

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในรายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาการออกแบบวงจรของความถี่และวงจรให้กำเนิดสัญญาณ จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกลุ่มวงจรและทฤษฎีพื้นฐานรวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. หลักการของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ
2. วงจรสะท้อนกระแส
3. หลักการพื้นฐานของทรานส์ลิเนียร์
4. วงจรขยายคลาส AB แบบทรานส์ลิเนียร์รูป
5. วงจรขยายความนำถ่ายโอน
6. วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
8. สรุป

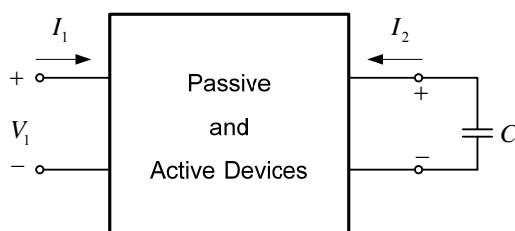
2.1 หลักการของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

ปัจจุบันนี้ การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำเป็นหัวข้อวิจัยหลักที่ได้รับ ความสนใจ จากนักวิจัยในสาขาการออกแบบวงจรแอนะล็อก เนื่องจากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ สามารถใช้แทนตัวเหนี่ยวนำ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรของความถี่ วงจรกำจัดค่าอุปกรณ์แฝงในวงจร (Ferri and Guerrini, 2003) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การออกแบบวงจรมันั้นไม่นิยมใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวด เนื่องจากมีข้อเสียหลายประการ เช่น มี น้ำหนักมาก ขนาดใหญ่ ไม่สามารถที่จะปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ง่าย แม้จะสามารถสร้างตัว เหนี่ยวนำแบบกันหอย (Spiral inductor) ให้เป็นวงจรมเพื่อใช้งานในด้านความถี่สูงได้ แต่ชิปจะมี ขนาดใหญ่มาก และไม่สามารถที่จะปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ง่าย จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติสามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์แบบเชิงเส้นอันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่แรงดัน V_L คือแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและกระแส I_L คือกระแสที่ไหลเข้าขดลวดเหนี่ยวนำวิธีการเขียนแบบตัวเหนี่ยวนำ ทำได้โดยพิจารณาจากวงจรข่าย 2 ขั้ว ซึ่งอาจประกอบด้วยจำพวกอุปกรณ์แบบพาสซีฟหรือแอคทีฟ โดยที่ขั้วที่ 2 ถูกต่อเข้ากับตัวเก็บประจุและต้องการอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ขั้ว 1 เป็นค่าความเหนี่ยวนำ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (สมคิด, 2546)



ภาพที่ 2.1 หลักการของวงจรเขียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ขั้ว 1 และ 2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_1 = L \frac{dI_1}{dt} \quad (2.2)$$

$$I_2 = -C \frac{dV_2}{dt} \quad (2.3)$$

จากระบบสมการของวงจรข่าย 2 ขั้ว จะได้ว่า

$$V_1 = R_{11} I_1 + R_{12} I_2 \quad (2.4)$$

$$V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \quad (2.5)$$

โดยที่

R_{11} คือ ความต้านทานขาเข้าเมื่อเปิดวงจรถูกั้วขาออก

R_{12} คือ ความต้านทานส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรถูกั้วขาเข้า

R_{21} คือ ความต้านทานส่งผ่านเมื่อเปิดวงจรถูกั้วขาออก

R_{22} คือ ความต้านทานขาออกเมื่อเปิดวงจรถูกั้วขาเข้า

นำสมการที่ (2.3) และผลการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.5) แทนลงในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$V_1 = R_{11}I_1 - CR_{12}R_{21} \frac{dI_1}{dt} - CR_{12}R_{22} \frac{dI_2}{dt} \quad (2.6)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.1) และ (2.6) จะพบว่าสมการที่ (2.6) จะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

$$R_{11} = R_{22} = 0 \quad (2.7)$$

$$R_{12} = R_{21} = -\frac{L}{C} \quad (2.8)$$

ถ้าต้องการอิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นบวกสมการที่ (2.7) จะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

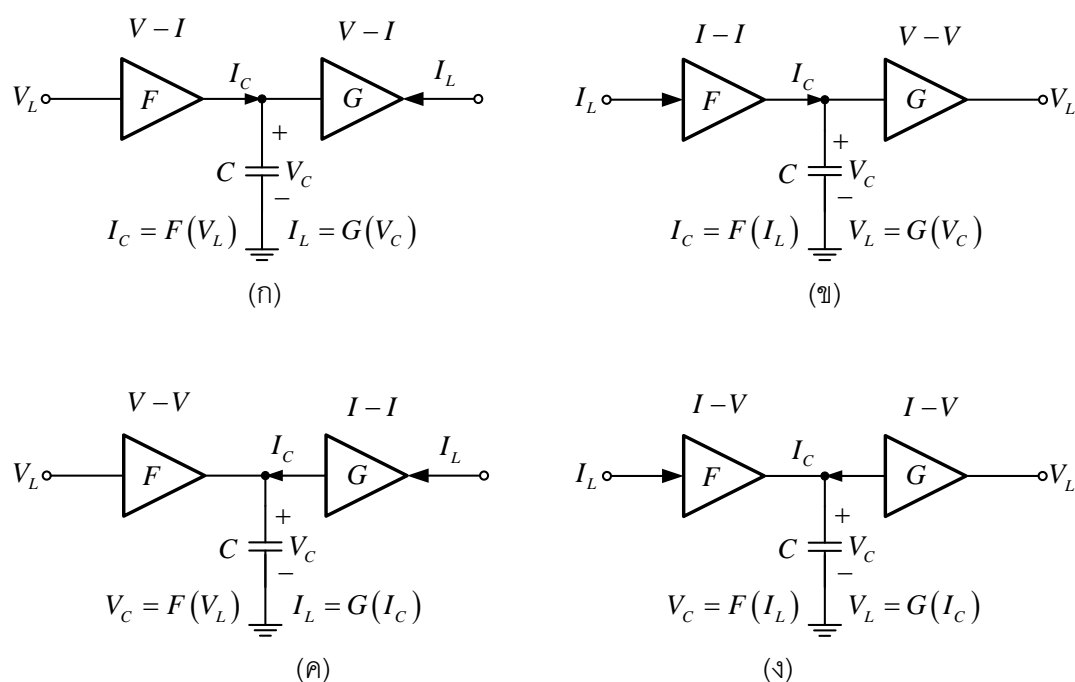
$$R_1 = -R_{12}, R_2 = R_{21} \quad (2.9)$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ CR_1R_2 จากระบบสมการที่ (2.4)-(2.5) และเงื่อนไขในสมการที่ (2.9) สามารถเขียนเป็นระบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{V_1}{-R_1} = I_2 = F(V_1) \quad (2.10)$$

$$\frac{V_2}{R_2} = I_1 = G(V_2) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) แสดงให้เห็นว่าในการสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์สร้างความสัมพันธ์ของแรงดันขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 ในรูปแบบของกระแสและใช้อุปกรณ์ในการสร้างความสัมพันธ์แรงดันที่ขั้วที่ 2 ไปยังขั้วที่ 1 ในรูปแบบกระแส โดยขั้วที่ 2 ถูกต่อกับตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 อาจอยู่ในรูปของกระแสกับกระแส และความสัมพันธ์ระหว่างขั้วที่ 2 ไปยังขั้วที่ 1 อาจอยู่ในรูปของแรงดันกับแรงดัน จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปความเป็นไปได้ของโครงสร้างการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำดังภาพที่ 2.2 (Thanachayanont, 1999)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 2.2(ก) โดยที่ F และ G คือ ตัวแปรแรงดันเป็นกระแส (V-I Converter) ตัวอย่างเช่น กระแส I_C เป็นฟังก์ชันของแรงดันที่ตกคร่อม ตัวเหนี่ยวนำ V_L และกระแสขาออก I_L เป็นฟังก์ชันของแรงดันที่ตกคร่อม V_C ดังนี้

$$I_C = F(V_L) \quad (2.12)$$

$$I_L = G(V_C) \quad (2.13)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.12) และ (2.13) ทั้งสองข้างเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dt} \cdot \frac{dV_C}{dt} \quad (2.14)$$

แทนค่า $\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_C}{C}$ และ I_C จากสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ว่า

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dV_C} \cdot \frac{F(V_L)}{C} \quad (2.15)$$

เมื่อ $\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L}$ จะได้ว่า

$$\frac{V_L}{L} = \frac{dG(V_C)}{dV_C} \cdot \frac{F(V_L)}{C} \quad (2.16)$$

พิจารณาจากสมการที่ (2.16) แสดงให้เห็นว่า สามารถสร้างวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อมีการกำหนดให้ฟังก์ชัน G มา ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำก็จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ F ในลักษณะคล้ายกับ ฟังก์ชัน F หรือ G ของโครงสร้างการเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 2.2(ข) (ค) และ (ง) สามารถสร้างได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

จากโครงสร้างในภาพที่ 2.2(ก) หากสมมุติให้ G คือ ฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้น I_L มีค่าเท่ากับ

$$I_L = G(V_L) = G_{m2}V_C \quad (2.17)$$

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของโครงสร้างวงจรถ่ายแบบตัวเหนี่ยวนำ

ฟังก์ชันของแรงดันและกระแส	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส
$I_C = F(V_L), I_L = G(V_C)$	$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(V_C)}{dt} \cdot \frac{dV_C}{dt} \& \frac{dV_C}{dt} = \frac{F(V_C)}{C}$
$I_C = F(I_L), V_L = G(V_C)$	$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dI_C}{dF(I_L)} \& \frac{dI_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(\frac{\frac{dV_L}{dt}}{\frac{dG(V_C)}{dV_C}} \right)$
$V_C = F(V_L), I_L = G(I_C)$	$\frac{dI_L}{dt} = \frac{dG(I_C)}{dI_C} \cdot \frac{dI_C}{dt} \& C \frac{d^2V_C}{dt^2} = C \frac{d}{dt} \left(\frac{dF(V_L)}{dV_L} \cdot \frac{dV_L}{dt} \right)$
$V_C = F(I_L), V_L = G(I_C)$	$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\frac{dV_C}{dt}}{\frac{dF(I_L)}{dI_L}} \& \frac{dI_C}{dt} = \frac{1}{C} I_C = \frac{G^{-1}(V_L)}{C}$

จากสมการที่ (2.16) ดังนั้นจะได้ F เป็นฟังก์ชันของ V_L มีค่าเท่ากับ

$$I_C = F(V_L) = \left(\frac{C}{LG_{m2}} \right) V_L \quad (2.18)$$

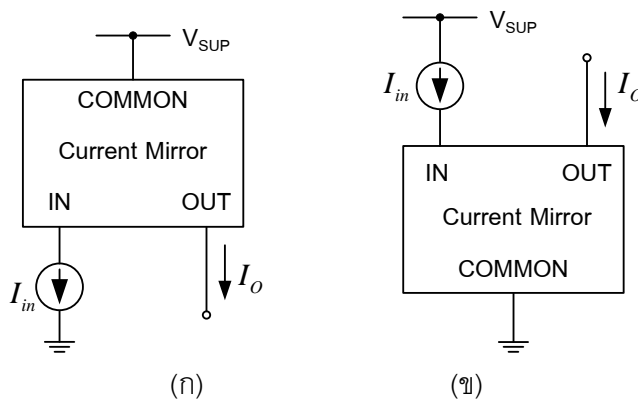
จากสมการที่ (2.18) ฟังก์ชัน F ที่ได้มีความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_L อย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นฟังก์ชัน F สามารถสร้างได้โดยใช้ทรานคอนดักเตอร์

$$I_C = G_{m1}V_L \quad (2.19)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (2.18) และ (2.19) ทำให้ค่าอินดักแตนซ์ $L = C/G_{m1}G_{m2}$ จากโครงสร้างดังกล่าวเป็นการใช้ตัวผันแปรแรงดันเป็นกระแส 2 ตัว กับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัว ดังนั้นอาจเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ไจเรเตอร์-ซี

2.2 วงจรสะท้อนกระแส

วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) เป็นวงจรที่มีอย่างน้อย 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วจุดร่วม ขั้วขาเข้า และขั้วขาออก โดยขั้วจุดร่วมจะเป็นจุดต่อแหล่งจ่ายไฟหรือกราวนด์ ดังภาพที่ 2.3 วงจรสะท้อนกระแสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่สะท้อนกระแสจากกระแสอ้างอิงในสาขา (Branch) หนึ่งไปยังสาขาอื่นๆ (Gray et al., 2001) โดยกระแสที่ถูกสะท้อนมาหรือกระแสเอาต์พุตที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้จะมีความสัมพันธ์กับกระแสอินพุตอย่างคงที่ โดยไม่ขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต แหล่งจ่ายกำลัง และผลของอุณหภูมิ ในทางอุดมคติแล้ววงจรสะท้อนกระแสจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ความต้านทานจุดเข้าของสัญญาณต่ำและมีความต้านทานจุดออกสูง จากคุณสมบัตินี้ทำให้วงจรสะท้อนกระแสได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เป็นอย่างมาก เช่น ภาคขยายกำลังของระบบเซอร์โวมอเตอร์ ภาคขยายกำลังในเครื่องขยายเสียง ภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าของเครื่องมีวัดใช้เป็นภาระของวงจรถ่ายสัญญาณขนาดเล็กในวงจรรวม และใช้เป็นวงจรส่งผ่านกระแส เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสามารถสร้างขึ้นมาจากทั้งไปโพลาร์และมอสทรานซิสเตอร์ แต่จะกล่าวถึงเฉพาะไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์เท่านั้น



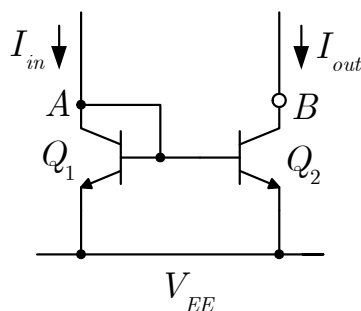
ภาพที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสะท้อนกระแส (ก) ชนิดบวก (ข) ชนิดลบ

2.2.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบใช้ไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์

วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ถ้าไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีความสมพงษ์กันทุกประการ ความสัมพันธ์ของกระแสจุดเข้า I_{in} และกระแสจุดออก I_{out} สามารถหาได้ดังนี้ (มนตรี, 2547)

ผลรวมกระแสที่จุด A จะได้

$$I_{in} - I_{C1} - \frac{2I_{C1}}{\beta} = 0 \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.4 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน

เนื่องจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 สมพงษ์กันทุกประการ ดังนั้นจากสมการที่ (2.20) จะได้

$$I_{out} = I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{in}}{1 + \frac{2}{\beta}} = \left[1 - \frac{2}{\beta + 2} \right] I_{in} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_o = \varepsilon_{CM} I_{in} \quad (2.22)$$

โดยที่ ε_{CM} คือ ค่าความผิดพลาดในการสะท้อนกระแสซึ่งเท่ากับ

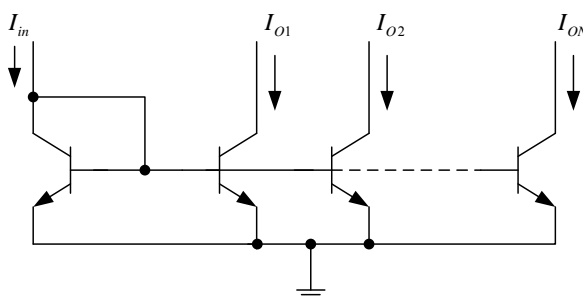
$$\varepsilon_{CM} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) หากอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ (β) มีค่ามากๆ ε_{CM} จะมีค่าประมาณ 1 จากสมการที่ (2.22) เขียนได้ใหม่ดังนี้

$$I_O \cong I_{in} \quad (2.24)$$

สำหรับกรณีที่ต้องการสะท้อนกระแสออกมาหลายขาออกสามารถทำได้โดยการต่อวงจรดังภาพที่ 2.5 ซึ่งในกรณีนี้ถ้าทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการจะได้กระแสขาออกดังนี้

$$I_{O1} = I_{O2} = \dots = I_{ON} = I_{in} \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.5 วงจรสะท้อนกระแสแบบง่ายหลายขาออก

สำหรับความต้านทานต่อสัญญาณขนาดเล็กที่จุดเข้า (r_{in}) ของวงจรในภาพที่ 2.4 จะมีค่าประมาณเท่ากับค่าความต้านทานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ต่ออยู่ในรูปของไดโอดซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$r_{in} = \frac{V_T}{I_{in}} \quad (2.26)$$

โดยที่ V_T คือ ค่าศักดาความร้อน (Thermal voltage) มีค่าเท่ากับ kT/q เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ ส่วน q เป็นค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน 1 ตัว มีค่าเท่ากับ $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ และ T เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน ซึ่งที่อุณหภูมิ 27°C จะได้ค่า V_T ประมาณ 26mV

ส่วนความต้านทานจุดออกต่อสัญญาณขนาดเล็ก r_o จะมีค่าประมาณเท่ากับความต้านทานระหว่างขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 และศักดาตินหรือกราวนด์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$r_o = \frac{V_A}{I_{out}} \quad (2.27)$$

โดยที่ V_A คือค่าแรงดันจุดเริ่ม (Early Voltage)

2.2.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรสะท้อนกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรสะท้อนกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะสามารถหาได้จากคุณสมบัติทางความถี่ของอัตราขยายกระแส β ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งสามารถที่จะเขียนได้ดังนี้

$$\beta(s) = \frac{\beta_0}{1+T(s)} \quad (2.28)$$

เมื่อ $T(s) = \frac{\beta_0}{\omega_T}$ โดยที่ β_0 คืออัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่สัญญาณไฟตรงและ ω_T คือความถี่ที่ทำให้ค่า β ของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับหนึ่ง ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรสะท้อนกระแสจะสามารถหาได้จากการแทนค่า β ด้วย $\beta(s)$ ในสมการที่ (2.28) ดังนั้นจากสมการที่ (2.21) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในภาพที่ 2.4 จะหาได้ดังนี้

$$I_{out}(s) = \left[\frac{\beta_0}{\beta_0 + 2 + 2Ts} \right] I_{in}(s) = \left[1 - \frac{2}{\beta_0 + 2} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{2Ts}{(\beta_0 + 2)}} \right] I_{in}(s) \quad (2.29)$$

กรณีที่ $\beta_0 \gg 2$ จะได้ว่า

$$I_{out}(s) = \left[1 - \frac{2}{\beta_0} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{2}{\omega_T} s} \right] I_{in}(s) \quad (2.30)$$

ซึ่งจะได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในภาพที่ 2.4 จะมีค่าประมาณ $\omega_T / 2$

2.3 หลักการพื้นฐานของทรานส์ลิเนียร์

Barrie Gilbert ได้นำเสนอหลักการของวงจรถานส์ลิเนียร์ (Translinear) ขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1975 (Gilbert, 1975) โดยใช้คุณสมบัติของค่าส่งผ่านความนำในกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (Linear) นั่นจึงเป็นที่มาของชื่อทรานส์ลิเนียร์ Trans+Linear วงจรถานส์ลิเนียร์จะทำงานในโหมดกระแส ซึ่งตัวอย่างการใช้งานวงจรถานส์ลิเนียร์ที่รู้จักกันดีได้แก่ วงจรคูณสัญญาณ นอกจากนี้ก็ยังพบการประยุกต์ใช้งานวงจรถานส์ลิเนียร์ในหลายส่วนต่อไปนี้ เช่น วงจรสะท้อนกระแส ภาคขาออกของออปแอมป์ วงจรสายพานกระแสและวงจรขยายป้อนกลับกระแส (Current feedback amplifier) เป็นต้น (อมร, 2543)

ในการออกแบบวงจรถานส์ลิเนียร์จากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความนำถ่ายโอนกับค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนี้

$$g_m = \frac{dI}{dV} = aI \quad (2.31)$$

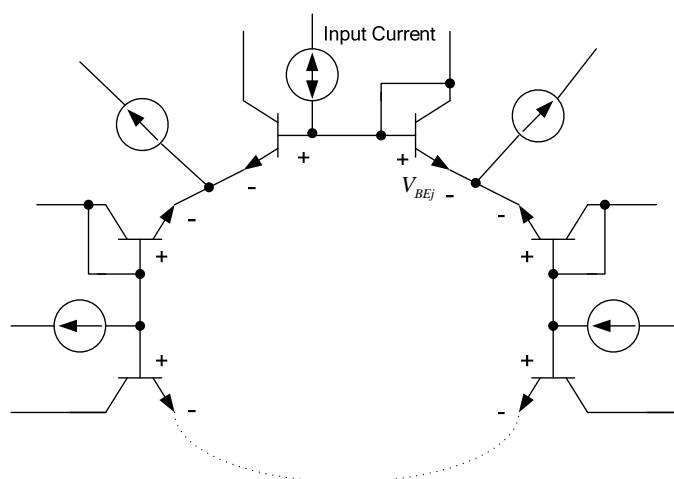
เมื่อ a คือ ค่าคงที่ๆ เกี่ยวข้องกับ I หรือ V ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.31) จะได้ว่า

$$I = be^{aV} \quad (2.32)$$

เมื่อ b คือ ค่าคงที่ๆ เกี่ยวข้องกับ I หรือ V

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.32) พบว่ากระแส I มีความสัมพันธ์กับแรงดัน V เป็นแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล ซึ่งจะเหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C กับแรงดัน V_{BE} ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จากคุณสมบัตินี้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับวงจรที่ประกอบด้วยรอยต่อของสารพี-เอ็นเป็นจำนวนคู่ และต่อกันอยู่ในลักษณะไบอัสตรงโดยที่รอยต่อพี-เอ็น แต่ละตัวจะถูกต่อเข้ากับขั้วของรอยต่อตัวอื่นๆ เรียงกันไปเป็นลูกบ ซึ่งสามารถเรียกวจรลักษณะแบบนี้ว่าวงจรถานส์ลิเนียร์ลูกบ (Toumarzou et al., 1990) โดยปกติวงจรถานส์ลิเนียร์ลูกบจะมีเพียงหนึ่งลูกบ แต่โดยความจริงแล้วสามารถจะมีกี่ลูกบก็ได้ ซึ่งรอยต่อพี-เอ็นเหล่านี้จะเป็นรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด หรือรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ก็ได้ แต่โดยปกติแล้วจะใช้รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์

ในการทำความเข้าใจการทำงานของวงจรถานสี่เหลี่ยมรูปนั้น จะเริ่มพิจารณาแรงดันที่ลูปปิดที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ที่ได้รับไบอัสตรง โดยจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ที่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) และส่วนที่สองแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CCW) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยที่แหล่งจ่ายกระแสที่ป้อนให้กับวงจรอาจเป็นกระแสไบอัสเพื่อกำหนดจุดการทำงานของทรานซิสเตอร์หรือจะเป็นกระแสขาเข้าก็ได้ ส่วนกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะเป็นได้ทั้งขาเข้าและขาออกก็ได้ ใช้ KVL เพื่อแสดงผลรวมของแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ รอบลูปปิดของวงจรในภาพที่ 2.6 สามารถจะเขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 2.6 รูปแบบทั่วไปของวงจรถานสี่เหลี่ยมรูป

$$\sum_{j=1}^N V_{BEj} = 0 \quad (2.33)$$

หรือ

$$\sum_{CW} V_{BEj} = \sum_{CCW} V_{BEj} \quad (2.34)$$

ซึ่ง

$$V_{BEj} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{Cj}}{I_s}\right) \quad (2.35)$$

หรือ

$$V_{BEj} = V_T \ln \left(\frac{I_{Cj}}{A_j J} \right) \quad (2.36)$$

โดยที่ $V_T = \frac{kT}{q}$ และ $I_S = A_{Ej} J_S$ แทนค่าสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.34) จะได้ดังนี้

$$\sum_{CW} V_T \ln \left(\frac{I_{Cj}}{A_{Ej} J_S} \right) = \sum_{CCW} V_T \ln \left(\frac{I_{Cj}}{A_{Ej} J_S} \right) \quad (2.37)$$

จากสมการที่ (2.37) เมื่อทรานซิสเตอร์ทุกตัว มีค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ และอุณหภูมิที่รอยต่อทุกตัวมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถทำได้โดยสร้างวงจรให้อยู่ในรูปแบบของวงจรรวมโมโนลิทิกจึงสามารถให้คุณสมบัติเหล่านี้ได้และเป็นสิ่งที่สำคัญมากในวงจรรานสลิเนียร์ ซึ่งจะทำให้ผลของศักดาความร้อนมีการชดเชยกันหมดไป จะได้ว่า

$$\sum_{CW} \ln \left(\frac{I_{Cj}}{A_{Ej}} \right) = \sum_{CCW} \ln \left(\frac{I_{Cj}}{A_{Ej}} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.38) จะพบว่าไม่มีเทอมใดที่ขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้าง $\frac{kT}{q}$ หรือ ศักดาความร้อน V_T และความหนาแน่นของกระแส J_S ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการทำงานของวงจรรานสลิเนียร์รูปที่ถูกสร้างอยู่ในวงจรรวมโมโนลิทิกเดียวกันจะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่เนื่องจากสมการที่ (2.38) จะอยู่ในรูปผลบวกของอนุกรมในเทอมลอการิทึม ดังนั้นสมการที่จะจัดสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของผลคูณ ได้ดังสมการที่ (2.39)

$$\prod_{CW} \left(\frac{I_{Cj}}{A_j} \right) = \prod_{CCW} \left(\frac{I_{Cj}}{A_j} \right) \quad (2.39)$$

ถ้าทรานซิสเตอร์ทุกตัวถูกสร้างขึ้นโดยให้มีพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากัน จากสมการที่ (2.39) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\prod_{CW} I_{Cj} = \prod_{CCW} I_{Cj} \quad (2.40)$$

สมการที่ (2.40) แสดงหลักการของวงจรถานสลีเนียร์รูปสำหรับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่า ผลคูณของกระแส I_C ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแส I_C ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นนี้ สามารถที่จะนำวงจรถานสลีเนียร์ไปสังเคราะห์เป็นวงจรถานพีชคณิตต่าง ๆ ได้ เช่น วงจรคูณ (Multiplier) วงจรหาร (Divider) วงจรถอดราก (Square rooter) วงจรกำลังสอง (Squarer) และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ได้

2.4 วงจรขยายคลาส AB แบบทรานสลีเนียร์รูป

ในการทำความเข้าใจการทำงานของวงจรถานขยายคลาส AB แบบทรานสลีเนียร์รูป จะอาศัยหลักการมาจากวงจรถานสลีเนียร์รูปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยทั่วไป วงจรถานขยายคลาส AB แบบทรานสลีเนียร์รูปสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7 (Fabre et al., 1995) จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จำนวน 2 ตัว และชนิด NPN จำนวน 2 ตัว เมื่อกระแส I_B เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่เรียกว่ากระแสไบอัสของวงจร I_{in} เป็นกระแสขาเข้า ถ้าสมมติให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการจากหลักการของ วงจรถานสลีเนียร์รูปจะได้ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ V_{BE} ของทรานซิสเตอร์ Q₁-Q₄ ได้ดังนี้

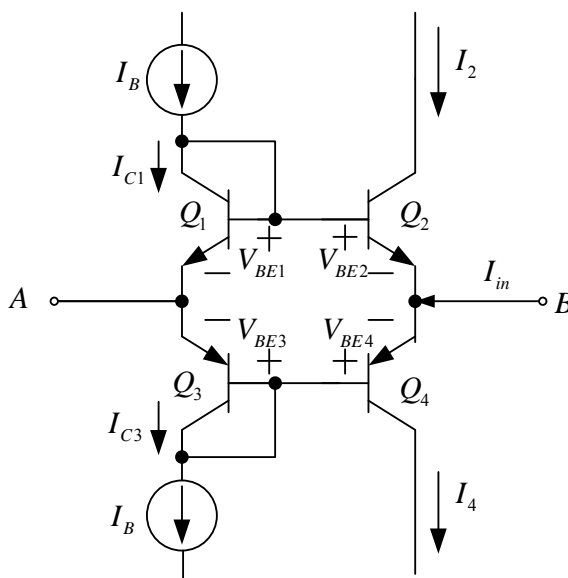
$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4} \quad (2.41)$$

เมื่อ $V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_S}$ $V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_S}$ $V_{BE3} = V_T \ln \frac{I_{C3}}{I_S}$ และ $V_{BE4} = V_T \ln \frac{I_{C4}}{I_S}$ จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ในวงจรถานสลีเนียร์รูปเป็นดังนี้

$$I_{C1}I_{C3} = I_{C2}I_{C4} \quad (2.42)$$

โดยที่ $I_{C2} = I_2$ และ $I_{C4} = I_4$ ถ้าค่าอัตราขยายกระแส $\beta \gg 1$ กระแส $I_{C1} = I_{C3} = I_B$ จากสมการที่ (2.42) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$I_B^2 = I_2I_4 \quad (2.43)$$



ภาพที่ 2.7 วงจรขยายคลาส AB แบบทรานส์ลิเนียร์รูป

พิจารณาที่จุด B จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_2 I_4 และ I_{in} ดังนี้

$$I_{in} = I_4 - I_2 \quad (2.44)$$

จากสมการที่ (2.43) และ (2.44) จะได้

$$I_{in} = \frac{I_B^2}{I_2} - I_2 \quad (2.45)$$

ใช้ KVL ในวงจขยายคลาส AB แบบทรานส์ลิเนียร์รูปเพื่อเขียนความสัมพันธ์ของแรงดัน V_{BE1} , V_{BE2} , V_A และ V_B ได้ดังนี้

$$V_{BE2} = V_{BE1} - (V_B - V_A) \quad (2.46)$$

เมื่อ $V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_B}{I_S}$ และ $V_B - V_A = V_{BA}$ จากสมการที่ (2.46) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_B}{I_S} - V_{BA} \quad (2.47)$$

จากคุณสมบัติของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์พบว่า

$$I_{C2} = I_2 = I_S e^{V_{BE2}/V_T} \quad (2.48)$$

แทนสมการที่ (2.47) ลงในสมการที่ (2.48) จะได้

$$I_2 = I_B e^{-V_{BA}/V_T} \quad (2.49)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (2.49) ลงในสมการที่ (2.45) จะได้

$$I_{in} = 2I_B \left(\frac{e^{V_{BA}/V_T} - e^{-V_{BA}/V_T}}{2} \right) \quad (2.50)$$

เมื่อ $\sinh X = \frac{e^X - e^{-X}}{2}$ จากสมการที่ (2.50) จะได้

$$I_{in} = 2I_B \sinh \frac{V_{BA}}{V_T} \quad (2.51)$$

จากสมการที่ (2.51) สามารถกระจายอนุกรมในเทอมของ $\sinh X$ ได้เป็น

$$\sinh X = X + \frac{X^3}{3!} + \frac{X^5}{5!} + \frac{X^7}{7!} \dots \quad (2.52)$$

เมื่อ $V_{BA} \ll V_T$ ผลคือตั้งแต่เทอมที่ 2 เป็นต้นไปจะมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นจะได้ว่า $\sinh X \approx X$ จากสมการที่ (2.51) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_{in} = 2I_B \frac{V_{BA}}{V_T} \quad (2.53)$$

จากสมการที่ (2.53) จะพบว่าค่าความต้านทานแฉงของสัญญาณขนาดเล็กที่จุด B และจุด A มีค่าเป็นตามสมการที่ (2.54)

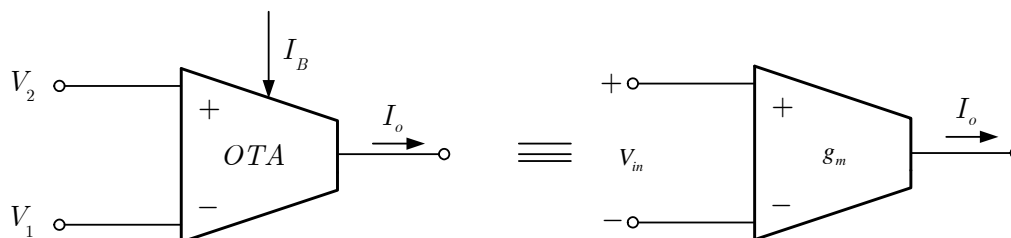
$$R_{BA} = \frac{V_{BA}}{I_{in}} = \frac{V_T}{2I_B} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) จะพบว่าค่าความต้านทานแฉงของสัญญาณขนาดเล็กที่จุด B กับจุด A ของวงจรรขยายคลาส AB แบบทรานส์ลิเนียร์รูป สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนี้ได้ด้วยกระแสไบอัส I_B ซึ่งทำให้สามารถที่จะควบคุมการปรับค่าความต้านทานนี้ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับค่าศักดาความร้อน V_T ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิรอบข้าง ฉะนั้นความต้านทานของสัญญาณขนาดเล็กที่จุด B กับจุด A จะเปลี่ยนแปลงไป หาก V_T เกิดการเปลี่ยนแปลง

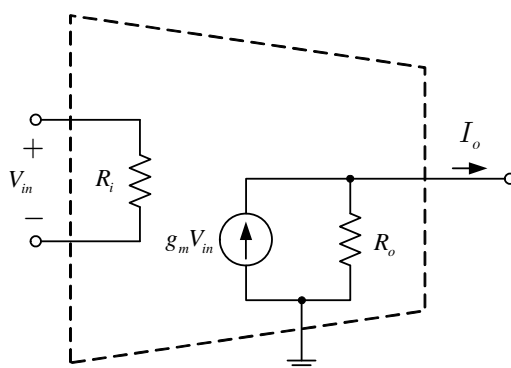
2.5 วงจรรขยายความนำถ่ายโอน

วงจรรขยายความนำถ่ายโอน หรือ OTA (Operational transconductance amplifier) จัดเป็นวงจรรขยายอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนผันแรงดันเป็นกระแส จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีการทำงานในลักษณะแรงดันควบคุมแหล่งจ่ายกระแส (Voltage controlled current source: VCCS) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เรียกว่า ค่าความนำถ่ายโอน (Transconductance) หรือ g_m โดยทั่วไป OTA จะสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในรูปแบบของวงจรรวมและมีคุณสมบัติพื้นฐานคือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ส่วนค่าความนำถ่ายโอนของ OTA สามารถควบคุมได้โดยกระแสไบอัสจากภายนอก สำหรับสัญลักษณ์และวงจรรวมมูลยทางอุดมคติของ OTA จะแสดงดังในภาพที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ (มนตรี, 2547)

วงจรรขยายความนำถ่ายโอน ชนิดใช้ทรานซิสเตอร์มอสอย่างง่ายที่สุด คือการใช้วงจรรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ต่อร่วมกับภาระแอคทีฟ (Active Load) ซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัวและแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 1 ตัว ดังภาพที่ 2.10

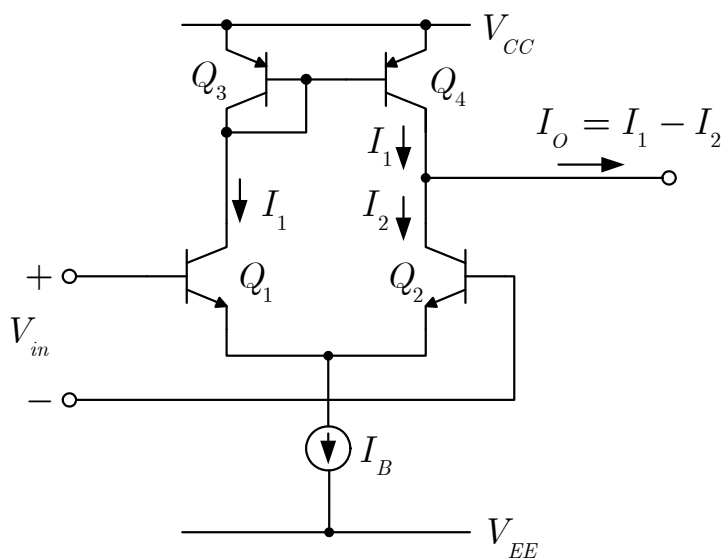


ภาพที่ 2.8 สัญลักษณ์ของ OTA



ภาพที่ 2.9 วงจรสมมูลย์ทางอุดมคติของ OTA

จากวงจรในภาพที่ 2.10 จะมีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นวงจรขยายความแตกต่างแบบดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งทำหน้าที่แปลงผันแรงดันเป็นกระแส ส่วนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 เป็นวงจรสะท้อนกระแสซึ่งมีค่าอัตรากระแสสะท้อนกระแสเท่ากับหนึ่ง โดยมีกระแส I_B เป็นกระแสไบแอสให้กับวงจร เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันเข้ามาที่ V_{in} จะทำให้เกิดกระแส I_1 และ I_2 ขึ้นที่ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ แล้วกระแส I_1 จะถูกสะท้อนกระแสเนื่องจากวงจรสะท้อนกระแสแบบลบของทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 ไปหักลบออกจากกระแส I_2 ที่เกิดขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 แล้วได้กระแสออกเป็นกระแส I_o ซึ่งมีค่าเท่ากับ $I_1 - I_2$ ต่อไป

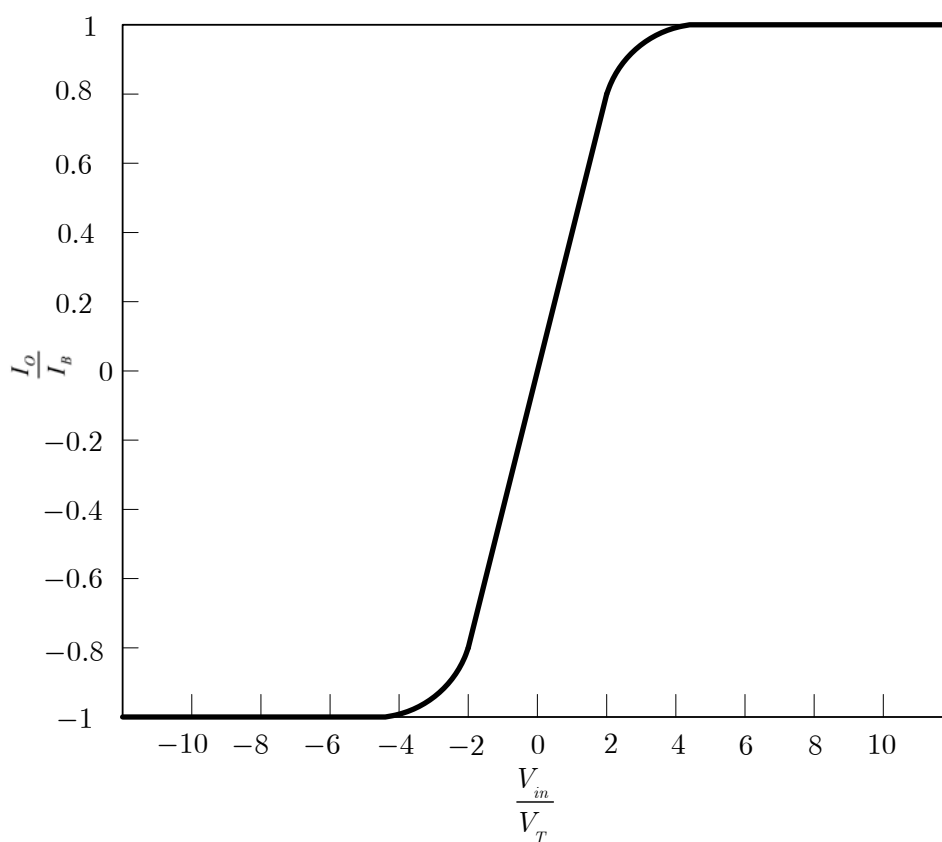


ภาพที่ 2.10 วงจรขยายความนำถ่ายโอนชนิดใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์อย่างง่าย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I_o กับค่าแรงดันที่จุดเข้า V_{in} ของวงจรขยายความแตกต่างในภาพที่ 2.10 มีค่าดังสมการที่ (2.55)

$$I_o = I_B \tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.55) จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสขาออก I_o กับค่าแรงดันที่ขาเข้า V_{in} ได้ดังในภาพที่ 2.11 จากกราฟจะพบว่าค่าความนำถ่ายโอนจะมีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์โดยในช่วงเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงแคบๆ แล้วเข้าสู่ช่วงอิ่มตัว เมื่อความแตกต่างของแรงดันอินพุตมีค่ามากกว่าประมาณ $2V_T$



ภาพที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจุดออกที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันผลต่างอินพุต

จากสมการที่ (2.55) สามารถกระจายอนุกรมในเทอมของ $\tanh X$ ได้เป็น

$$\tanh X = X - \frac{1}{3}X^3 + \frac{2}{15}X^5 - \dots \quad (2.56)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (2.56) ในสมการที่ (2.55) จะได้

$$I_o = I_B \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right) - \frac{1}{3} I_B \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right)^3 + \frac{2}{15} I_B \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right)^5 - \dots \quad (2.57)$$

จากสมการที่ (2.57) ถ้า $V_{in} \ll 2V_T$ ผลคือตั้งแต่เทอมที่ 2 เป็นต้นไปจะมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นจะได้ว่า $\tanh X \approx X$ จากสมการที่ (2.57) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_o = \frac{I_B}{2V_T} V_{in} \quad (2.58)$$

หรือ

$$I_o = g_m V_{in} \quad (2.59)$$

เมื่อ

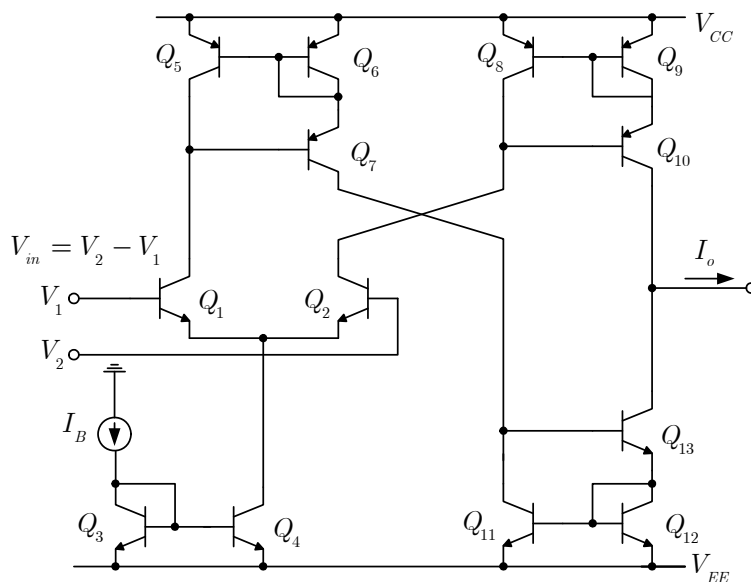
$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (2.60)$$

พบว่าค่า g_m ของวงจรที่เกิดขึ้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้จากค่าของกระแส I_B ซึ่งทำให้วงจรมีค่าสามารถที่จะควบคุมค่า g_m ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตาม เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่า g_m นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิรอบข้าง

วงจรสมบูรณ์ของ OTA ในภาพที่ 2.12 จะกำหนดให้ค่าอัตราขยายกระแส (β) ของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าสูงมากๆ และกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเล็กเตอร์กระแส I_B เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่คือ กระแสไบอัสของ OTA โดยวงจรจะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_1 กับ Q_2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่างพื้นฐานหรือวงจรที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันเป็นกระแส ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_3 กับ Q_4 จะทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกซึ่งมีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่งโดยจะทำการสะท้อนกระแสคอลเล็กเตอร์จาก I_{C3} ซึ่งมีค่าเท่ากับ I_B ไปยัง I_{C4} ให้มีค่าเท่ากับ I_B ด้วยและกระแส I_B นี้จะแยกไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็น I_{C1} และ I_{C2} ตามลำดับมีค่าเท่ากับ $I_B/2$ โดยกระแส I_{C2} จะไหลเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบลบที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_8 ถึง Q_{10} ซึ่งมีอัตราการสะท้อนกระแสเป็นหนึ่งเท่า แล้วจะทำการสะท้อนกระแสจาก I_{C8} ซึ่งมีค่าเท่ากับ I_{C2} ไปยัง I_{C10} โดยกระแส I_{C10} จะมีค่าเท่ากับ I_{C2} ในส่วนกระแส I_{C1} จะไหลเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบลบที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_5 ถึง Q_7 ดังนั้นกระแส $I_{C5} = I_{C1}$ จะถูกสะท้อนไปยัง I_{C7} หลังจากนั้นจะมีการสะท้อนกระแสอีกครั้งหนึ่ง จาก $I_{C7} = I_{C11} = I_{C1}$ ไปยัง I_{C13} โดยวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{11} ถึง Q_{13} โดยอัตราการสะท้อนกระแสของวงจรสะท้อนกระแสทั้งสองมีค่าเป็นหนึ่งเท่ากระแส I_{C13} จะมีค่า

เท่ากับ I_{C1} ซึ่งจากกระแสที่จุดออกของวงจร OTA กระแส I_o จะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส I_{C10} กับ I_{C13} ดังนั้นจึงทำให้กระแส I_o มีค่าเท่ากับ $I_{C2} - I_{C1}$ นั่นเอง

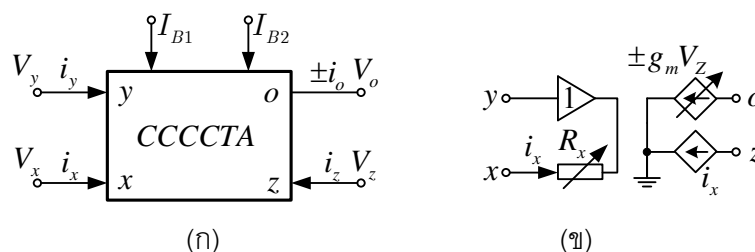
โดยข้อเด่นของ OTA กล่าวคือมีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าออปแอมป์และค่าอัตราขยายความนำถ่ายโอน g_m มีค่าที่มีความเป็นเชิงเส้นมากกว่า 4 ดีเคดและมีความเหมาะสมที่จะทำเป็นวงจรรวมแบบโมโนลิทิก และตัว OTA เองมีความสะดวกต่อการออกแบบเป็นวงจรรองความถี่ แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ OTA มีข้อจำกัดอยู่ 2 ประการ ประการแรกคือ ค่าอัตราขยายความนำถ่ายโอน g_m ที่มีผลกระทบจากอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลที่ไม่ต้องการในการออกแบบวงจร ส่วนข้อจำกัดข้อที่สองคือภาคขาเข้าของ OTA เป็นคู่ดิฟเฟอเรนเชียล ดังนั้นแรงดันของสัญญาณขาเข้าจะถูกจำกัดไม่เกิน $52mV (\approx 2V_T)$ ในการปฏิบัติงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น หากสัญญาณขาเข้ามีขนาดสูงกว่าค่าดังกล่าวแล้ว OTA จะทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว นั่นคือ กระแสเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับกระแสไบอัสอินพุต (I_B) ส่วนทิศทางของกระแสเอาต์พุตขึ้นอยู่กับขั้วความต่างของแรงดันอินพุต



ภาพที่ 2.12 วงจรสมบูรณของ OTA ที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

2.6 วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส

วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (Current-controlled current conveyor transconductance amplifier: CCCCTA) (Sirirpruchyanun and Jaikal, 2008) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 6 ขั้ว โดย CCCCTA ได้พัฒนามาจาก CCTA (Current Conveyor Transconductance Amplifier) ที่ได้นำเสนอครั้งแรกโดย Prokop ในปี ค.ศ. 2005 (Prokop and Musil, 2005) แต่ CCCCTA จะมีคุณสมบัติพิเศษกว่า CCTA ที่สามารถควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้วอินพุตได้ด้วยกระแสไบอัสจากภายนอก ในจำนวน 6 ขั้วของ CCCCTA สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือ ขั้วอินพุต 2 ขั้ว ขั้วกระแสเอาต์พุต 2 ขั้วและขั้วกระแสควบคุม 2 ขั้ว โดยสัญลักษณ์และวงจรมุมมูลของ CCCCTA แสดงได้ดังภาพที่ 2.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2.13 CCCCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรมุมมูล

จากสัญลักษณ์ในภาพที่ 2.13(ก) ขั้วอินพุต y จะมีความต้านทานสูงมาก ซึ่งเป็นขั้วที่เอาไว้รับอินพุตที่เป็นแรงดัน โดยแรงดันที่ขั้ว y จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ขั้ว x และหากพิจารณาที่ขั้วอินพุต x จะมีความต้านทาน R_x ที่สามารถปรับค่าได้ โดยขั้ว x เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นกระแส ส่วนขั้วกระแสเอาต์พุตได้แก่ขั้ว z และขั้ว o และขั้วกระแสควบคุมได้แก่ขั้ว I_{B1} และ I_{B2} โดยกระแสไบอัสภายนอก I_{B1} จะใช้ควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้ว x (R_x) ซึ่งสามารถดูได้ในวงจรมุมมูลในภาพที่ 2.13(ข) ส่วนกระแสที่ขั้ว z จะเท่ากับกระแสที่ไหลเข้าที่ขั้ว x และกระแสที่ขั้ว o จะเป็นการส่งผ่านความนำถ่ายโอน (transconductance: g_m) มาจากแรงดันที่ขั้ว z ดังนั้นที่ขั้ว z จะมีแรงดันได้จะต้องนำไหลออกจากภายนอกมาต่อ โดยค่าความนำถ่ายโอนสามารถควบคุมได้ที่กระแสไบอัสภายนอก I_{B2} ส่วนเครื่องหมาย \pm จะเป็นตัวบอกทิศทางของกระแสที่ขั้ว o โดยปกติจะมีทิศทางไหลออกจากขั้ว o ซึ่งจะ

แทนด้วยเครื่องหมายบวกหรือโดยทั่วไปมักจะไม่ใส่เครื่องหมาย แต่ถ้ากระแสที่ขั้ว o มีทิศทางไหลเข้า จะแทนด้วยเครื่องหมายลบ (มักจะเขียนเครื่องหมายลบไว้หน้าตัวอักษร o เช่น $-o$) และในทางอุดมคติ ความต้านทานที่ขั้ว z และขั้ว x จะมีค่าเป็นอนันต์ จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดง ด้วยสมการในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

เมื่อ CCCCTA ที่มีโครงสร้างเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar transistor) ความต้านทานที่ขั้ว x สามารถแสดงได้เป็น

$$R_x = \frac{V_T}{2I_{B1}} \quad (2.62)$$

ส่วนค่าความนำถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ

$$g_m = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (2.63)$$

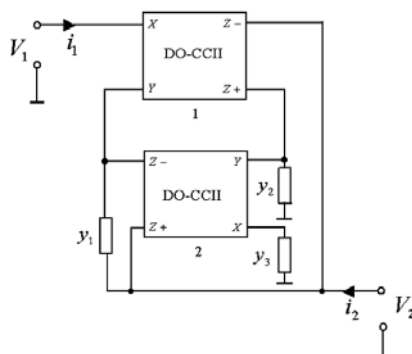
จากสมการที่ (2.62) และ (2.63) พบว่าทั้งค่าความต้านทานแผลงและค่าความนำถ่ายโอนสามารถควบคุมด้วยกระแสไบอัสหรือที่เรียกว่าการควบคุมแบบอิล็กทรอนิกส์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบอุปกรณ์ที่ได้มีผู้นำเสนอมาพอสังเขปดังนี้

2.7.1 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ DO-CCII จำนวนสองตัว

วงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลดย่น E. Yuce และคณะ (Yuce et al., 2006) ได้นำเสนอเมื่อปี 2006 โดยใช้วงจรสายพานกระแสแบบเอาต์พุตคู่ (DO-CCII) จำนวนสองตัวต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว คือ Y_1 , Y_2 และ Y_3 ดังแสดงในภาพที่ 2.14

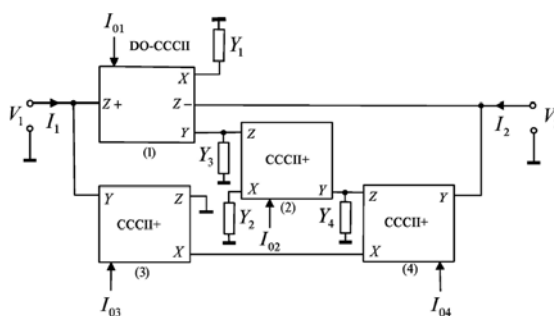


ภาพที่ 2.14 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ DO-CCII จำนวนสองตัว

จุดเด่นของวงจรในภาพที่ 2.14 สามารถเลียนแบบอุปกรณ์ได้ทั้งเป็น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ FDNR แบบลอยขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟทั้งสามตัวในวงจร แต่พบว่าวงจรมีข้อด้อยหลายประการ ได้แก่ ไม่สามารถควบคุมค่าอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอย จึงยากต่อการต่อใช้งานจริงหรือยากที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

2.7.2 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCCII ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์

วงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลอยที่ควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์นี้ E. Yuce (Yuce, 2006) ได้นำเสนอเมื่อปี 2006 โดยใช้วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (CCCII) จำนวน 4 ตัวต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 4 ตัว คือ Y_1 , Y_2 , Y_3 และ Y_4 ดังแสดงในภาพที่ 2.15

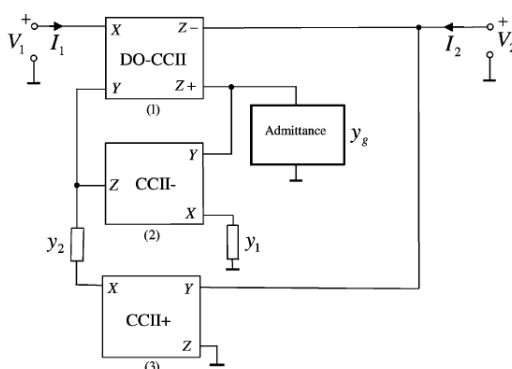


ภาพที่ 2.15 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCCII ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์

จุดเด่นของวงจรในภาพที่ 2.15 คือ สามารถเลียนแบบอุปกรณ์ได้ทั้งเป็น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ FDNR แบบลอย ขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟทั้งสี่ตัวในวงจร สามารถควบคุมค่าอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และใช้เฉพาะอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวด์ แต่พบว่าวงนี่ยังมีข้อด้อยหลายประการ ได้แก่ มีการต่อตัวเก็บประจุที่ขั้ว x ซึ่งทำให้เกิดความถี่โพล ยังผลให้ตอบสนองความถี่ได้ต่ำ

2.7.3 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCII จำนวนสามตัว

วงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลอยนี้ E. Yuce (Yuce, 2006) ได้นำเสนอเมื่อปี 2006 โดยใช้วงจรสายพานกระแสจำนวนสอง 3 ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว คือ Y_1 , Y_2 และ Y_3 ดังแสดงในภาพที่ 2.16

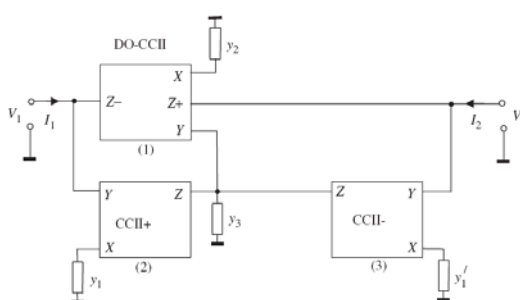


ภาพที่ 2.16 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCII จำนวนสามตัว

จุดเด่นของวงจรในภาพที่ 2.16 คือ สามารถเลียนแบบอุปกรณ์ได้ทั้งเป็น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ FDNR แบบลอย ขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟทั้งสามตัวในวงจร สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่พบว่าวงนี่ยังมีข้อด้อยหลายประการได้แก่ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอย จึงยากต่อการต่อใช้งานจริงหรือยากที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แม้จะสามารถควบคุมค่าอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

2.7.4 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCII จำนวน 3 ตัว ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์

วงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลายนี้นี้ E. Yuce และคณะ (Yuce et al.,2006) ได้นำเสนอเมื่อปี 2006 โดยใช้วงจรสายพานกระแสจำนวนสอง 3 ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 4 ตัว คือ Y_1 , Y_2 , Y_3 และ Y_4 ดังแสดงในภาพที่ 2.17

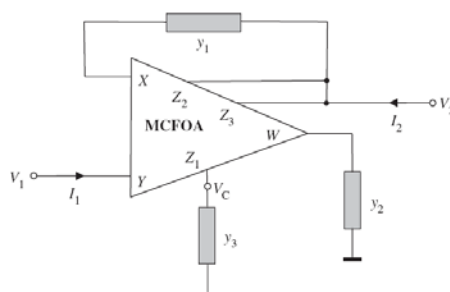


ภาพที่ 2.17 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ CCII จำนวน 3 ตัว ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์

จุดเด่นของวงจรในภาพที่ 2.17 คือ สามารถเลียนแบบอุปกรณ์ได้ทั้งเป็น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ FDNR แบบลายนี้นั้นขึ้นอยู่กับทางเลือกอุปกรณ์พาสซีฟทั้งสามตัวในวงจร สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวนด์ง่ายต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่พบว่าวงนี่ยังมีข้อด้อยหลายประการได้แก่ ต่อตัวเก็บประจุที่ขั้ว x ซึ่งทำให้เกิดความถี่โพล ยังผลให้ตอบสนองความถี่ได้ต่ำ แม้จะสามารถควบคุมค่าอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์แต่ต้องการความสมพงษ์กันของอุปกรณ์

2.7.5 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลายนี้นี้ที่ใช้ MCFOA

E. Yuce ได้นำเสนอวงจรเลียนแบบอุปกรณ์แบบลายนี้นี้โดยใช้ MCFOA ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกอีก 3 ตัว คือ Y_1 , Y_2 และ Y_3 ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (Yuce, 2006)



ภาพที่ 2.18 วงจรเลียนแบบอุปกรณ์หลายหน้าที่ที่ใช้ MCFOA

จุดเด่นของวงจรในภาพที่ 2.18 คือ สามารถเลียนแบบอุปกรณ์ได้ทั้งเป็น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ FDNR แบบลอยขึ้นอยู่กับการเลือกอุปกรณ์พาสซีฟทั้งสามตัวในวงจร แต่พบว่าวงนี่ยังมีข้อด้อยหลายประการได้แก่ ไม่สามารถควบคุมค่าอุปกรณ์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอย จึงยากต่อการต่อใช้งานจริงหรือยากที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

2.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปของวงจรก่าเนดส์สัญญาณ รวมทั้งได้นำเสนองานวิจัยบางเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวงจรก่าเนดส์สัญญาณที่ได้มีผู้วิจัยขึ้นมา โดยสรุปได้ว่าวงจรถูกได้มีผู้วิจัยมานั้นมีข้อด้อยดังนี้

- ต้องการความสมพงษ์ของอุปกรณ์พาสซีฟที่ใช้
- ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ เนื่องจากสามารถประยุกต์เข้ากับการควบคุมแบบอัตโนมัติหรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยง่าย
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวม
- ในวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก