v \sim 1$

สำหรับตัวอย่าง 8.4 นี้ ถ้า $A_v < 29$ ผลจะเป็นอย่างไร ? คำตอบคือ ปริมาณ fA_v จะไม่เท่ากับ 1 ซึ่งไม่สอดคล้องกับ Bark-hausen criterion ดังนั้น ไม่เกิดการแกว่งตามต้องการ ออสซิล-เลเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เลื่อนเฟสเช่นดังกล่าวข้างต้น จัดเป็นพวก RC ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งนอกเหนือจากตัวอย่างวงจรดังอธิบายแล้วนี้ ยังมีวีนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ (Wien-bridge oscillator) ที่จัดเป็นประเภทเดียวกัน แต่ลักษณะสมบัติการทำงานไม่เหมือนกัน และขอยกเว้นการกล่าวรายละเอียดในบทนี้

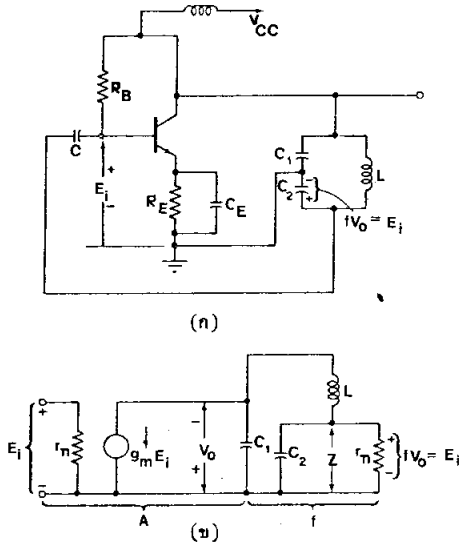
8.7.3 ออสซิลเลเตอร์แบบวงจรกำทอน

ออสซิลเลเตอร์พวกนี้ทำหน้าที่เลือกความถี่ของการแกว่ง นิยมใช้เป็นวงจรเลือกความถี่ ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ L และตัวจุ C หลักการพื้นฐานคืออาศัยการเกิดความถี่กำทอนในวงจร ตัวอย่างที่จะกล่าวถึงคือ ออสซิลเลเตอร์ฮาร์ทลีย์ (Hartley oscillator) และ โคลพิทส์ (Colpitts oscillator) ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรของ LC ตรงข้ามกัน

เริ่มศึกษาโคลพิทส์ออสซิลเลเตอร์ แสดงในรูป 8.13 ซึ่งต้องมีเกนลูปเป็น 1 และมีการเคลื่อนเฟสเป็นศูนย์ ณ ความถี่กำทอน ω_r ขดลวดเหนี่ยวนำจะกันไม่ให้ V_{cc} ลัดวงจร C_1 ที่ความถี่

กำทอน ω_r (หรือเป็นความถี่ที่เกิดการแกว่ง) C จะลัดวงจร และสำหรับ C_2 อาจดัดแปลงจำลองให้เป็นค่ารวมทั้ง C_π (หรือ C_μ) ด้วยก็ได้ แยกวิเคราะห์เป็นกรณี ดังนี้

(1) หาปริมาณทางคณิตศาสตร์ของเกนลูป ในรูป 8.13 (ข)



รูป 8.13 (ก) วงจรโคลพิทส์ออสซิลเลเตอร์ (ข) แบบจำลองของรูป (ก)

$$V_o = g_m E_i [X_{c1} // (X_L + Z)] \qquad \text{.....(8.82)}$$

จากรูป 8.15 (ข) fV_o เป็นส่วนหนึ่งของแรงดันไฟฟ้า V_o ซึ่งถูกแบ่งระหว่าง Z และ X_L ดังนั้น

$$fV_o = V_o \frac{Z}{(Z + X_L)} \qquad \text{.....(8.83)}$$

แทนค่า V_o จากสมการ (8.82) ลงในสมการ (8.83)

$$fV_o = g_m E_i \frac{ZX_{C1}}{(X_{C1} + X_L + Z)} \qquad \text{.....(8.84)}$$

โดย $$Z = \frac{r_\pi}{1 + j\omega C_2 r_\pi} \qquad \text{.....(i)}$$

กรณีเกิดการแกว่ง fV_o ต้องเท่ากับ E_i ดังนั้น จากสมการ (8.84) แทนค่า $fV_o = E_i$, ค่า Z จาก (i), $X_L = j\omega L$ และ $X_{C1} = 1/j\omega C_2$ นั่นคือ

$$1 = \frac{g_m r_\pi}{1 + j\omega (C_1 r_\pi + C_2 r_\pi - \omega^2 L C_1 C_2 r_\pi) - \omega^2 L C_1} \qquad \text{.....(8.85)}$$

(2) เพื่อหาสมการความถี่กำทอน (หรือค่าความถี่เมื่อเกิดการแกว่ง) อาศัยเงื่อนไขซึ่งถือว่า ณ ความถี่ ω_r นิพจน์จินตภาพมีผลรวมเป็นศูนย์ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L\left(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\right)} \qquad \text{.....(8.86)}$$

สังเกตจากสมการ (8.86) แสดงว่า สามารถใช้วิธีการตรวจพินิจหาค่า ω_r โดยอาศัยความถี่กำทอนของวงจรรูปแทงค์ (tank circuit) LC

(3) ณ ความถี่ $\omega = \omega_r$ นิพจน์จริงในสมการ (8.85) มีค่าเป็น

$$g_m r = -\frac{C_1}{C_2} = \beta_0 \qquad \text{.....(8.87)}$$

หรือ $$-fA = -\beta_0 \frac{C_2}{C_1} \qquad \text{.....(8.88)}$$

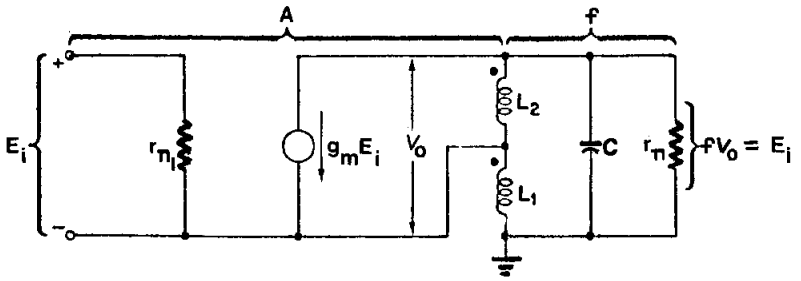
จากสมการ (8.88) $f = \frac{C_2}{C_1}$ และ $A = \beta_0$ นั่นคือ β_0 ต้องมีค่ามากกว่า C_2/C_1 จึงจะเกิดการแกว่งหรืออออสซิลเลชัน

โดยทั่วไปนิยมใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ชนิดนี้กับวงจรขยายคลาส C (class C operation) เพื่อให้เกิดกำลังตามต้องการที่ความถี่สูง จึงอาจเรียกชื่อเป็นออสซิลเลเตอร์กำลัง (power oscillator)

ถ้าต่อวงจรออสซิลเลเตอร์โดยสลับที่ของ L และ C ดังแสดงในรูป 8.16 เรียกชื่อเป็นฮาร์ทลีย์ออสซิลเลเตอร์ (Hartley oscillator) ความถี่ซึ่งเกิดออสซิลเลชันหาค่าได้ 2 แบบ คือ

(1) เมื่อไม่มีการต่อระหว่าง L_1 และ L_2

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C(L_1+L_2)}} \qquad \text{.....(8.89)}$$



รูป 8.14 แบบจำลองวงจรเปิดของฮาร์ทลีย์ออสซิลเลเตอร์

ในทำนองเดียวกับโคลพิทส์ออสซิลเลเตอร์ สามารถพิสูจน์ได้ว่า $f = L_2/L_1$ และ $A = \beta_o$ ซึ่งต้องทำให้ β_0 มีค่าเกิน L_1/L_2 จึงจะเกิดออสซิลเลชัน

(2) ถ้ามีการต่อระหว่าง L_1 และ L_2 ต้องคำนึงถึงค่าความนำร่วม (mutual inductance) ซึ่งแทนด้วยอักษร M และเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C\,(L_1+L_2+2\,M)}} \qquad \text{.....(8.90)}$$

8.7.4 ผลึกออสซิลเลเตอร์

ความหมายของหัวชื่อเรื่องในตอนนี้ หมายถึงผลึกบางประเภทที่มีคุณสมบัติในการก่อผลแบบเพียสโซอิเล็กทริค (piezoelectric effect) เช่น โลหะพวกควอร์ทซ์ (quartz) กล่าวคือ ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับผลึก จะมีผลให้ผลึกนั้นขยายหรือหดตัวได้ ขึ้นกับขั้วบวกหรือลบ ถ้าหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้า ผลึกจะกลับสู่สภาพเดิม ในการนี้ย่อมเกิดปฏิกิริยาสร้างแรงดันไฟฟ้าซึ่งตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้ากิริยา (ที่เกิดมีขึ้นทีแรก) ลักษณะเช่นนี้คือการแกว่งแบบถูกหน่วงให้ช้าลง (เช่นเดียวกับสปริงที่ถูกอัดแล้วปล่อยให้ยืด) กลไกในการแกว่งเป็นดังนี้ เมื่ออิเล็กโทรด(electrode) ของแผ่นควอร์ทซ์ต่ออยู่กับต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มันจะเกิดการแกว่ง เป็นผลให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งจะทำปฏิกิริยากับต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้า ณ ความถี่กำทอนของผลึก การแกว่งและปริมาณสัญญาณไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด

สมการการเคลื่อนที่แบบดังกล่าวนี้ เขียนได้เป็น

$$m\frac{d^2x}{dt} + b\frac{dx}{dt} + kx = F(t) \qquad \text{.....(8.91)}$$

โดย m หมายถึงมวลของผลึก

b เป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงกลภายในเนื้อผลึก

k เป็นค่าคงที่การยืดหยุ่นของผลึก

สมการ (8.91) มีรูปเช่นเดียวกับสมการของกระแสในวงจรอนุกรมกำทอน (series resonant circuit) ดังนี้

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}i = F(t) \qquad \text{.....(8.92)}$$

เปรียบเทียบสมการ (8.91) และ (8.92) แบบนิพจน์ต่อนิพจน์ เห็นได้ว่า

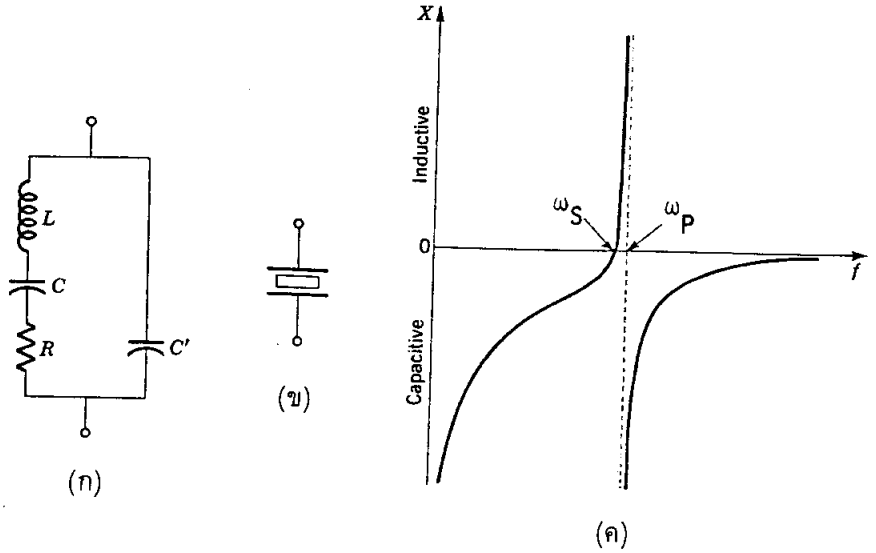
(1) ความเหนี่ยวนำ L เทียบได้กับมวล m ที่เกิดการแกว่ง

(2) ความต้านทาน R เทียบได้กับการสูญเสียเชิงกล

(3) ส่วนกลับของความจุ $\frac{1}{C}$ เทียบได้กับความยืดหยุ่น

ซึ่งคาดว่าการเกิดกำทอนของวงจรไฟฟ้า RLC ย่อมเกิดได้เช่นเดียวกัน วงจรแสดงในรูป 8.15 (ก) ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวจุ ต่ออนุกรมกันอยู่ และวงจรอนุกรมนี้ต่อขนานอยู่กับตัวจุ C′ ซึ่งแทนความจุของประจุไฟฟ้าสถิตของอิเล็กโทรด (กล่าวคือ เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า หรืออิเล็กโทรด 2 แผ่น ขนานกัน โดยมีผลึกเป็นไดอิเล็กทริค (dielectric) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนในวงจรไฟฟ้าแสดงในรูป 8.15 (ข) คือ ตัวจุแบบแผ่นขนาน มีผลึกอยู่ตรงระหว่างกลาง

สืบเนื่องจากแบบจำลองวงจรของออสซิลเลเตอร์แบบผลึก ซึ่งประกอบด้วยวงจรอนุกรม (ของ R, L และ C) และขนาน (กับ C′) ดังนั้น ความถี่กำทอนควรมี 2 ค่า คือ ความถี่กำทอนของวงจรอนุกรม (ความขัดเป็นศูนย์), ω_s และความถี่กำทอนของวงจรขนาน (ความขัดมีค่าอนันต์), ω_p โดย



รูป 8.15 (ก) แบบจำลองวงจรเทียบเท่าของผลึกควอร์ทซ์ (ข) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนผลึกออสซิลเลเตอร์ในวงจรไฟฟ้า (ค) ความขัดของผลึกควอร์ทซ์

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

สมการ (8.93) เป็นความถี่ซึ่งค่ารีแอคแตนซ์ (reactance) ของแขนทั้งสองของวงจรเท่ากัน ถ้าความถี่สูงกว่า ω_{s1} ความเหนี่ยวนำ (inductance) ในวงจรอนุกรมจะเคลื่อนสู่วงจรของ C′ และเกิดกำทอนเมื่อ

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L}\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C}\right)} \qquad \text{.....(8.94)}$$

ตามที่กล่าวข้างต้น ω_p มีค่ามากกว่า ω_s แต่ $C' >> C$ ดังนั้น ความถี่ทั้งสองถือได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปมีค่าดังนี้

$L \sim 137$ henrys, $C \sim 0.02$ pF

$R \sim 15000$, $C' \sim 3$ pF

แสดงรูปกราฟของ ω_s และ ω_p ในรูป 8.15 (ค)

อนึ่ง ได้กำหนดปริมาณที่บ่งถึงเสถียรภาพของความถี่ในการแกว่ง เรียกชื่อเป็น ตัวประกอบ Q (Q-factor) ถ้า Q มีค่าสูง เส้นกราฟความถี่กำทอนจะเป็นยอดแหลมและแคบ อัตราการเปลี่ยนเฟสตามความถี่มีความเร็วมาก ผลึกออสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพความถี่สูง

ถ้าแทนผลึกออสซิลเลเตอร์ (หรือวงจรเทียบเท่า) ในตำแหน่งของ L ในรูป 8.15 (ก) เป็นการใช้ผลึกออสซิลเลเตอร์ควบคุมโคลพิทส์ออสซิลเลเตอร์ ตัวจุ C_1 และ C_2 ไม่มีผลต่อ ω_r แต่จะเป็นตัวควบคุมตัวประกอบป้อนกลับ f กรณีความจุเทียบเท่าของวงจรอนุกรมมีค่าใกล้เคียงความจุของผลึก C'

8.8 บทสรุป

วิธีการป้อนกลับสัญญาณเอาท์พุท สู่วงจรอินพุทของโครงร่างวงจรเดียวกันแยกได้ 2 ลักษณะ คือ (1) การป้อนกลับแบบลบ (2) การป้อนกลับแบบบวก หรือเรียกว่า "ออสซิลเลเตอร์"

ประโยชน์ของวงจรป้อนกลับแบบลบ คือ ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของวงจรขยาย ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่แตกต่างจากการใช้ธาตุวงจรภายนอก (เช่น ตัวต้านทาน เป็นต้น) ส่วนวงจรป้อนกลับแบบบวกหรือออสซิลเลเตอร์ ใช้ในการสร้างคลื่นรูปซายน์ แยกเป็น

(1) ออสซิลเลเตอร์แบบ RC เช่น เฟสชิฟท์ออสซิลเลเตอร์ และวีนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ (Wien-bridge oscillator)

(2) ออสซิลเลเตอร์แบบ LC ได้แก่ โคลพิทส์ และฮาร์ทลีย์ออสซิลเลเตอร์

(3) ผลึกออสซิลเลเตอร์ ได้แก่ ผลึกควอร์ทซ์ หรือวงจรอนุกรม R, C, L

(4) ออสซิลเลเตอร์นอกเหนือจาก 3 ชนิดแรก ใช้สร้างคลื่นที่ไม่เป็นรูปซายน์ เรียกเป็น "รีแลกเซชัน-ออสซิลเลเตอร์" (relaxation oscillator) ค้นหารายละเอียดได้ในหนังสือไฟฟ้าเบื้องต้นทั่วไป ตัวอย่าง เช่น ตัวสร้างคลื่นรูปฟันเลื่อย เป็นต้น

การแกว่งแบบที่เรียกออสซิลเลชันเกิดจากการป้อนกลับแบบบวก ซึ่งผลิตสัญญาณเอาท์พุทได้โดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณอินพุท กล่าวคือ ถ้าจัดวงจรให้มีค่า $fA_v = 1$ เกนจะมีค่าใกล้เคียงอนันต์ หมายความว่า จะยังคงปรากฏสัญญาณเอาท์พุทเสมอ แม้ว่าสัญญาณอินพุทเป็นศูนย์ก็ตาม

ในการใช้ออสซิลเลเตอร์เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ให้กลายเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับนั้น การออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณ และเสถียรภาพความถี่ เป็นสำคัญ

แบบฝึกหัดบทที่ 8

8.1 การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบทำได้กี่แบบ อะไรบ้าง ?

8.2 จุดประสงค์ในการต่อวงจรป้อนกลับแบบลบ คืออะไร ?

8.3 จากรูป 8.2 ถ้ากำหนด $A = 500$, $f = 0.02$, และ $V_o = 5$ v จงหาค่าของ E_i และ E_{if} ที่สมนัยกัน

8.4 อาศัยข้อกำหนดในโจทย์ 8.3 จงหาปริมาณป้อนกลับในหน่วยของเดซิเบล

8.5 ตามตัวอย่าง 8.1 ถ้า A_{v1} เพิ่มค่าเป็น 500 จะมีผลการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ?

8.6 เครื่องขยายหนึ่งมีเกนลูปเมื่อเปิดวงจร $A_v = 1000$ ลดลงเป็น 100 เมื่อป้อนสัญญาณกลับแบบลบ (ก) ส่วนที่ป้อนกลับมีปริมาณเท่าใด (ข) ตัวประกอบปรับปรุงคุณภาพมีค่าเท่าใด (ค) อัตราส่วนที่ย้อนกลับ หรือลูปเกนมีค่าเท่าใด ?

8.7 แสดงค่า f และความสัมพันธ์ของปริมาณอินพุทและเอาท์พุท (ซึ่งถูกทำให้มีค่าคงที่) ของวงจรในรูป 8.7, 8.9, และ 8.10

8.8 ตามรูป 8.11 ถ้าแต่ละภาคขยายมีค่า $\omega_H = 100$ kHz ณ ค่าความถี่เท่าใดจึงเกิดการแกว่ง ? ถ้าแต่ละภาคขยายมีค่า $A_o = 5$ จงหาส่วนป้อนกลับค่าต่ำสุดซึ่งเริ่มเกิดการแกว่ง

8.9 จงอธิบายประโยชน์ของวงจรออสซิลเลเตอร์

8.10 วงจรไฟฟ้าใดซึ่งอาจใช้แทนผลึกควอร์ทซ์ได้ อธิบายได้ดังนี้

8.10.1 สมการทางคณิตศาสตร์

8.10.2 กลไกการทำงานของผลึกเพื่อก่อให้เกิดการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า

8.11 ผลึกควอร์ทซ์ถูกออกแบบให้มีค่า $R = 250\ \Omega$, $C = 0.05$ pF, $C' = 5$ pF และ $L = 5$ H จงหา (ก) ความถี่กำทอนแบบอนุกรม (ข) ความถี่กำทอนแบบขนาน