

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยและพัฒนาเรื่อง การสังเคราะห์และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส (Current controlled current differencing transconductance amplifier: CC-CDTA) ที่ทำงานในสถานะอิมิตัว ซึ่งประกอบด้วย วงจรขมิตต์ริกเกอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ วงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ รวมไปถึงการสร้างชุดการสอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษา กลุ่มวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบ วงจรอิเล็กทรอนิกส์และทฤษฎีที่มีอยู่เดิมเสียก่อน ซึ่งมีหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส
- 2.2 วงจรขมิตต์ริกเกอร์
- 2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมเบื้องต้น
- 2.4 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์เบื้องต้น
- 2.5 วงจร โมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์
- 2.6 ชุดการสอน
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.8 สรุป

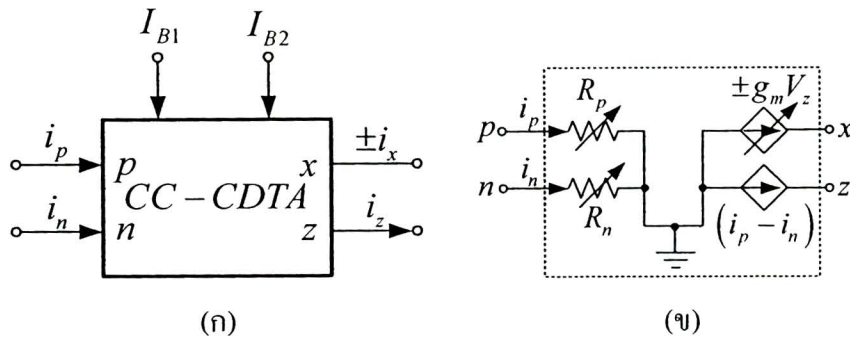
#### 2.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส

วงจรขยายความนำถ่ายโอนผลต่างกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส (Current controlled current differencing transconductance amplifier: CC-CDTA) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โหมดกระแสที่มี 6 ขั้ว โดย CC-CDTA ได้พัฒนามาจาก CDTA แต่ CC-CDTA จะมีคุณสมบัติพิเศษกว่า CDTA ที่สามารถควบคุมความต้านทานแฝงที่ขาเข้าทั้งสองได้ด้วยกระแสไบแอสจากภายนอก

ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในลำดับต่อไป ในจำนวน 6 ขั้วของ CC-CDTA สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือ ขั้วกระแสขาเข้า 2 ขั้ว ขั้วกระแสขาออก 2 ขั้วและขั้วกระแสควบคุม 2 ขั้ว โดยสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CC-CDTA แสดงได้ดังภาพที่ 2-1(ก) และ (ข) ตามลำดับ (วินัย, 2552)

จากสัญลักษณ์ในภาพที่ 2-1(ก) ขั้วกระแสขาเข้าได้แก่ขั้ว  $p$  และขั้ว  $n$  ส่วนขั้วกระแสขาออกได้แก่ขั้ว  $z$  และขั้ว  $x$  ขั้วกระแสควบคุมได้แก่ขั้ว  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  โดยกระแสไบแอสภายนอก  $I_{B1}$  จะใช้ควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้ว  $p$  ( $R_p$ ) และขั้ว  $n$  ( $R_n$ ) ซึ่งสามารถดูได้ในวงจรสมมูลในภาพที่ 2-1(ข) โดย  $R_p$  และ  $R_n$  จะมีค่าเท่ากัน ส่วนกระแสที่ขั้ว  $z$  จะเป็นผลต่างของกระแสที่ไหลเข้าที่ขั้ว  $p$  และขั้ว  $n$  และกระแสที่ขั้ว  $x$  จะเป็นการส่งผ่านความนำถ่ายโอนมาจากแรงดันที่ขั้ว  $z$  ดังนั้นที่ขั้ว  $z$  จะมีแรงดันได้จะต้องนำโหนดจากภายนอกมาต่อ โดยค่าความนำถ่ายโอนสามารถควบคุมได้ที่กระแสไบแอสภายนอก  $I_{B2}$  จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงด้วยสมการในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_z \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_n & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2-1)$$



ภาพที่ 2-1 CC-CDTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

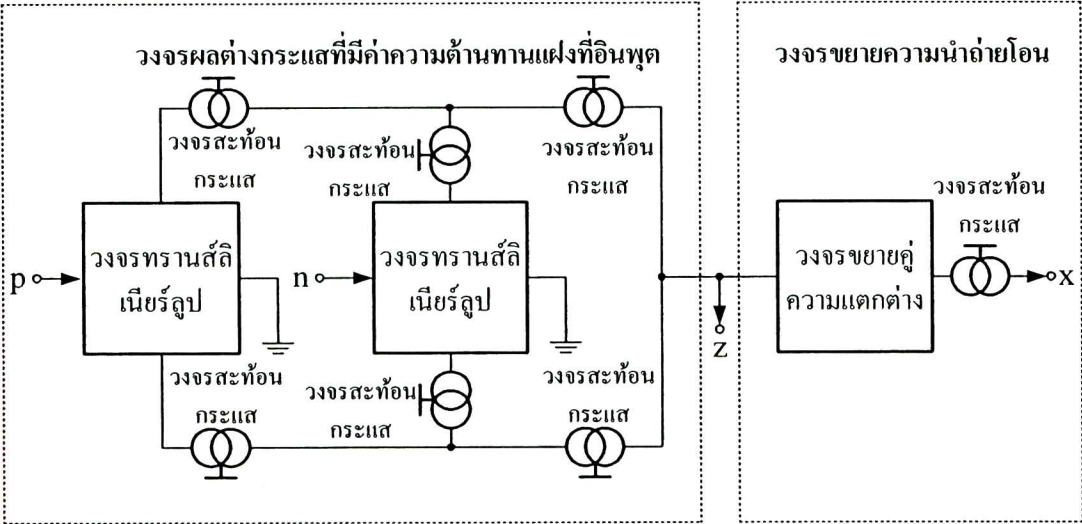
โดยที่ความต้านทานที่ขั้ว  $p$  และขั้ว  $n$  มีค่าเท่ากันซึ่งสามารถแสดงได้เป็น

$$R_p = R_n = \frac{V_T}{2I_{B1}} \tag{2-2}$$

เมื่อ  $V_T$  คือ ศักย์ค่าความร้อน (Thermal voltage)  
ส่วนค่าความนำถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ

$$g_m = \frac{I_{B2}}{2V_T} \tag{2-3}$$

จากสมการที่ (2-2) และ (2-3) พบว่าทั้งค่าความต้านทานแฝงและค่าความนำถ่ายโอนสามารถควบคุมด้วยกระแสไบแอสหรือที่เรียกว่าการควบคุมเชิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically controllable)



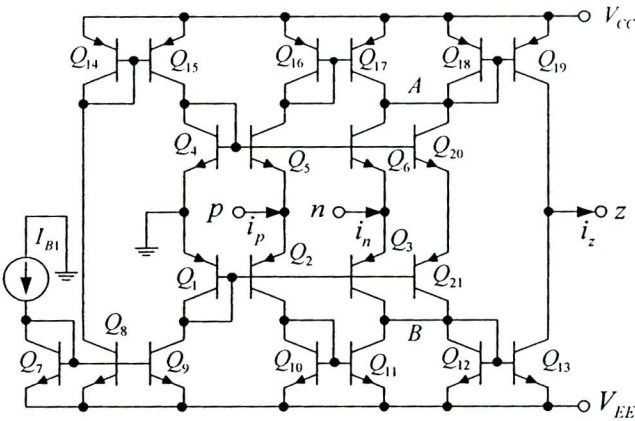
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างพื้นฐานของ CC-CDTA

ส่วนประกอบของโครงสร้างภายใน CC-CDTA สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-2 โดยจะประกอบด้วยวงจรสองส่วนได้แก่ วงจรผลต่างกระแสที่มีค่าความต้านทานแฝงที่ขาเข้าและวงจรขยายความนำถ่ายโอน ที่ขั้ว  $p$  และขั้ว  $n$  ของวงจรผลต่างกระแสจะใช้วงจรขยายคลาส AB

ทรานซิสเตอร์รูปที่ ได้รับกระแสไบแอสเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดความต้านทานแฝงที่ขาเข้าทั้งสอง มีค่าเท่ากัน นอกจากนี้แล้วในวงจรผลต่างกระแสจะประกอบไปด้วยกลุ่มวงจรย่อยได้แก่ วงจร สะท้อนกระแสที่ทำหน้าที่สะท้อนกระแสจากขาเข้าไปสู่ขาออก ในส่วนของวงจรขยายความนำถ่าย โอนจะประกอบไปด้วยวงจรขยายคู่ความแตกต่างเป็นวงจรหลัก ในการออกแบบวงจรจะแยกเป็น สองส่วน ดังนี้

2.2.1 วงจรผลต่างกระแสที่มีค่าความต้านทานแฝงที่ขาเข้า

โครงสร้างวงจรผลต่างกระแสที่มีค่าความต้านทานแฝงที่ขาเข้าแสดงในภาพที่ 2-3 โดยมี วงจรขยายคลาส AB แบบทรานซิสเตอร์รูปเป็นส่วนประกอบด้านขาเข้าของวงจรผลต่างกระแสที่มี ความต้านทานแฝงที่ขาเข้า ต่อร่วมกับวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกและลบ ในทางอุดมคติ วงจร ผลต่างกระแสจะให้กระแสขาออก  $i_z = i_p - i_n$



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของวงจรผลต่างกระแสที่มีค่าความต้านทานแฝงที่ขาเข้า

จากวงจรในภาพที่ 2-3 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรผลต่างกระแสได้ดังนี้ ทรานซิสเตอร์  $Q_7-Q_9$  เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบบวก ส่วน  $Q_{14}-Q_{15}$  เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ ทำหน้าที่สะท้อนกระแส  $I_{B1}$  ไปเป็นกระแสไบแอสให้กับวงจรทรานซิสเตอร์รูป ที่ ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์  $Q_1-Q_6$  ทำให้ที่ขั้ว  $p$  และ  $n$  มีค่าความต้านทานแฝงเกิดขึ้นตาม สมการที่ (2-2) ส่วนกระแส  $i_z$  ซึ่งเกิดจากกระแส  $i_p - i_n$  นั้นสามารถพิจารณาได้ดังนี้

เมื่อกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าประมาณเท่ากับกระแสเอมิเตอร์ ( $I_C \cong I_E$ ) จากภาพที่ 2-3 จะได้





$$I_{C5} = I_{C2} - i_p \tag{2-4}$$

และ

$$I_{C2} = I_{C5} + i_p \tag{2-5}$$

จากความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ในวงจรทรานส์ลีนีร์รูปจะได้  $I_{B1}^2 = I_{C2} I_{C5}$  ซึ่งจัดสมการใหม่จะได้

$$I_{C5} = \frac{I_{B1}^2}{I_{C2}} \tag{2-6}$$

แทนสมการที่ (2-6) ลงในสมการที่ (2-4) จะได้

$$I_{C2}^2 - i_p I_{C2} - I_{B1}^2 = 0 \tag{2-7}$$

ทำการแก้สมการที่ (2-7) จะได้

$$I_{C2} = \frac{i_p \pm \sqrt{i_p^2 + 4I_{B1}^2}}{2} \tag{2-8}$$

จากสมการที่ (2-8) หาก  $i_p \ll 4I_{B1}$  จะได้

$$I_{C2} = \pm I_{B1} + \frac{i_p}{2} \tag{2-9}$$

แทนสมการที่ (2-9) ลงในสมการที่ (2-4) จะได้



$$I_{C5} = \pm I_{B1} - \frac{i_p}{2} \quad (2-10)$$

ใช้หลักการเดียวกันเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ในวงจรทรานส์ลีนีเยร์  
รูปที่ป้อนกระแส  $i_n$  เข้ามาจะได้

$$I_{C3} = I_{B1} + \frac{i_n}{2} \quad (2-11)$$

และ

$$I_{C6} = I_{B1} - \frac{i_n}{2} \quad (2-12)$$

ส่วนวงจรทรานส์ลีนีเยร์รูปที่ประกอบไปด้วย  $Q_1, Q_4, Q_{20}$  และ  $Q_{21}$  นั้นไม่มีกระแสขาเข้าป้อนเข้าจะ  
ได้

$$I_{C20} = I_{C21} = I_{B1} \quad (2-13)$$

จากวงจรจะพบว่ากระแส  $I_{C5}$  จะเท่ากับกระแส  $I_{C16}$  และเนื่องจาก  $Q_{16}$  และ  $Q_{17}$  เป็นวงจรสะท้อน  
กระแส ดังนั้น  $I_{C16}$  จะถูกสะท้อนไปยังกระแส  $I_{C17}$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I_{C17} = I_{C16} = I_{C5} = I_{B1} - \frac{i_p}{2} \quad (2-14)$$

ส่วนกระแส  $I_{C2}$  จะเท่ากับกระแส  $I_{C10}$  และเนื่องจาก  $Q_{10}$  และ  $Q_{11}$  เป็นวงจรสะท้อนกระแส ดังนั้น  
 $I_{C10}$  จะถูกสะท้อนไปยังกระแส  $I_{C11}$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I_{C11} = I_{C10} = I_{C2} = I_{B1} + \frac{i_p}{2} \quad (2-15)$$

พิจารณาที่โนด A จะได้

$$I_{C18} = I_{C6} + I_{C20} - I_{C17} \quad (2-16)$$

แทนสมการที่ (2-12) (2-13) และ (2-14) ลงในสมการที่ (2-16) จะได้

$$I_{C18} = I_{B1} - \frac{i_n}{2} + \frac{i_p}{2} \quad (2-17)$$

พิจารณาที่โนด B จะได้

$$I_{C12} = I_{C3} + I_{C21} - I_{C11} \quad (2-18)$$

แทนสมการที่ (2-11) (2-13) และ (2-15) ลงในสมการที่ (2-18) จะได้

$$I_{C12} = I_{B1} + \frac{i_n}{2} - \frac{i_p}{2} \quad (2-19)$$

เนื่องจาก  $Q_{18}$  และ  $Q_{19}$  เป็นวงจรสะท้อนกระแส ดังนั้น  $I_{C18}$  จะถูกสะท้อนไปยังกระแส  $I_{C19}$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I_{C19} = I_{C18} = I_{B1} - \frac{i_n}{2} + \frac{i_p}{2} \quad (2-20)$$

เช่นเดียวกันกับ  $Q_{12}$  และ  $Q_{13}$  ก็เป็นวงจรสะท้อนกระแส ดังนั้น  $I_{C12}$  จะถูกสะท้อนไปยังกระแส  $I_{C13}$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

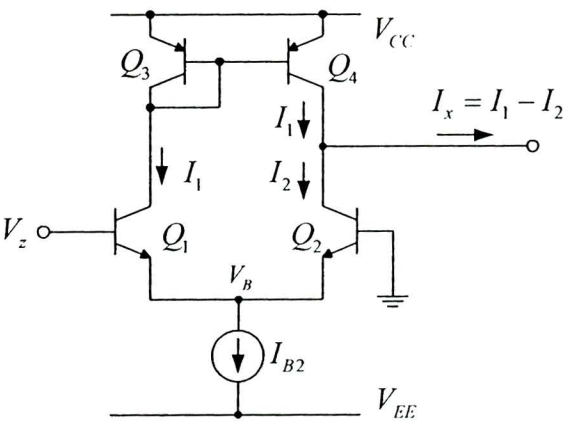
$$I_{C13} = I_{C12} = I_{B1} + \frac{i_n}{2} - \frac{i_p}{2} \quad (2-21)$$

จากวงจรสามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว  $z$  ได้ดังนี้

$$i_z = I_{C19} - I_{C13} \tag{2-22}$$

แทนสมการที่ (3-20) และ (3-21) ลงในสมการที่ (3-22) จะได้

$$i_z = i_p - i_n \tag{2-23}$$



ภาพที่ 2-4 วงจรขยายความนำถ่ายโอนอย่างง่าย

2.2.2 วงจรขยายความนำถ่ายโอน

ในส่วนของวงจรขยายความนำถ่ายโอนนั้น ได้ออกแบบวงจรโดยใช้วงจรขยายคู่ความแตกต่าง (Differential pair amplifier) แบบง่าย แสดงดังภาพที่ 2-4

วงจรขยายความนำถ่ายโอน ชนิดใช้ทรานซิสเตอร์อย่างง่ายที่สุด คือการใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential amplifier) ต่อร่วมกับภาระแอคทีฟ (Active load) ซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัวและแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 1 ตัว ดังภาพที่ 2-12 (มนตรี, 2547)

จากวงจรในภาพที่ 2-4 จะมีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  เป็นวงจรขยายความแตกต่างแบบคิฟเฟอเรนเชียลซึ่งทำหน้าที่แปลงผันแรงดันเป็นกระแส ส่วนไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และ  $Q_4$  เป็นวงจรสะท้อนกระแสซึ่งมีค่าอัตราการสะท้อนกระแสเท่ากับหนึ่ง โดยมีกระแส  $I_B$

เป็นกระแสไบแอสให้กับวงจร เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันเข้ามาที่  $V_m$  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  $I_x$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_1 - I_2$  ต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส  $I_o$  กับค่าแรงดันที่จุดเข้า  $V_z$  ของวงจรขยายความแตกต่างในภาพที่ 2-4 สามารถหาได้ดังนี้

เขียนสมการกระแส  $I_1$  และ  $I_2$  ได้ว่า

$$I_1 = I_S e^{(V_z - V_B)/V_T} \tag{2-24}$$

และ 
$$I_2 = I_S e^{(0 - V_B)/V_T} \tag{2-25}$$

พิจารณาที่โหนด  $V_B$  จะได้

$$I_B = I_1 + I_2 \tag{2-26}$$

แทนสมการที่ (2-24) และ (2-25) ลงในสมการที่ (2-26) จะได้

$$I_B = I_S e^{-V_B/V_T} (e^{V_z/V_T} + 1) \tag{2-27}$$

จากสมการที่ (2-27) จัดสมการได้ใหม่ดังนี้

$$I_S e^{-V_B/V_T} = \frac{I_B}{e^{V_z/V_T} + 1} \tag{2-28}$$

พิจารณาที่โหนดขาออกจะได้



$$I_x = I_1 - I_2 \tag{2-29}$$

แทนสมการที่ (2-24) และ (2-25) ลงในสมการที่ (2-29) จะได้

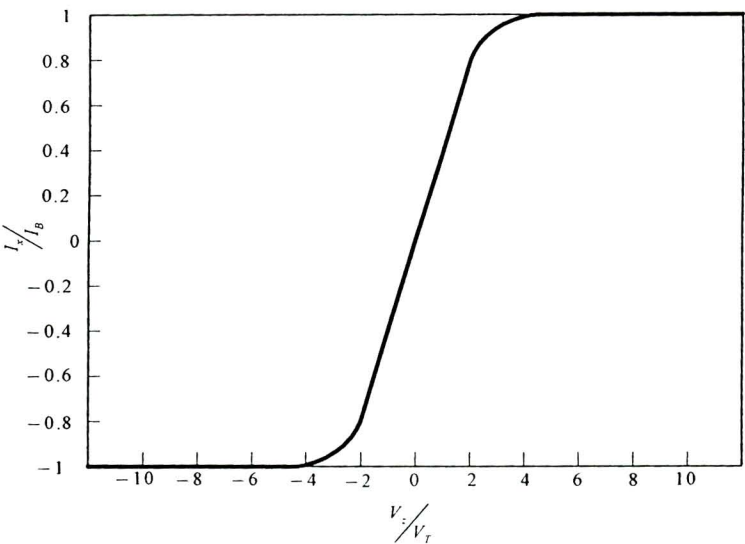
$$I_x = I_s e^{-V_B/V_T} \left( e^{V_z/V_T} - 1 \right) \tag{2-30}$$

แทนสมการที่ (2-28) ลงในสมการที่ (2-30) จะได้

$$I_x = I_B \left( \frac{e^{V_z/V_T} - 1}{e^{V_z/V_T} + 1} \right) \tag{2-31}$$

เมื่อ  $V_{in} = V_z$  และ จาก  $\tanh = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$  สมการที่ (2-31) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2-32)

$$I_x = I_B \tanh \left( \frac{V_z}{2V_T} \right) \tag{2-32}$$



ภาพที่ 2-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขา  $x$  ที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันขา  $z$

จากสมการที่ (2-32) จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาออก  $I_x$  กับแรงดันขาเข้า  $V_z$  ได้ดังในภาพที่ 2-5 จากกราฟจะพบว่าค่าความนำถ่ายโชนจะมีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์โดยในช่วงเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงแคบๆ แล้วเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว เมื่อความแตกต่างของแรงดันขาเข้ามีค่ามากกว่าประมาณ  $2V_T$

จากสมการที่ (2-32) สามารถกระจายอนุกรมในเทอมของ  $\tanh X$  ได้เป็น

$$\tanh X = X - \frac{1}{3} X^3 + \frac{2}{15} X^5 - .... \tag{2-33}$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (2-33) ในสมการที่ (2-32) จะได้

$$I_o = I_B \left( \frac{V_z}{2V_T} \right) - \frac{1}{3} I_B \left( \frac{V_z}{2V_T} \right)^3 + \frac{2}{15} I_B \left( \frac{V_z}{2V_T} \right)^5 - .... \tag{2-34}$$

จากสมการที่ (2-34) ถ้า  $V_z \ll 2V_T$  ผลคือตั้งแต่เทอมที่ 2 เป็นต้นไปจะมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นจะได้ว่า  $\tanh X \approx X$  จากสมการที่ (2-34) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_o = \frac{I_B}{2V_T} V_z \tag{2-35}$$

หรือ

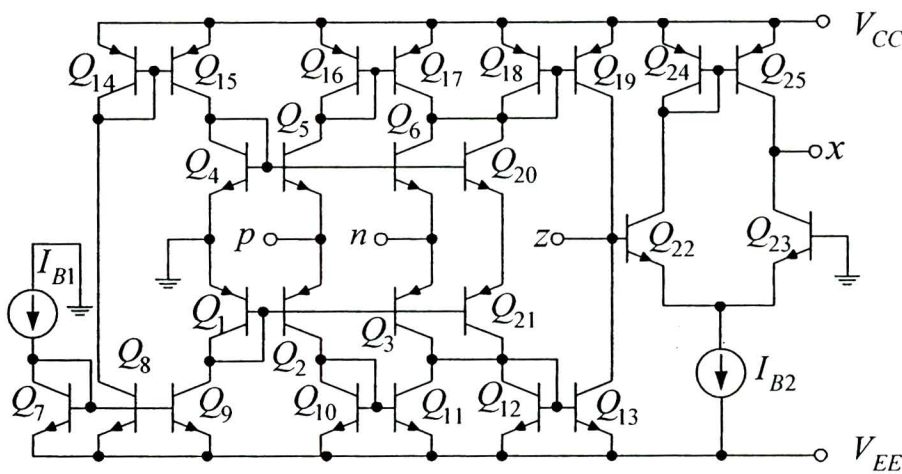
$$I_o = g_m V_z \tag{2-36}$$

เมื่อ

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \tag{2-37}$$

พบว่าค่า  $g_m$  ของวงจรที่เกิดขึ้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้จากค่าของกระแส  $I_B$  ซึ่งทำให้วงจรดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมค่า  $g_m$  ได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตาม เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่า  $g_m$  นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าศักย์คาความร้อน

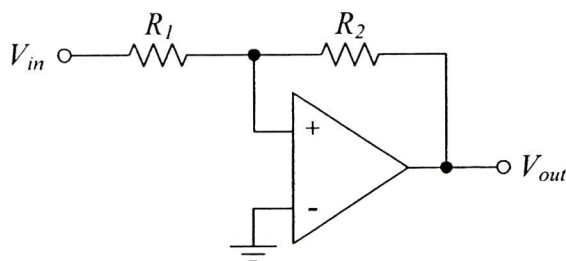
ภาพที่ 2-6 แสดงวงจรสมบูรณ์ของ CCCDTA จากวงจรประกอบไปด้วยวงจร 2 ส่วนคือ วงจรผลต่างกระแส ( $Q_1$ - $Q_{21}$ ) ที่มีวงจรทรานส์ลิเนียร์รูปเป็นวงจรหลักเพื่อสร้างความต้านทานแฝงที่ขั้วขาเข้า p และ n โดยมี  $I_{B1}$  เป็นกระแสไบแอสให้กับวงจรเพื่อใช้ควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้วขาเข้าทั้งสอง ตามสมการที่ (/-2) และวงจรขยายความนำถ่ายโอน ( $Q_{22}$ - $Q_{25}$ ) ที่มีกระแสไบแอส  $I_{B2}$  เป็นกระแสไบแอสเพื่อใช้ในการปรับค่าการส่งผ่านความนำไปยังขั้ว x



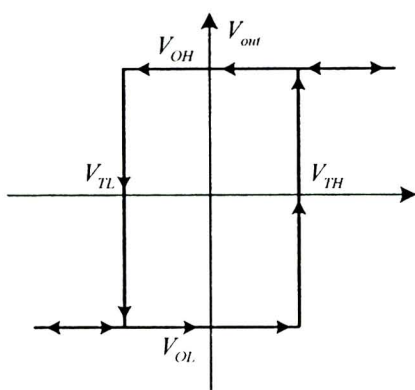
ภาพที่ 2-6 วงจรสมบูรณ์ของ CC-CDTA

2.2 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์

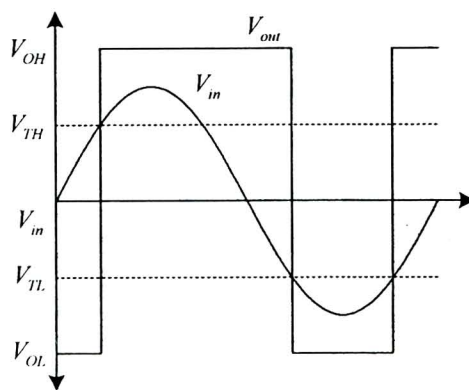
วงจรขมิตต์ทริกเกอร์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันชนิดหนึ่งอาศัยหลักการป้อนกลับแบบบวก โดยอาศัยนำสัญญาณเอาต์พุตบางส่วนป้อนกลับมาเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตของวงจรอีก และจะทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองสภาวะ วงจรขมิตต์ทริกเกอร์สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise Schmitt trigger) และวงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise Schmitt trigger) การทำงานของวงจรทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้ (วรพงศ์, 2545)



(ก) รายละเอียดวงจร



(ข) กราฟลักษณะสมบัติของวงจร

(ค) รูปคลื่นระหว่าง  $V_{in}$  กับ  $V_{out}$ 

ภาพที่ 2-7 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา

### 2.2.1 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise Schmitt trigger)

วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาที่ใช้โอปแอมป์ ดังแสดงในภาพที่ 2-7 (ก) ซึ่งประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบแรงดันและตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ทำหน้าที่เป็นส่วนป้อนกลับแบบบวก หากพิจารณาวงจร จะเห็นได้ว่าแรงดันอินพุตของวงจรนั้นถูกเปรียบเทียบกับแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_{th}$ ) ที่ได้จากการป้อนกลับโดยใช้  $R_1$  และ  $R_2$  ซึ่งมีค่าขึ้นกับแรงดันเอาต์พุตของวงจร ดังนั้นจึงทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  เปลี่ยนแปลงสองสถานะ คือ  $V_{out} = V_{OH}$  และ  $V_{out} = V_{OL}$  โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ

$$V_{TL} = -\frac{R_1}{R_2} V_{OL} \quad (2-38)$$

และ

$$V_{TH} = -\frac{R_1}{R_2} V_{OH} \quad (2-39)$$

โดยที่  $V_{TH}$  และ  $V_{TL}$  คือแรงดันขีดเริ่มต้นด้านสูงและด้านต่ำตามลำดับ

จากกราฟลักษณะสมบัติของวงจรดังภาพที่ 2-7 (ข) ค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองสภาวะนี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และความกว้างของสภาวะฮิสเทอรีซิส (Hysteresis width,  $V_H$ ) ถูกกำหนดโดย

$$V_H = V_{TH} - V_{TL} \quad (2-40)$$

แทนค่าสมการที่ (2-38) และ (2-39) จะได้

$$V_H = \frac{R_1}{R_2} (V_{OH} - V_{OL}) \quad (2-41)$$

ซึ่งสามารถแปรค่าได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของ  $R_1/R_2$

### 2.2.2 วงจรชนิดตรีกรีเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise Schmitt trigger)

ภาพที่ 2-8 (ก) แสดงวงจรชนิดตรีกรีเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา มีรายละเอียดเหมือนวงจรชนิดตรีกรีเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกาที่แสดงในภาพที่ 2-8 (ก) แต่มีข้อแตกต่างที่แรงดันอินพุตของกรณีนี้ถูกป้อนกลับเข้าทางขาต้านอินพุต (-) ในขณะที่ขาต้านอินพุต (+) ต่อดึงกราวด์แทน เนื่องจากการป้อนกลับแบบบวกทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  เปลี่ยนแปลงอยู่สองสภาวะคือ  $V_{OH}$  และ  $V_{OL}$  โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่มต้นเท่ากับ

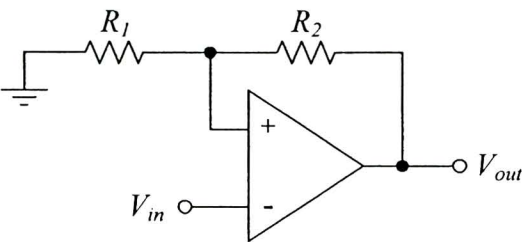
$$V_{TH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OH} \quad (2-42)$$

และ

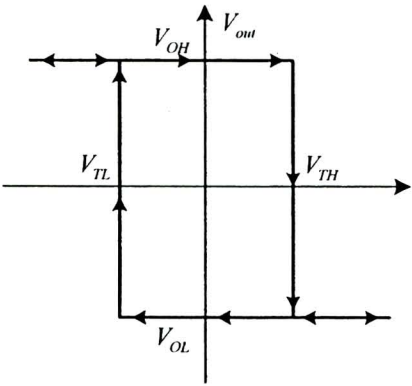
$$V_{TL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OL} \tag{2-43}$$

กราฟลักษณะสมบัติของวงจรดังภาพที่ 2-8 (ข) จะเห็นได้ว่ามีช่วงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในแนวตั้งเหมือนกับกราฟลักษณะสมบัติของวงจรชนิดต์ริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน ขณะที่รูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 2-8 (ค) จะมีเฟสต่างไปจากรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 2-8 (ค) เป็นมุม 180° และจากสมการที่ (2-42) และ (2-43) จะได้

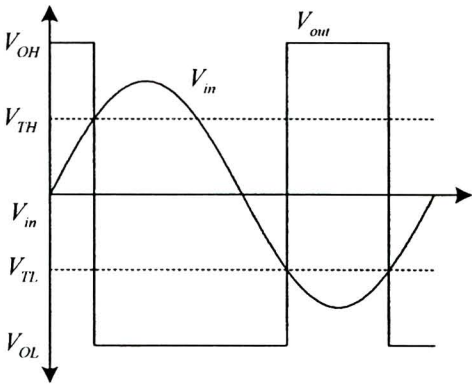
$$V_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{OL}) \tag{2-44}$$



(ก) รายละเอียดวงจร



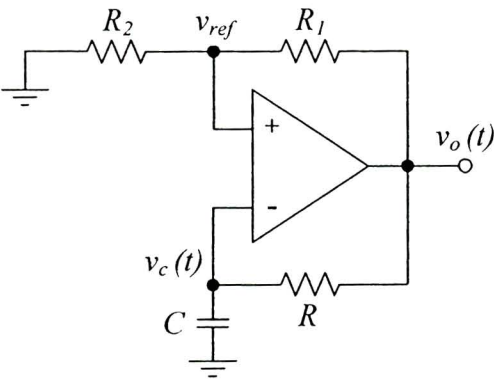
(ข) กราฟลักษณะสมบัติของวงจร



(ค) รูปคลื่นระหว่าง  $V_{in}$  กับ  $V_{out}$

ภาพที่ 2-8 วงจรชนิดต์ริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา





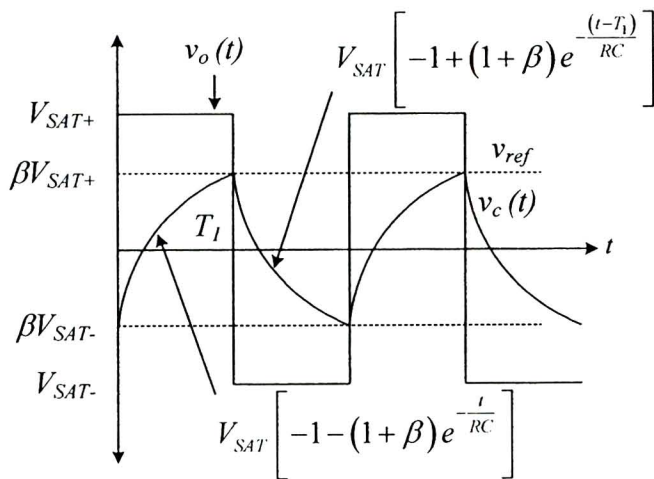
ภาพที่ 2-9 วงจรให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเบื้องต้น

2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมเบื้องต้น

มนตรี (2547: 35) ได้กล่าวไว้ว่า โดยทั่วไปการให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมพื้นฐานที่สุดจะใช้อปแอมป์ ซึ่งวงจรนี้อาจมีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์แบบรีแลกเซชัน (Relaxation Oscillator) วงจรออสซิลเลเตอร์แบบซมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt-trigger Oscillator) หรือ วงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) ลักษณะโครงสร้างของวงจรแสดงในภาพที่ 2-9

หลักการทำงานของวงจรให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม คือการบังคับให้ออปแอมป์ทำงานในสถานะอิ่มตัว (Saturation Region) ในด้านลบและด้านบวกสลับกันไป จากวงจรในภาพที่ 2-9 อัตราส่วน  $\beta = R_2 / (R_1 + R_2)$  ของเอาต์พุตสัญญาณสี่เหลี่ยม  $v_o(t)$  จะถูกป้อนกลับไปยังขาเข้าไม่กลับเฟส (Non-inverting input) ดังนั้นแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage,  $v_{ref}$ ) ที่จุดนี้จะเป็นค่า  $\beta V_{SAT+}$  หรือ  $\beta V_{SAT-}$  เมื่อ  $V_{SAT+}$  และ  $V_{SAT-}$  คือ แรงดันอิ่มตัวสูงสุดด้านบวกและลบของออปแอมป์ ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 90% ของขนาดแรงดันแหล่งจ่าย ในอีกด้านหนึ่งของวงจรจะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุต  $v_o(t)$  จะถูกป้อนกลับไปยังขาเข้ากลับเฟส (Inverting input) โดยมีตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $v_c(t)$  เป็นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามการเก็บประจุหรือคายประจุของตัวเก็บประจุ และเมื่อใดก็ตามที่  $v_c(t)$  มีค่า

เปลี่ยนแปลงจนถึงค่า  $v_{ref}$  เอาต์พุต  $v_o(t)$  จะเปลี่ยนแปลงสถานะไป ซึ่งกรณีนี้จะเห็นว่า ออปแอมป์ทำหน้าที่ของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator) ไปในตัว



ภาพที่ 2-10 รูปคลื่นสัญญาณของวงจรให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเบื้องต้น

สำหรับความถี่และคาบเวลา จะพบว่าถูกกำหนดมาจากค่าเวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการเก็บประจุหรือคายประจุในช่วงแรงดัน  $\beta V_{SAT-}$  ถึง  $\beta V_{SAT+}$  ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$v_c(t) = V_f + (V_i - V_f)e^{-\frac{t}{RC}} \tag{2-45}$$

เมื่อ  $V_f$  เป็นแรงดันค่าสุดท้าย

$V_i$  เป็นแรงดันค่าเริ่มต้น

โดยที่  $V_f = V_{SAT+}$

$$V_i = \beta V_{SAT-}$$

ดังนั้น

$$v_c(t) = V_{SAT+} + (\beta V_{SAT-} - V_{SAT+})e^{-\frac{t}{RC}}$$

หรือ

$$v_C(t) = V_{SAT+} - V_{SAT+}(1 + \beta)e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2-46)$$

ที่เวลา  $t = T_1$  แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเป็น  $+\beta V_{SAT}$  และแรงดันเอาต์พุต  $v_O(t)$  จะสวิตช์จาก  $+V_{SAT}$  เป็น  $-V_{SAT}$   
 ดังนั้น จะได้ว่า

$$v_C(T_1) = \beta V_{SAT+} = V_{SAT+} - V_{SAT+}(1 + \beta)e^{-\frac{T_1}{RC}} \quad (2-47)$$

เมื่อ

$$\beta = 1 - (1 + \beta)e^{-\frac{T_1}{RC}}$$

$$(1 + \beta)e^{-\frac{T_1}{RC}} = 1 - \beta$$

$$-\frac{T_1}{RC} = \ln \frac{1 - \beta}{1 + \beta}$$

ดังนั้น

$$T_1 = RC \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta}$$

ซึ่ง  $T_1$  เป็นช่วงเวลาเพียงครึ่งคาบเวลา ( $T$ )

$$T = 2T_1 = 2RC \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (2-48)$$

จากสมการพบว่า ถ้า  $V_{SAT+}$  มีขนาดเท่ากับ  $V_{SAT-}$  จะได้  $v_O(t)$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความสมมาตรกัน (Symmetrical Waveform)

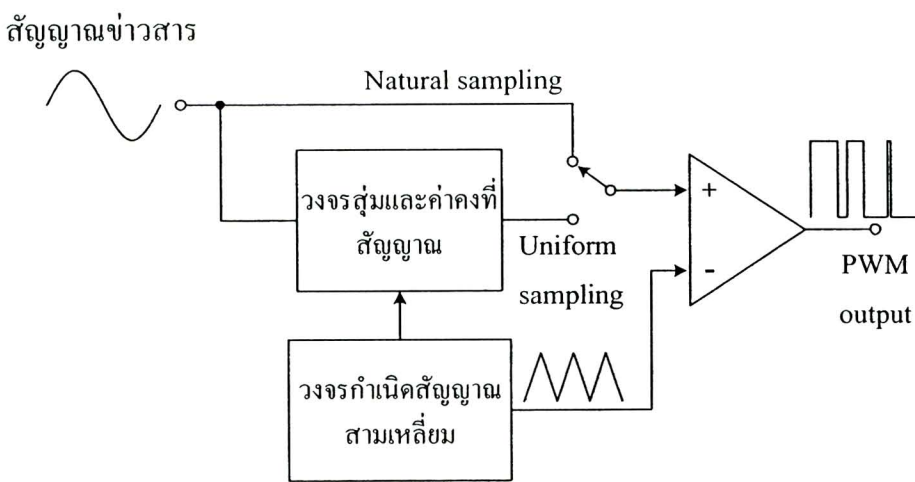
ในสมการที่ (2-48) ถ้า  $R_1 = R_2$  ทำให้  $\beta = 0.5$  จะได้ว่า  $T = 2RC \ln 3$  และถ้า  $R_1 = 1.16R_2$  ก็จะได้ว่า  $T = 2RC$  หรือ

$$f_o = \frac{1}{2RC} \quad ; \quad R_1 = 1.16R_2$$

และจะได้แรงดันเอาต์พุต  $v_o$  จากยอดถึงยอด

$$v_{O(p-p)} = 2V_{SAT} \tag{2-49}$$

จากสมการที่ (2-49) พบว่า ค่าขนาดจากยอดถึงยอดของแรงดันเอาต์พุต  $v_o$  ขึ้นอยู่กับระดับไฟเลี้ยงของวงจร ส่วนความถี่นั้นมีขีดจำกัดจากอัตราสั้ว (Slew rate) ของออปแอมป์ที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วไปจะน้อยกว่า  $100kHz$



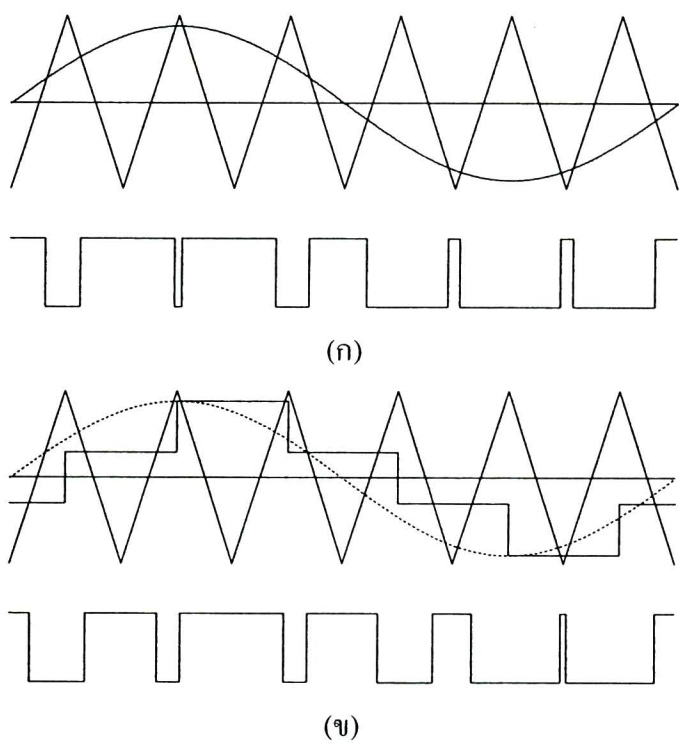
ภาพที่ 2-11 แผนผังของวงจรสร้างสัญญาณ PWM

2.4 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์เบื้องต้น

มนตรี (2547: 52) ได้กล่าวไว้ว่า การมอดูเลตแบบความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation) นั้นมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายแขนง ทั้งในด้านการสื่อสาร เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งในการส่งสัญญาณข่าวสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารทางแสง (Optical communication) ซึ่งใช้สัญญาณ PWM เป็นสัญญาณขับตัวขับแสง (Suh, 1987, Zhang and Keawnin, 1996a and Zhang and Keawnin, 1996b) หรือใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital to Analog conversion) (Halper et. al., 1996, Ramalho and Dias, 2000 and Sandler, 1993) รวมทั้งในด้านการควบคุมมุมนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Rossetto and Buso, 2003 and

Kukrer and Komurcugil, 2003) และวงจรขยายกำลังคลาส D นอกจากนี้ยังใช้กับงานอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอีกมากมาย

โดยทั่วไปแล้ว สำหรับหลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM จะมีอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Natural sampling (NPWM) และสัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Uniform sampling (UPWM) โดยมีโครงสร้างตามที่แสดงในภาพที่ 2-11 (Goldberg and Sandler, 1994) และรูปแบบของสัญญาณทั้งสองแสดงไว้ในภาพที่ 2-12



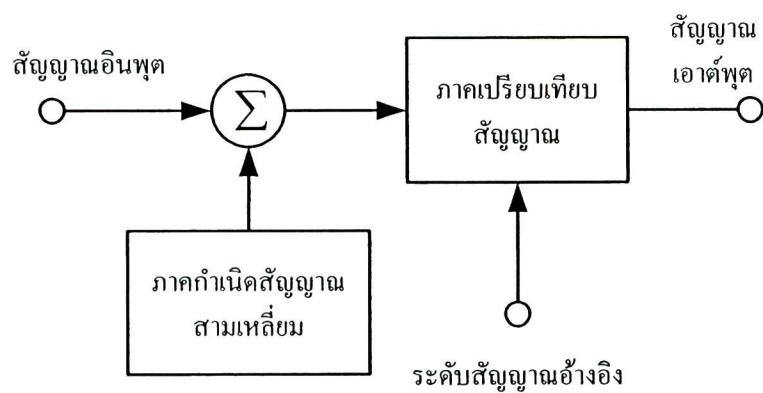
ภาพที่ 2-12 (ก) สัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Natural sampling  
(ข) สัญญาณ PWM ที่ใช้วิธี Uniform sampling

จากสัญญาณ PWM ในภาพที่ 2-12 จะเห็นได้ว่าค่าคาบเวลาของ NPWM มีค่าไม่คงที่โดยขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตที่เข้ามา แต่ในส่วนของ UPWM นั้นคาบเวลาจะมีค่าคงที่ แต่จากสัญญาณทั้งสองแบบสามารถพิจารณาได้ว่า กรณีที่ความถี่ของสัญญาณพาห้คือสัญญาณสามเหลี่ยมที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีค่าสูงกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณขั้วสลับ (มากกว่า 10 เท่า)



ก็จะพบว่าสัญญาณ PWM มีค่าคาบเวลาคงที่ได้ (Holtz, 1992) ส่วนสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้เป็นคลื่นพาห่นั้นมีอยู่ 2 แบบคือ สัญญาณสามเหลี่ยมแบบฟันเลื่อยและสัญญาณสามเหลี่ยมธรรมดา สัญญาณ PWM ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมแบบฟันเลื่อยจะเป็นสัญญาณ PWM แบบ Single side ส่วนสัญญาณ PWM ที่เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมธรรมดาคจะเป็นสัญญาณ PWM แบบ Double side (Bresch et. al., 1998 and Mellor et. al., 1994)

สำหรับในระบบสื่อสารนั้น สัญญาณ PWM ที่นิยมใช้เป็นแบบ Double side NPWM เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนน้อยกว่า เพื่อให้สามารถปรับค่าระดับอ้างอิงของสัญญาณที่มีผลต่อการควบคุมค่าความกว้างของพัลส์ได้ โครงสร้างของการกำเนิดสัญญาณ PWM จึงมีแผนผังการทำงานดังภาพที่ 2-13 (Couch, 1997, Roden, 1996, Schoenbeck, 1992 and Stremmler, 1982) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ในระบบสื่อสารโดยทั่วไป โดยเฉพาะการสื่อสารทางแสง



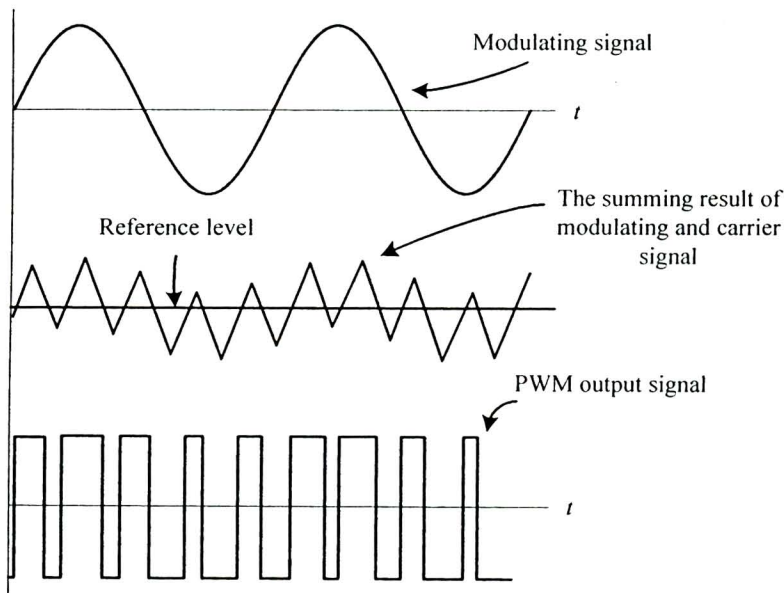
ภาพที่ 2-13 แผนผังของการกำเนิดสัญญาณ PWM โดยทั่วไปที่ใช้ในระบบสื่อสาร

จากแผนผังของวงจรมอดูเลเตอร์แบบความกว้างพัลส์โดยทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 2-13 เมื่อสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นสัญญาณข่าวสาร (Modulating Signal) ตามสัญญาณเส้นบนของภาพที่ 2-13 มารวมกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่ถูกกำเนิดมาจากภาคกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมแล้ว สัญญาณที่ได้จากผลรวม จะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณอินพุตโดยที่ความถี่ยังมีค่าคงเดิมตามสัญญาณเส้นที่สองของภาพที่ 2-14 เมื่อนำสัญญาณนี้มาผ่านภาคเปรียบเทียบสัญญาณกับระดับอ้างอิง (Reference level) จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม



ที่เปลี่ยนแปลงความกว้างของรูปคลื่นไปตามขนาดของผลรวมสัญญาณอินพุต กับสัญญาณสามเหลี่ยมตามสัญญาณเส้นล่างสุดของภาพที่ 2-14

ผลของสัญญาณดังภาพที่ 2-14 เห็นได้ชัดเจนว่า ความถี่ของสัญญาณ PWM เอาต์พุต มีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณที่กู้คืน (Recovered signal) ได้ (Zheren and Smedley, 1998) หรือเกิดความยากขึ้นในการควบคุม (Kazerani et. al.,1991)



ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างสัญญาณที่จุดต่างๆ ของแผนผังของการกำเนิดสัญญาณ PWM ในภาพที่ 2-13

สมการของสัญญาณ PWM โดยทั่วไปสามารถแสดงได้จาก

$$v_{PWM}(t) = \frac{Akv_i(t)}{T} + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\omega_o t)}{n} - \frac{\sin[n\omega_o(t - kv_i(t))]}{n} \right\} \tag{2-50}$$

- เมื่อ  $A$  คือ ขนาดของสัญญาณพาห้
- $k$  คือ ค่าคงที่ของวงจร
- $v_i(t)$  คือ สัญญาณข่าวสารอินพุต

$\omega_0$  เป็น ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของสัญญาณพหุ มีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{T}$  เมื่อ  $T$

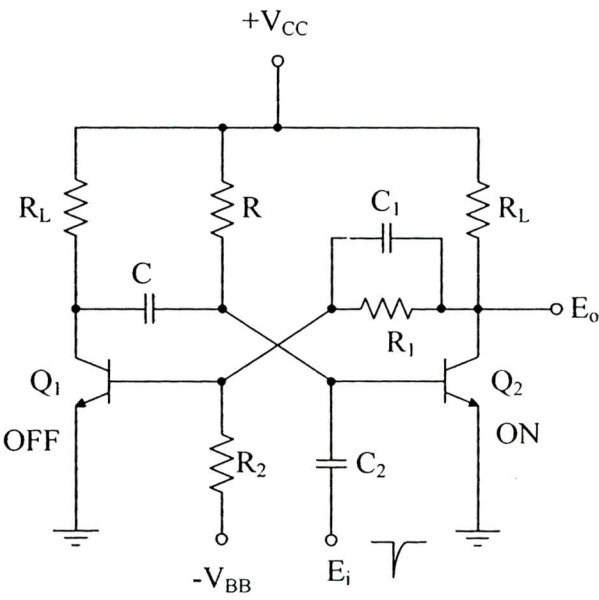
คือ คาบเวลาของสัญญาณ

ซึ่งจะพบว่า สัญญาณ PWM นั้นมีส่วนประกอบอยู่สองส่วนใหญ่ๆ คือ ประกอบด้วยสัญญาณขาขึ้นที่ถูกสเกลด้วย  $\frac{Ak}{T}$  อยู่ที่ความถี่ต่ำ และอีกส่วนคือ ส่วนประกอบของความถี่สูงซึ่งประกอบด้วยสัญญาณพหุและสัญญาณมอดูเลตเชิงเฟส และมีขนาดลดหลั่นกันไปตามค่าของ  $n$  ดังนั้นหากต้องการสัญญาณขาขึ้นกลับมา สามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Siripruchyanun and Wardkein, 2001)

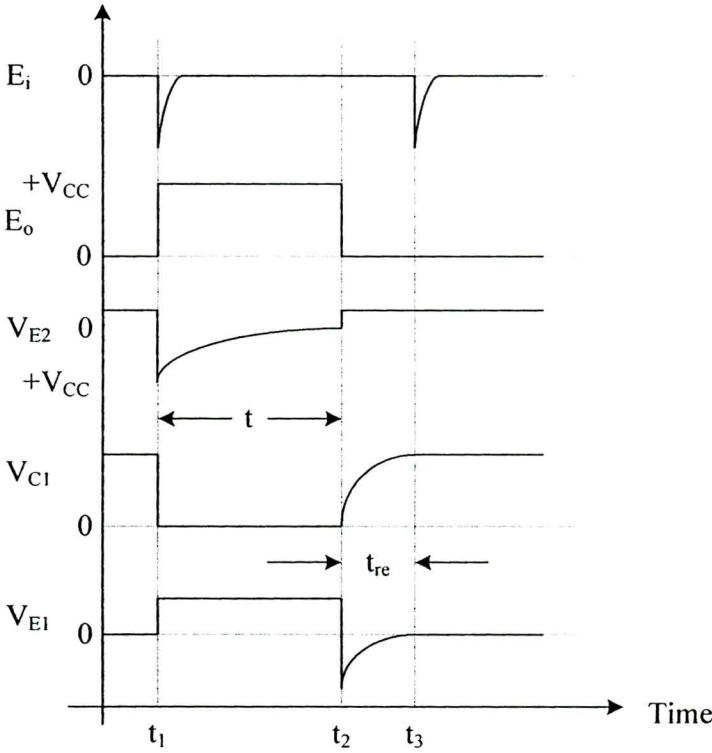
## 2.5 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable multivibrator)

เสกสรร (2553) ได้กล่าวไว้ว่า วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานเมื่อมีสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณกระตุ้นมาควบคุมการทำงาน การทำงานของวงจรแต่ละครั้งจะทำงานเพียงสภาวะเดียว โดยที่วงจรหนึ่งจะทำงานตลอดเวลาส่วนอีกวงจรหนึ่งจะคัตออฟตลอดเวลา วงจรจะอยู่ในสภาวะเช่นนี้จนกว่าจะมีสัญญาณอินพุตมากระตุ้น สภาวะการทำงานจะกลับกันชั่วขณะ คือวงจรที่ทำงานอยู่จะคัตออฟ วงจรที่คัตออฟอยู่จะทำงานแทน หลังจากช่วงเวลาที่กำหนดไว้หมดลง วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิม เวลาดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยค่าของเวลาคงที่ RC วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิมจนกว่าจะกระตุ้นอินพุตใหม่ป้อนเข้ามาอีก

วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้ จะประกอบไปด้วยวงจรกลับสัญญาณ (inverter circuit) สองวงจร ซึ่งเอาต์พุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรแรก จะถูกนำมาเป็นอินพุตของวงจรที่สอง โดยวิธีเชื่อมต่อผ่านตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุ (R-C coupling) และเอาต์พุตของวงจรที่สองจะถูกนำมาเป็นอินพุต ของวงจรแรกโดยวิธีเชื่อมต่อผ่านตัวต้านทาน (resistive coupling) สัญญาณแรงดันที่ใช้เป็นสัญญาณทริกเกอร์ของวงจรนี้ โดยปกติมักมีลักษณะแบบสัญญาณคิฟเฟอร์เนซเซด ที่มีครึ่งล่างเพียงครึ่งเดียว และจะทำให้ที่เอาต์พุตของวงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้มีรูปร่างเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้ มักถูกนำไปใช้ในการควบคุมวงจรพัลส์อื่นๆ เช่น วงจรเกต (Gate circuit) เป็นต้น และวงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบนี้อาจถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า วงจรหน่วงสัญญาณ (Delay circuit) และวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้บางครั้งก็จะเรียกว่า วันชีตมัลติไวเบรเตอร์ (One-shot multivibrator) ดังแสดงดังภาพที่ 2-15



(ก) รายละเอียดวงจร

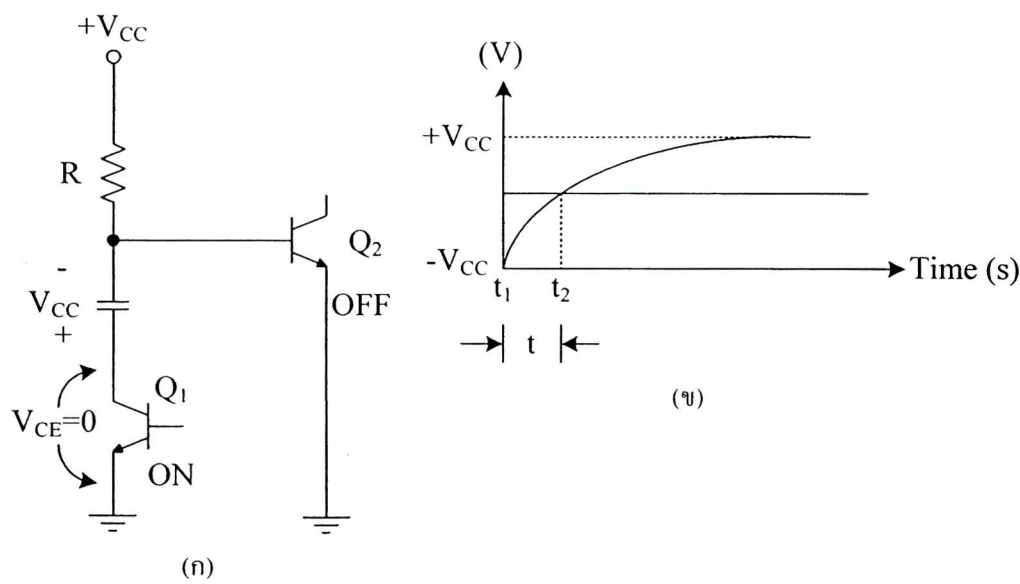


(ข) สัญญาณตามจุดต่างๆ

ภาพที่ 2-15 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

จากภาพที่ 2-15 เป็นวงจรโมโนสเตเบิลไมัลติไวเบเรเตอร์ ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ในการทำงานสภาวะปกติที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนเข้ามา ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะไม่นำกระแส (OFF) ส่วนทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะนำกระแส (ON) เป็นสภาวะเสถียรภาพของวงจร ตัวเก็บประจุ C จะประจุแรงดันถึงค่า  $V_{CC}$  มีชั่วแรงแรงดันชั่วยวบยาลบแสดงดังภาพที่ 2-14

ที่เวลา  $t_1$  วงจรแบ่งแรงดัน  $R_1$  และ  $R_2$  ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดัน  $-V_{BB}$  จ่ายแรงดันไบแอสย้อนกลับให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ไม่นำกระแส (OFF) ในสภาวะเสถียรภาพนี้ เมื่อมีสัญญาณพัลส์แบบลบป้อนเข้ามาที่เบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ที่เวลา  $t_1$  ทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  กลับไปอยู่ในสภาวะไม่นำกระแส (OFF) ขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะมีแรงดันค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่า  $V_{CC}$  มีผลทำให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นำกระแส (ON) จนถึงจุดอิ่มตัวเสมือนขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ถูกต่อลงกราวด์ ทำให้แผ่นเพลตชั่วยวบยของตัวเก็บประจุ C ถูกต่อลงกราวด์แสดงได้ดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 สภาวะการคายประจุของ C ผ่านทรานซิสเตอร์

(ก) การทำงานของวงจรช่วง  $t_{+1}$  (ข) การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ C จากเวลา  $t_{+1}$  ถึง  $t_2$

ที่เวลา  $t_1$  ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ได้รับแรงดันไบแอสกลับมีขนาดแรงดันเท่ากับ  $V_{CC}$  ตัวเก็บประจุ C ประจุแรงดันจาก  $-V_{CC}$  จนถึง  $+V_{CC}$  ผ่านตัวต้านทาน R และทรานซิสเตอร์  $Q_1$  แรงดันที่ถูก

ประจุไว้ที่ตัวเก็บประจุ C เป็นแรงดัน 0 V ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  เริ่มนำกระแสอีกครั้งเมื่อตัวเก็บประจุ C เริ่มประจุแรงดันเป็นขั้วตรงข้ามช่วงเวลาทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ไม่นำกระแส คือช่วงเวลาที่เป็นแรงดันพัลส์ออกเอาต์พุต  $E_o$  ในเวลา  $t$  ตามภาพที่ 2-15 ( ข ) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C จะทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับดังนั้นทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะคงสภาพ OFF ต่อไป กระทั่งแรงดันนี้มีค่าเป็น 0 V ช่วงเวลาซึ่งทรานซิสเตอร์  $Q_2$  มีสภาพ OFF อยู่ก็คือ "ขนาดความกว้างของพัลส์" (pulse duration time)  $t$  ที่เอาต์พุตนั่นเอง

จากภาพที่ 2-16 ช่วงเวลาซึ่งตัวเก็บประจุ C ใช้ในการเก็บประจุกระทั้งมีแรงดันตกคร่อมเป็น 0 V โดยทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน R อาจหาได้จากสมการของการเก็บประจุดังนี้

$$e_C = E - (E \pm E_{CO}) e^{-t/RC} \quad (2-51)$$

ซึ่งในกรณีของวงจร โมโนสเตเบิลเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (2-51) จะเขียนได้ว่า

$$0 = V_{CC} - (V_{CC} + V_{CC}) e^{-t/RC}$$

$$0 = V_{CC} - 2V_{CC} e^{-t/RC}$$

$$2V_{CC} = V_{CC} e^{-t/RC}$$

$$e^{+t/RC} = 2$$

$$t = \frac{RC \log_{10} 2}{\log_{10} e} = \frac{RC (0.301)}{0.434}$$

ดังนั้นจะได้  $t$  ดังนี้

$$t = 0.69 RC \quad (2-52)$$

ในทางปฏิบัติ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเพียง 90 % ของค่า  $V_{CC}$

$$e_C = E - (E \pm E_{CO}) e^{-t/R_L C}$$



$$0.9V_{CC} = V_{CC} - (V_{CC} + 0) e^{-t_{re}/R_L C}$$

$$0.9V_{CC} = V_{CC} - \left( \frac{V_{CC}}{e^{t_{re}/R_L C}} \right)$$

$$\frac{V_{CC}}{e^{t_{re}/R_L C}} = 0.1V_{CC}$$

$$e^{t_{re}/R_L C} = 10$$

$$t_{re} = \frac{R_L C \log_{10} 10}{\log_{10} e} = \frac{R_L C (1.0)}{0.434}$$

ดังนั้นช่วงเวลา  $t_{re}$  หาค่าได้จาก

$$t_{re} = 2.3 R_L C \quad (2-53)$$

จากสมการที่ (2-52) และ (2-53) ช่วงเวลาอย่างน้อยที่สุดที่ต้องใช้สำหรับการกระตุ้นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์คือ

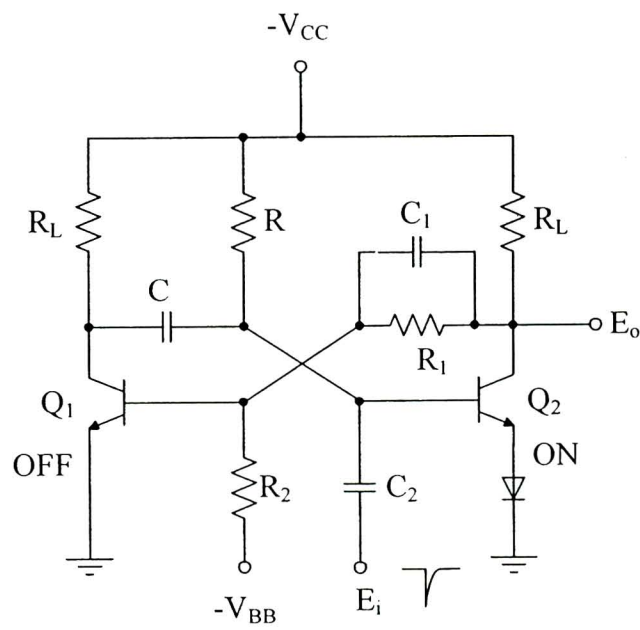
$$T = t + t_{re} = (0.69 R + 2.3 R_L) C \quad (2-54)$$

แรงดันที่ไบแอสกลับที่จ่ายให้รอยต่อที่จ่ายให้อิมิตเตอร์กับเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ที่เวลา  $t_{+1}$  มีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย  $V_{CC}$  ถ้าแรงดันที่ไบแอสกลับที่ป้อนให้รอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสมีค่ามากกว่าค่าทนได้ของทรานซิสเตอร์ ( $V_{EBO}$ ) ทรานซิสเตอร์อาจจะชำรุดเสียหายได้ทันที การป้องกันทำได้โดยต่อไดโอดอนุกรมเข้ากับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ก่อนลงกราวด์แสดงดังภาพที่ 2-17

จากภาพที่ 2-17 เป็นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดต่อเพิ่มไดโอดที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ช่วยป้องกันการพังทลายของรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบส ซึ่งเมื่อตัวเก็บประจุ  $C$  ประจุแรงดันถึงแหล่งจ่าย  $V_{CC}$  จ่ายมาตกคร่อมขาเบสกับกราวด์ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  เป็นไบแอสกลับจะเป็นแรงดันตกคร่อมรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสส่วนหนึ่ง และเป็นแรงดันตกคร่อมไดโอด  $D$



อีกส่วนหนึ่ง ไดโอด D ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันไบแอสกลับของ  $V_{CC}$  ที่ช่วยให้ช่วยป้องกันไม่ให้แรงดันไบแอสกลับที่ตกคร่อมระหว่างรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสมีค่าสูงเกินกว่าแรงดัน  $V_{EBO}$  ที่ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะทนได้



ภาพที่ 2-17 วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดต่อเพิ่มไดโอดที่ขาอิมิตเตอร์  $Q_2$

2.6 ชุดการสอน

2.6.1 ความหมายของชุดการสอน

วินัย (2552: 53) ได้กล่าวไว้ว่า ชุดการสอนเป็นนวัตกรรมทางการศึกษาอย่างหนึ่ง ภาษาอังกฤษใช้ชื่อต่างๆ กัน เช่น Learning package หรือ Instructions kits ซึ่งเข้ามามีบทบาทในการจัดการเรียนการสอนและช่วยในการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยนักการศึกษาได้ให้ความหมายของชุดการสอนไว้ดังนี้

ชุดการสอน เป็นสื่อประสมที่ได้จากระบบการผลิต และการนำสื่อการสอนที่สอดคล้องกับเนื้อหาวิชา หน่วยการเรียนรู้ หัวข้อเรื่องและวัตถุประสงค์ เพื่อช่วยให้การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การเรียนอย่างมีประสิทธิภาพ (ชัยยงค์และคณะ, 2540: 114)

ชุดการสอน หมายถึง ระบบการผลิตและการใช้สื่อประสมอย่างเป็นระบบโดยให้สอดคล้องกับวิชา หน่วยการเรียนรู้ และหัวข้อเรื่องนั้น วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียนการสอน ประกอบด้วยคู่มือครู เนื้อหา ข้อมูลที่เชื่อถือได้ แบบฝึกหัด และมีการกำหนดจุดมุ่งหมายของการเรียนเอาไว้อย่างครบถ้วน เพื่อช่วยให้เกิดการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพ (ชลธิยา, 2540: 293)

ชุดการสอน คือการรวบรวมสื่อการสอนอย่างสมบูรณ์ตามแบบแผนที่วางไว้เพื่อให้บรรลุจุดมุ่งหมายของการสอน ชุดการสอนเป็นระบบสื่อประสมสำเร็จรูปเพื่อให้ครูใช้ในการสอนโดยที่ครูไม่ต้องเตรียมสื่ออื่น ๆ หรือวางแผนการสอนใหม่ (สมปอง, 2543: 91)

ชุดการสอน เป็นสื่อการสอนชนิดหนึ่งซึ่งเป็นชุดของสื่อประสม (Multimedia) หมายถึง การใช้สื่อการสอนตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปร่วมกัน เพื่อให้ผู้เรียนได้รับความรู้ตามต้องการ สื่อที่นำมาใช้ร่วมกันนี้จะช่วยเสริมประสบการณ์ซึ่งกันและกันตามลำดับขั้นที่จัดขึ้นสำหรับหน่วยการเรียนรู้ตามหัวข้อเนื้อหาและประสบการณ์ของแต่ละหน่วย ที่ต้องการจะให้ผู้เรียนได้รับโดยสามารถจะจัดเอาไว้เป็นชุด ๆ บรรจุอยู่ในซอง กล่อง หรือกระเป๋า (บุญเกื้อ, 2545: 91)

จากความหมายของชุดการสอนที่นักการศึกษาหลาย ๆ ท่านกล่าวไว้ พอจะสรุปได้ว่าชุดการสอน หมายถึง ชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้นมาอย่างเป็นระบบ โดยมีความสอดคล้องกับเนื้อหาวิชาในหลักสูตร นำมาใช้ในระบบการเรียนการสอน เพื่อช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

## 2.6.2 ประเภทของชุดการสอน

ชุดการสอนมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีลักษณะการสร้างและการนำไปใช้แตกต่างกันออกไป การนำชุดการสอนมาใช้จะต้องให้เหมาะสมกับประเภทของชุดการสอน เพื่อให้ชุดการสอนนั้นเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังที่นักการศึกษาหลายท่านได้แยกประเภทของชุดการสอนไว้ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 ชุดการสอนประกอบการบรรยาย หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ชุดการสอนสำหรับครูเป็นชุดการสอนที่กำหนดกิจกรรม และสื่อการสอนที่ใช้ประกอบการบรรยาย เพื่อเปลี่ยนบทบาทของครูให้ลดน้อยลง และเปิดโอกาสให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้มากขึ้น ครูผู้สอนสามารถนำชุดการสอนนี้ไปใช้ได้ทันที เนื่องจากชุดการสอนที่ครูเป็นผู้ใช้ บางครั้งจึงเรียกว่า “ชุดการสอนสำหรับครู” ชุดการสอนประกอบการบรรยายจะมีเนื้อหาเพียงอย่างเดียวโดย

แบ่งเป็นหัวข้อที่บรรยายในเทป แผนภูมิ แผ่นภาพ ภาพยนตร์ โทรทัศน์ และกิจกรรมกลุ่มเพื่อให้ นักเรียนได้อภิปรายตามปัญหาและหัวข้อที่ครูกำหนดให้ เพื่อความเรียบร้อยในการใช้ชุดการสอน ประเภทนี้มักจะบรรจุไว้ในกล่อง ที่มีขนาดพอเหมาะกับจำนวนสื่อการสอน อย่างไรก็ตามหากเป็น วัสดุที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไป หรือราคาแพงไป แดกหรือเสียง่ายและเป็นสิ่งมีชีวิตจะไม่ใส่ไว้ในชุดการสอน แต่จะกำหนดไว้ในส่วนที่เกี่ยวกับสิ่งที่ครูต้องเตรียมล่วงหน้าก่อนทำการสอน กำหนดไว้ในคู่มือครู วัสดุเหล่านี้นิยมจัดไว้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ หรือในห้องวิชาการ เช่น ห้องสังคมศึกษา เป็นต้น

ชุดการสอนประกอบการบรรยาย ประกอบด้วย (วาสนา, 2525: 138)

ก) คู่มือครู ประกอบด้วย จุดมุ่งหมายของหลักสูตร วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม รายละเอียด ของเนื้อหาวิชา ขั้นตอนกิจกรรมหรือวิธีการสอน รายการบอกชนิดและคำแนะนำการใช้สื่อการเรียนการสอนตามลำดับ

ข) สื่อการเรียนการสอน (Instructional media) ใช้ประกอบการสอนเพื่อบรรลุ จุดมุ่งหมาย มีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะส่งเสริมการเรียนการสอนให้ได้ผล สื่อการเรียนการสอน จะได้รับการเลือกสรรอย่างเหมาะสมกับกิจกรรมการเรียนการสอน

ค) แบบฝึกหัด (Exercise) เป็นแบบฝึกหัดตามที่มอบหมายไว้ในบัตรกิจกรรม อาจแยกเป็นชุด ๆ หรือรวมกันเป็นเล่มก็ได้

ง) แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน

2.6.2.2 ชุดการสอนสำหรับกิจกรรมกลุ่ม ชุดการสอนแบบนี้มุ่งหมายให้นักเรียนได้ ประกอบกิจกรรมร่วมกัน เช่น ในห้องเรียนกิจกรรมที่อยู่ในรูปของศูนย์การเรียนรู้ (Learning center) นักเรียนจะเรียนจากการประกอบกิจกรรมการเรียนรู้ร่วมกันตามสื่อและหัวข้อที่กำหนดไว้ ชุดการสอนนี้ประกอบด้วย ชุดย่อยที่มีจำนวนเท่ากับจำนวนศูนย์กิจกรรมนั้น ๆ บทบาทของครูนั้นจะเป็น เพียงผู้จัดเตรียมประสบการณ์ ผู้ประสานงาน และผู้ตอบคำถาม เมื่อจบการเรียนรู้แต่ละศูนย์แล้ว นักเรียนอาจจะสนใจในการเรียนเสริมจากศูนย์สำรองที่เตรียมไว้ เพื่อไม่เป็นการเสียเวลาที่ต้องรอคอยเมื่อกลุ่มอื่นยังเรียนไม่เสร็จในแต่ละศูนย์ (รุ่งทิวา, 2527: 88) ชุดการสอนที่นำมาใช้สำหรับ กิจกรรมกลุ่มนี้จะใช้ร่วมกับการสอนแบบศูนย์การเรียนรู้ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ



ก) คู่มือครู เป็นสิ่งช่วยการสอนแบบศูนย์การเรียนรู้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพในคู่มือครูจะมีคำชี้แจงสำหรับครู สิ่งที่คุณต้องเตรียมบทบาทของนักเรียน การจัดชั้นเรียนพร้อมแผนผัง แผนการสอน เนื้อหาสาระประจำศูนย์กิจกรรมต่าง ๆ แบบทดสอบก่อนการเรียนรู้ และหลังการเรียนรู้

ข) สื่อสำหรับศูนย์กิจกรรมจะมีบัตรคำสั่ง บัตรกิจกรรม บัตรเนื้อหาบัตรคำถามหรือบัตรนำอภิปราย และบัตรเฉลย รวมทั้งสื่อการเรียนอื่น ๆ เช่นรูปภาพ แบบเรียนจำนวนบัตรต่าง ๆ หรือสื่อการเรียนอาจมีเท่ากับจำนวนนักเรียนในกลุ่มหรืออาจใช้ร่วมกันได้ไม่จำเป็นต้องครบทุกคน

ค) แบบฝึกหัด แบบฝึกหัดตามที่มอบหมายไว้ในบัตรกิจกรรม อาจแยกเป็นชุด ๆ หรือรวมเป็นเล่มก็ได้

2.6.2.3 ชุดการสอนแบบรายบุคคล เป็นชุดการสอนที่จัดระบบขั้นตอนเพื่อให้ผู้เรียนใช้เรียนด้วยตนเองตามลำดับขั้นความสามารถของแต่ละบุคคล เมื่อศึกษาจบแล้วจะทำการทดสอบเพื่อประเมินผลความก้าวหน้า และศึกษาชุดอื่นต่อไปตามลำดับ เมื่อมีปัญหาผู้เรียนจะปรึกษากันได้ระหว่างผู้ชี้แนะแนวทางการเรียน (สมหญิง, 2532: 66)

2.6.2.4 ชุดการสอนทางไกล เป็นชุดการสอนที่ครูกับนักเรียนอยู่ต่างถิ่นต่างเวลากันมุ่งสอนให้นักเรียนได้เรียนด้วยตนเองโดยไม่ต้องมาเข้าชั้นเรียนประกอบด้วยสื่อประเภทสิ่งพิมพ์ รายการวิทยุกระจายเสียง โทรทัศน์ ภาพยนตร์และการสอนเสริมตามศูนย์บริการการศึกษา เช่น ชุดการสอนทางไกลของมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช เป็นต้น (ชัยงค์และคณะ, 2540: 118)

### 2.6.3 องค์ประกอบของชุดการสอน

ชุดการสอน ถือเป็นเครื่องมือที่สามารถพัฒนาการสอนของครูให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ชุดการสอนที่ดีต้องมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป ถ้าขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง อาจจะมีผลต่อการพัฒนาการเรียนการสอน

ชัยงค์ (2526: 120) ได้กล่าวไว้ว่า องค์ประกอบของชุดการสอนประกอบด้วย สื่อประสมในรูปแบบของวัสดุ อุปกรณ์และวิธีการตั้งแต่สองวิธีขึ้นไป บูรณาการโดยใช้วิธีการจัดระบบ เพื่อใช้ชุดการสอนแต่ละชุดให้มีประสิทธิภาพและมีความสมบูรณ์เบ็ดเสร็จในตัวเอง ซึ่งจำแนกส่วนประกอบของชุดการสอนได้ 4 ส่วน คือ

2.6.3.1 คู่มือ สำหรับครูผู้สอน หรือผู้เรียนที่ต้องเรียนจากชุดการสอน

2.6.3.2 คำสั่ง หรือการมอบงานเพื่อกำหนดแนวทางให้กับผู้เรียน

2.6.3.3 เนื้อหาสาระและสื่อ โดยจัดให้อยู่ในรูปของสื่อการสอนประสมและกิจกรรมการเรียนการสอนแบบกลุ่มและแบบบุคคลตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมที่ได้กำหนดไว้ในแผนการสอน

2.6.3.4 การประเมินผล เป็นการประเมินผลของกระบวนการ ได้แก่ แบบฝึกหัด รายงานการค้นคว้า และผลของการเรียนรู้ในรูปของแบบทดสอบต่างๆ

#### 2.6.4 ขั้นตอนการสร้างชุดการสอน

ชุดการสอนจะมีประสิทธิภาพ มีประโยชน์ต่อการเรียนการสอน ต้องผ่านขั้นตอน การสร้าง อย่างดี สามารถพัฒนาระบบการเรียนการสอนโดยเปิดโอกาสให้นักเรียน ได้ศึกษาความรู้ได้ด้วยตนเอง ดังนั้นในการสร้างชุดการสอน จึงมีขั้นตอนของการสร้างชุดการสอนไว้ดังนี้ (บุญเกื้อ, 2545: 97-99)

2.6.4.1 กำหนดหมวดหมู่เนื้อหา และประสบการณ์อาจกำหนดเป็นหมวดวิชาหรือบูรณาการเป็นสหวิทยาการตามความเหมาะสม

2.6.4.2 กำหนดหน่วยการสอน แบ่งเนื้อหาวิชาออกเป็นหน่วยการสอน โดยประมาณ เนื้อหาวิชาที่ผู้สอนสามารถถ่ายทอดความรู้แก่ผู้เรียนได้ในหนึ่งสัปดาห์ หรือ หนึ่งครั้ง

2.6.4.3 กำหนดหัวเรื่อง ผู้สอนจะต้องถามตนเองว่าในการสอนแต่ละหน่วยควรให้ประสบการณ์อะไรกับผู้เรียนบ้าง จากนั้นจึงทำการกำหนดหัวเรื่องออกมาเป็นหน่วยการสอนย่อย

2.6.4.4 กำหนดความคิดรวบยอดและหลักการ จะต้องสอดคล้องกับหน่วยและหัวเรื่อง โดยสรุปรวมแนวความคิด สาระ และหลักเกณฑ์ที่สำคัญไว้ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดเนื้อหาที่สอนให้สอดคล้องกัน

2.6.4.5 กำหนดวัตถุประสงค์ให้สอดคล้องกับหัวเรื่อง โดยกำหนดเป็นวัตถุประสงค์ทั่วไปก่อนแล้วจึงเขียนเป็นวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม ที่ต้องมีเงื่อนไขและเกณฑ์ของพฤติกรรมไว้

2.6.4.6 กำหนดกิจกรรมการเรียนรู้ ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกและผลิตสื่อการสอน กิจกรรมการเรียนรู้ หมายถึง กิจกรรมทุกอย่างที่ผู้เรียนปฏิบัติ เช่น การอ่านบัตรคำสั่ง ตอบคำถาม เขียนภาพ ทำการทดลอง ฯลฯ

2.6.4.7 กำหนดแบบประเมินผล ต้องประเมินผลให้ตรงกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม โดยใช้การสอบแบบอิงเกณฑ์ เพื่อให้ผู้สอนทราบว่าหลังผ่านกิจกรรมมาเรียบร้อยแล้วผู้เรียนได้เปลี่ยนพฤติกรรมการเรียนรู้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่

2.6.4.8 เลือกและผลิตสื่อการสอน วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการที่ผู้สอนใช้ ถือเป็นสื่อการสอนทั้งสิ้น เมื่อผลิตสื่อการสอนของแต่ละหัวเรื่องแล้ว ก็จัดสื่อการสอนเหล่านั้นให้เป็นหมวดหมู่ ในกล่องที่เตรียมไว้ ก่อนนำไปทดลองหาประสิทธิภาพ

2.6.4.9 หาประสิทธิภาพของชุดการสอน เพื่อเป็นหลักประกันว่าชุดการสอนที่สร้างขึ้นมามีประสิทธิภาพในการสอน ผู้สร้างต้องกำหนดเกณฑ์ขึ้นล่วงหน้า โดยคำนึงถึงหลักการที่ว่า การเรียนรู้เป็นกระบวนการเพื่อช่วยให้การเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้เรียนบรรลุผล ตามที่กำหนดไว้ในวัตถุประสงค์การสอน

2.6.4.10 การใช้ชุดการสอน เมื่อได้ชุดการสอนที่ได้ปรับปรุงและมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้แล้ว สามารถนำไปใช้สอนผู้เรียน ได้ตามประเภทของชุดการสอนและระดับการศึกษา โดยกำหนดขั้นตอนการใช้ได้ดังนี้

- ก) ให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบก่อนการเรียนรู้ เพื่อพิจารณาพื้นฐานความรู้เดิม
- ข) ขึ้นเข้าสู่บทเรียน
- ค) ขึ้นประกอบกิจกรรมการเรียนรู้ (ชั้นสอน) ผู้สอนบรรยายหรือแบ่งกลุ่มประกอบกิจกรรมการเรียนรู้
- ง) ขึ้นสรุปผลการสอน เพื่อสรุปความคิดรวบยอดและหลักการสำคัญที่ได้สอนมาทั้งหมด
- จ) ทำแบบทดสอบหลังการเรียนรู้ เพื่อดูพฤติกรรมการเรียนรู้ที่เปลี่ยนไป

## 2.6.5 ประโยชน์ของชุดการสอน

ชุดการสอนมีประโยชน์ต่อการเรียนการสอนอยู่หลายประการ ซึ่งนักการศึกษาได้กล่าวถึงประโยชน์ของชุดการสอนไว้ดังนี้

2.6.5.1 ชุดการสอนช่วยลดภาระของครูผู้สอน เมื่อมีชุดการสอนสำเร็จอยู่แล้วผู้สอนจะดำเนินการสอนตามคำแนะนำที่กำหนดไว้ให้ ผู้สอนไม่ต้องเสียเวลาในการทำสื่อการสอนใหม่ทำ



ให้ผู้สอนมีเวลาเตรียมการสอน การทดลองและศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในเนื้อหาวิชาตามชุดการสอน ทำให้ผู้สอนมีประสบการณ์กว้างขึ้น ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการสอนของครูเพิ่มขึ้น

2.6.5.2 ทำให้ผู้เรียนได้รับความรู้ในแนวเดียวกัน ผู้สอนแต่ละคนย่อมมีความรู้และความสามารถในการถ่ายทอดความรู้แตกต่างกันในเรื่องเดียวกัน ผู้เรียนอาจจะได้รับความรู้และได้รับรายละเอียดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ชุดการสอนมีจุดมุ่งหมายชัดเจนที่เป็นพฤติกรรมมีข้อเสนอแนะกิจกรรมการใช้สื่อและข้อสอบประเมินพฤติกรรมไว้อย่างพร้อมมูล

2.6.5.3 ชุดการสอนช่วยให้เกิดประสิทธิภาพอย่างเชื่อถือได้ เพราะชุดการสอนผลิตขึ้นด้วยวิธีการเข้าสู่ระบบ (System approach) โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญหลายด้าน เช่น ผู้เชี่ยวชาญวิชาเฉพาะนั้น ๆ นักเทคโนโลยีการศึกษา นักจิตวิทยา ผู้เชี่ยวชาญการวัดผล ผู้สอน ผู้เรียนผู้ปกครอง ร่วมกันผลิตชุดการสอน โดยมีการทดลองใช้และปรับปรุงจนกระทั่งแน่ใจว่าได้ผลดีหลายครั้งในสถานการณ์ที่กำหนดไว้ จึงจะนำออกมาใช้ทั่ว ๆ ไป เพื่อให้แน่ใจว่าผู้สอนได้ใช้ชุดการสอนอย่างมีประสิทธิภาพ (ลัดดา, 2523: 31)

2.6.5.4 ช่วยให้ผู้สอนถ่ายทอดเนื้อหา และประสบการณ์ที่สลับซับซ้อน โดยมีลักษณะเป็นนามธรรมสูง เช่น การทำงานของเครื่องกล อวัยวะในร่างกายหรือการเจริญเติบโตของสัตว์ชั้นต่ำ ฯลฯ ลักษณะเช่นนี้ผู้สอนจะไม่สามารถถ่ายทอดด้วยการบรรยายได้ดี (ชัยยงค์, 2526: 121)

2.6.5.5 ช่วยครูไม่ต้องเสียเวลาในการคิดค้นมาก นอกจากนั้นยังเป็นวิธีการอบรมครูประจำการเรื่องการดำเนินการสอนอีกประการหนึ่ง

2.6.5.6 ทำให้ครูมีเวลาเพียงพอในการที่เตรียมการสอน ค้นคว้าเพิ่มเติมให้เป็นไปตามที่ชุดการสอนระบุไว้ เพื่อประสิทธิภาพของการเรียนการสอน รวมทั้งมีเวลาในการตรวจแบบฝึกหัดหรือแบบทดสอบ แทนที่จะทุ่มเวลาในการทำสื่อการเรียนการสอน โดยเฉพาะครูไม่มีความสามารถในด้านนี้จะปัญหามากในที่สุด จะไม่ยอมใช้สื่อการเรียนการสอน หรือสื่อการสอนอาจจะออกมาในรูปแบบที่ไม่น่าดูนัก

## 2.6.6 เกณฑ์ในการหาประสิทธิภาพชุดการสอน

การกำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพของชุดสอนนิยมตั้งไว้ที่ 90/90 โดยที่

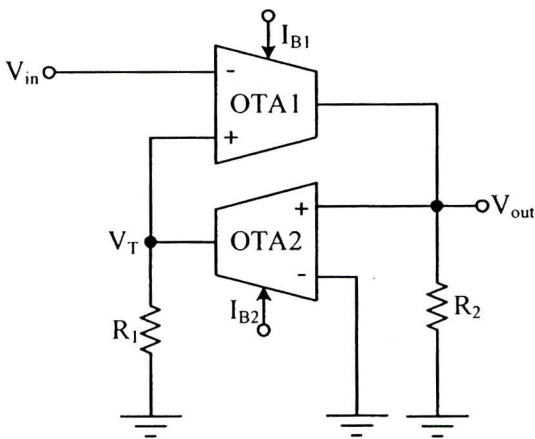
90 ตัวแรก คือคะแนนเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละของกลุ่มในการทำแบบฝึกหัดในบทเรียน

90 ตัวหลัง คือคะแนนเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละของกลุ่มในการทำแบบทดสอบหลังบทเรียน

ถ้าปรากฏว่าคะแนนเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละของกลุ่มในการทำแบบฝึกหัดและในการทำแบบทดสอบ หลังเรียนได้ไม่ต่ำกว่า 90 ทั้งคู่ ก็ถือว่า ชุดการสอนที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ในขั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามชุดการสอนบางวิชาที่มีเนื้อหาหายาก ๆ อาจจะหาประสิทธิภาพได้ต่ำกว่าเกณฑ์ 90/90 แต่ไม่ควรต่ำกว่า 80/80 จึงจะถือว่าพอใช้ได้ (ธีรชัย, 2532: 4)

2.7 ผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรสมิตต์ทริกเกอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ และวงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ได้มีผู้นำเสนอมาพอสังเขปดังนี้



ภาพที่ 2-18 วงจรสมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTA

2.7.1 วงจรสมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTA

ภาพที่ 2-18 แสดงโครงสร้างวงจรสมิตต์ทริกเกอร์โหมคแรงดันที่ใช้วงจรขยายความนำถ้ายโอน (OTA) (Kim et. al., 1997) ซึ่งประกอบด้วย OTA และตัวต้านทานอย่างละสองตัว โดย  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  เป็นกระแสไบแอสของ OTA ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

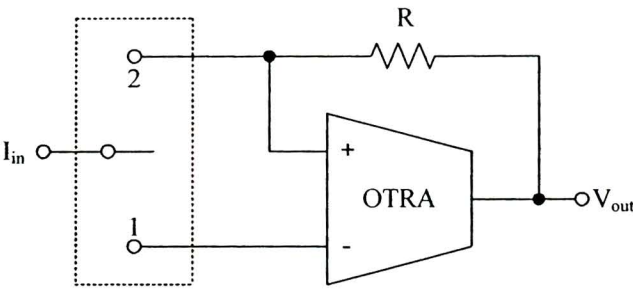
เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2-18 โดยอาศัยหลักการทำงานในสภาวะอิ่มตัวของ OTA จะได้ขนาดของแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  แรงดันขีดเริ่มด้านสูง  $V_{TH}$  และแรงดันขีดเริ่มด้านต่ำ  $V_{TL}$  ดังนี้

$$V_{out} = \begin{cases} I_{B1}R_2 & \text{if } V_{in} < V_T \\ -I_{B1}R_2 & \text{if } V_{in} > V_T \end{cases} \tag{2-55}$$

และ

$$V_{TH} = I_{B2}R_1, V_{TL} = -I_{B2}R_1 \tag{2-56}$$

จากสมการที่ (2-55) และ (2-56) จะเห็นได้ว่า จุดเด่นของวงจรนี้คือ สามารถควบคุมขนาดสัญญาณเอาต์พุต แรงดันขีดเริ่มด้านสูงและต่ำ ได้จากกระแสไบแอส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  ตามลำดับ อีกทั้ง  $V_{out}$   $V_{TH}$  และ  $V_{TL}$  ในทางอุดมคติเป็นอิสระจากอุณหภูมิ เนื่องจากทั้งสามค่านี้ไม่มีเทอมของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามวงจรชนิดนี้ยังมีข้อด้อยในเรื่องที่ยังมีโครงสร้างที่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมจะส่งผลให้ขนาดของชิปมีขนาดใหญ่ และเนื่องจากใช้ช่วงการทำงานในสภาวะอิ่มตัวของ OTA ที่มีโครงสร้างเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีอินพุตที่มากกว่า  $2V_T$  หรือประมาณ 52mV ส่งผลให้วงจรนี้ไม่สามารถทำงานได้ เมื่อรับสัญญาณอินพุตขนาดต่ำกว่า 52mV และมีการทำงานอยู่ในโหมดแรงดัน



ภาพที่ 2-19 วงจรชนิดตรีกรเกอร์ที่ใช้ OTA

### 2.7.2 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTRA

โครงสร้างของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้ OTRA (Operational transresistance amplifier) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-19 (Lo et. al., 2010) ซึ่งวงจรนี้ประกอบด้วย OTRA แอนะลอกสวิตช์และตัวต้านทานแบบลอยอย่างละหนึ่งตัว

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2-19 จะเห็นได้ว่า วงจรนี้สามารถทำงานเป็นวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ได้ทั้งแบบทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา โดยวงจรจะทำงานเป็นวงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกาเมื่อตำแหน่งของแอนะลอกสวิตช์อยู่ที่ “1” และถ้าตำแหน่งของแอนะลอกสวิตช์อยู่ที่ “2” วงจรจะทำหน้าที่เป็นวงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและกระแสขีดเริ่ม (Threshold currents) ด้านสูง ( $I_{TH}$ ) และ ( $I_{TL}$ ) ของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบตามเข็มนาฬิกา หาค่าได้จาก

$$V_{out} = \begin{cases} V_{SAT+} & \text{if } I_m < I_{TH} \\ V_{SAT-} & \text{if } I_m > I_{TL} \end{cases} \quad (2-57)$$

และ

$$I_{TH} = \frac{V_{SAT+}}{R}, I_{TL} = \frac{V_{SAT-}}{R} \quad (2-58)$$

เมื่อวงจรทำหน้าที่เป็นแบบทวนเข็ม ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและกระแสขีดเริ่มหาค่าได้ดังนี้

$$V_{out} = \begin{cases} V_{SAT+} & \text{if } I_m > I_{TH} \\ V_{SAT-} & \text{if } I_m < I_{TL} \end{cases} \quad (2-59)$$

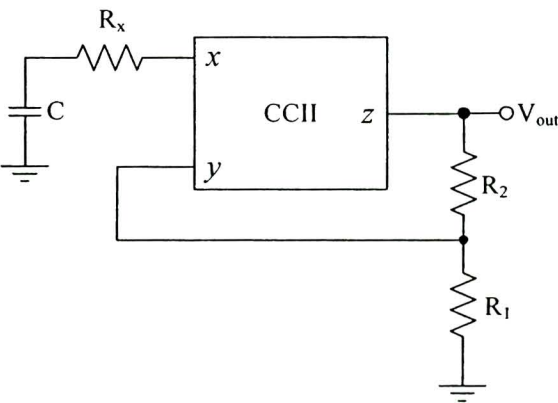
และ

$$I_{TH} = \frac{V_{SAT+}}{R}, I_{TL} = \frac{V_{SAT-}}{R} \quad (2-60)$$

เมื่อ  $V_{SAT+}$  และ  $V_{SAT-}$  คือแรงดันสภาวะอิ่มตัว OTRA ด้านบวกและลบตามลำดับ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 90% ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านบวกและลบ

จากภาพที่ 2-19 และสมการที่ (2-57) ถึง (2-60) สามารถสรุปลักษณะเด่นของวงจรได้คือ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ พาสซีฟ และแอนะล็อกสวิตช์อย่างละหนึ่งตัว ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเลือกการทำงานได้ทั้งแบบตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาโดยแอนะล็อกสวิตช์ดังกล่าวมาข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม วงจรนี้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตไม่เป็นอิสระจากแหล่งจ่าย อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณเอาต์พุตส่งผลกระทบต่อกระแสขีดเริ่ม และจากโครงสร้างของวงจรใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอยในการออกแบบ จึงไม่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นวงจรรวม

2.7.3 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII



ภาพที่ 2-20 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII

วงจรที่แสดงในภาพที่ 2-20 คือวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII (De R. S. et. al. 2007) โดยโครงสร้างของวงจรประกอบด้วย CCII ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ ตัวต้านทานแบบลอย และตัวต้านทานแบบลงกราวด์อย่างละหนึ่งตัว ส่วน  $R_x$  คือความต้านทานแฝงภายในตัว CCII เมื่อพิจารณาขนาดแรงดันเอาต์พุตและความถี่สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{out(p-p)} = 2V_{SAT} \tag{2-61}$$



และ

$$f = \frac{1}{R_x C \ln \left( \frac{V_{x+} - V_{TL}}{V_{TH} - V_{x+}} \times \frac{V_{x-} - V_{TH}}{V_{TL} - V_{x-}} \right)} \tag{2-61}$$

เมื่อ  $V_{SAT}$  คือขนาดแรงดันสภาวะอิ่มตัว CCII ซึ่งมีค่าประมาณ 90% ของแหล่งจ่ายไฟ ส่วน  $V_{x+}$

และ  $V_{x-}$  คือขนาดแรงดันที่ขั้ว  $x$  ด้านบวกและลบตามลำดับ ซึ่ง  $V_{TH} = \frac{R_1 - R_x}{R_1 + R_2} V_{SAT+}$

และ  $V_{TL} = \frac{R_1 - R_x}{R_1 + R_2} V_{SAT-}$

จุดเด่นของวงจรนี้คือ ขนาดของแรงดันเอาต์พุตในทางอุดมคติไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม วงจรนี้มีข้อด้อยในเรื่องขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟเลี้ยง อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟเลี้ยงส่งผลกระทบต่อความถี่ของวงจร มากไปกว่านั้น ความถี่ยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และวงจรนี้ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอยในการออกแบบ จึงไม่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นวงจรรวมเช่นกัน

2.7.4 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTRA

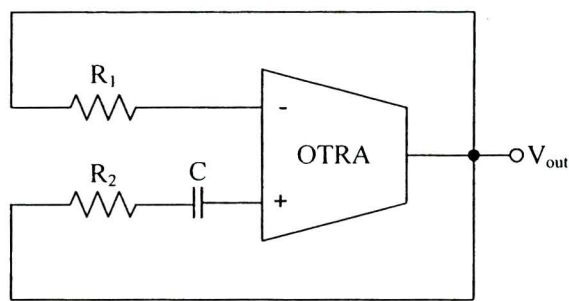
วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTRA แสดงไว้ในภาพที่ 2-21 (Hou et. al., 2005) โครงสร้างของวงจรนี้ประกอบด้วย OTRA ตัวเก็บประจุแบบลอยอย่างละหนึ่งตัว และตัวต้านทานแบบลอยจำนวนสองตัว อาศัยหลักการทำงานของ OTRA ในสภาวะอิ่มตัวขนาดแรงดันเอาต์พุตและความถี่สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$V_{out(p-p)} = 2V_{SAT} \tag{2-62}$$

และ

$$f = \frac{1}{2R_2 C \ln \left( \frac{2R_1}{R_2} - 1 \right)} \tag{2-63}$$

จุดเด่นของวงจรนี้คือ ขนาดของแรงดันเอาต์พุตไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีเทอมของศักย์ค่าความร้อน ( $V_T$ ) ยิ่งไปกว่านั้น ในทางอุดมคติการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณเอาต์พุตไม่ส่งผลกระทบกับความถี่ อย่างไรก็ตามข้อด้อยหลายประการได้แก่ วงจรนี้ใช้ตัวต้านทานแบบลอยสองตัวและตัวเก็บประจุแบบลอยอีกหนึ่งในการออกแบบ จึงไม่เหมาะในการพัฒนาเป็นวงจรรวม และไม่สามารถควบคุมความถี่ของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้ยากที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัตโนมัติ



ภาพที่ 2-21 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTRA

2.7.5 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTA

ภาพที่ 2-22 แสดงโครงสร้างกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ทำงานในโหมดแรงดันที่ใช้ OTA (Siripruchyanun and Wardkein, 2001) ซึ่งประกอบด้วย OTA จำนวนสามตัว ตัวต้านทานต่อลงกราวนด์สองตัวและตัวเก็บประจุต่อลงกราวนด์อีกหนึ่งตัว โดย  $I_{B1}$   $I_{B2}$  และ  $I_{B3}$  เป็นกระแสไบแอสของ OTA ตัวที่ 1 ตัวที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งขนาดแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_{out1}$ ) และสี่เหลี่ยม ( $V_{out2}$ ) หาได้จาก

$$V_{out1(p-p)} = 2I_{B2}R_2 \tag{2-64}$$

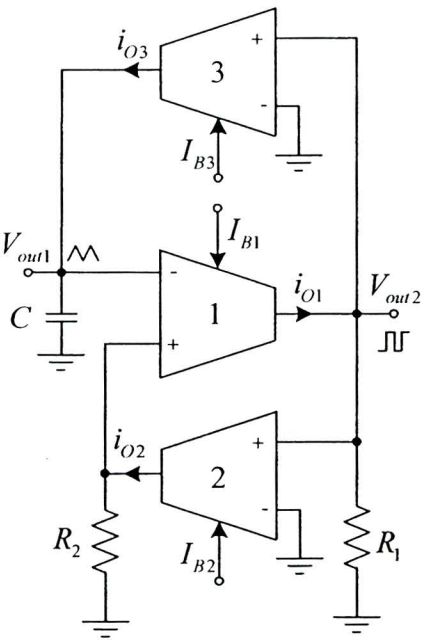
และ

$$V_{out2(p-p)} = 2I_{B1}R_1 \tag{2-65}$$

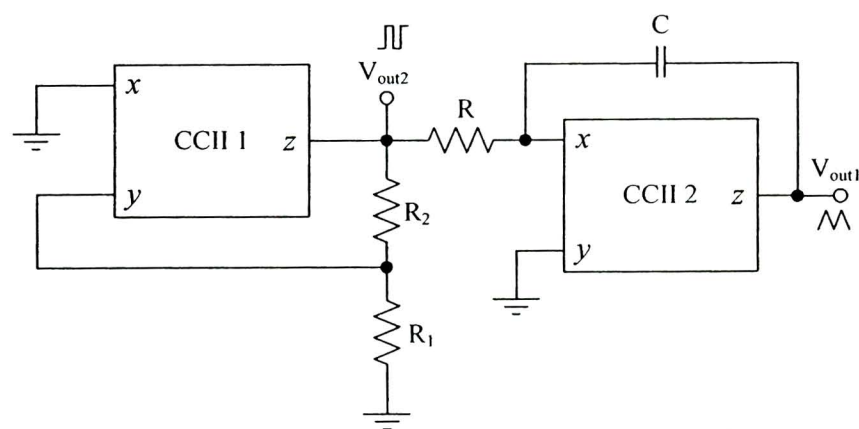
ส่วนความถี่ของวงจรหาได้ดังนี้

$$f = \frac{I_{B3}}{4R_1CI_{B2}} \tag{2-66}$$

จากสมการที่ (2-64)-(2-66) สามารถสรุปจุดเด่นของวงจรได้ดังนี้ การควบคุมความถี่และขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และเป็นอิสระจากกัน จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบอัตโนมัติได้ ยิ่งไปกว่านั้น ความถี่และขนาดสัญญาณเอาต์พุตไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ส่วนข้อด้อยของวงจรนี้คือ วงจรใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมส่งผลให้ขนาดของชิปจะมีขนาดใหญ่



ภาพที่ 2-22 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTA



ภาพที่ 2-23 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII

2.7.6 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII

จากการศึกษาวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-23 (Pal D. et. al., 2009) พบว่า โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย CCII จำนวนสองตัว ตัวด้านทานแบบลอยจำนวนสองตัว ตัวเก็บประจุแบบลอยจำนวนหนึ่งตัว และตัวด้านทานแบบลงกราวนด์อีกหนึ่งตัว ขนาดแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_{out1}$ ) และสี่เหลี่ยม ( $V_{out2}$ ) หาค่าได้ดังนี้

$$V_{out1(p-p)} = \frac{2R_2}{R_1} V_{SAT} \tag{2-67}$$

และ

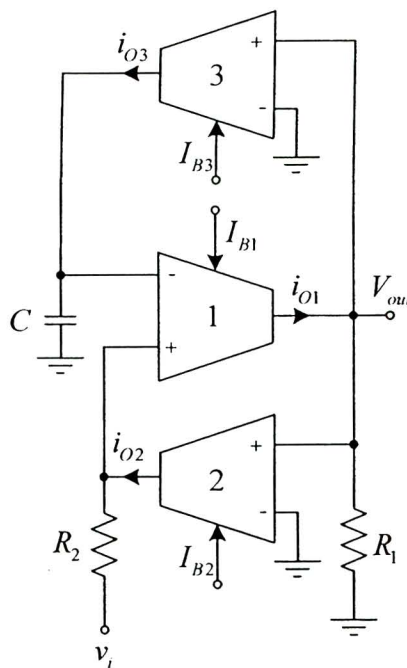
$$V_{out2(p-p)} = 2V_{SAT} \tag{2-68}$$

ส่วนความถี่ของวงจรหาได้จาก

$$f = \frac{R_1}{4\pi R R_2 C} \tag{2-69}$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2-67) ถึง (2-69) และภาพที่ 2-23 สามารถสรุปจุดเด่นของวงจรนี้คือ สามารถควบคุมขนาดของสัญญาณสามเหลี่ยมได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณสี่เหลี่ยม และขนาดสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ส่วนข้อด้อยของวงจรนี้คือ วงจรใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมส่งผลให้ขนาดของชิปจะมีขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้นขนาดของสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมไม่เป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันแหล่งจ่าย และความถี่ของวงจรยังไม่สามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัตโนมัติต้องมีการปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มวงจรเพื่อให้สามารถใช้งานได้

#### 2.7.7 วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ใช้ OTA



ภาพที่ 2-24 วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ใช้ OTA

โครงสร้างของวงจรที่แสดงในภาพที่ 2-24 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ใช้ OTA (Siripruchyanun and Wardkein, 2001) ซึ่งนำเสนอโดย Siripruchyanun M. และ Wardkein P. ในปี ค.ศ. 2001 จากภาพจะเห็นได้ว่า วงจรนี้ประกอบด้วย OTA จำนวนสามตัว ตัวต้านทานต่อ



ลงกราวนด์หนึ่งตัว ตัวต้านทานแบบลอยจำนวนหนึ่งและตัวเก็บประจุต่อลงกราวนด์อีกหนึ่งตัว ส่วนขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและความถี่สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$V_{out(p-p)} = 2I_{B1}R_1 \quad (2-70)$$

และ

$$f = \frac{I_{B3}}{4R_1CI_{B2}} \quad (2-71)$$

ค่าควิตซ์ไช้เกิดมีค่าดังนี้

$$D = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{C}{I_{B3}} \frac{d}{dt} v_i(t) \right] \times 100\% \quad (2-72)$$

จากสมการที่ (2-70)-(2-72) พบว่า วงจรนี้สามารถควบคุมขนาดของแรงดันเอาต์พุตและความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และเป็นอิสระจากกัน โดยขนาดของแรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส  $I_{B1}$  ส่วนความถี่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส  $I_{B2}$  หรือ  $I_{B3}$  ลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของวงจรนี้คือ ค่าควิตซ์ไช้เกิดจะเปลี่ยนแปลงไปตามความชันของสัญญาณขาอสาร์ส่งผลให้วงจรปราศจากเงื่อนไขเรื่องความถี่ของสัญญาณมอดูเลตที่ต้องสูงกว่าสัญญาณขาอสาร์มากๆ แต่อย่างไรก็ตามวงจรนี้ใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบลอย จึงทำให้ยากในการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ยิ่งไปกว่านั้น วงจรนี้ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมส่งผลให้ขนาดของชิปจะมีขนาดใหญ่

#### 2.7.8 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA

ในปี ค.ศ. 2002 Chung และคณะ ได้นำเสนอวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยใช้ OTA จำนวนสามตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทานแบบลงกราวนด์จำนวนสามตัว ตัวเก็บประจุแบบลอยและแบบต่อลงกราวนด์อีกอย่างละหนึ่งตัวดังแสดงในภาพที่ 2-25 (Chung et. al., 2002) เมื่อ OTA

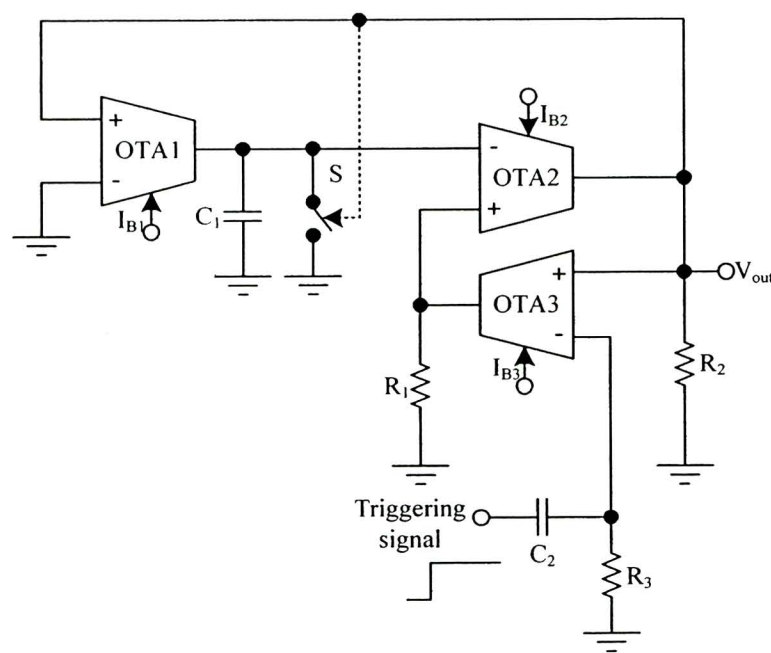
ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ ( $T$ ) หาค่าได้ดังนี้

$$V_{out(p-p)} = 2I_{B2}R_2 \tag{2-73}$$

และ

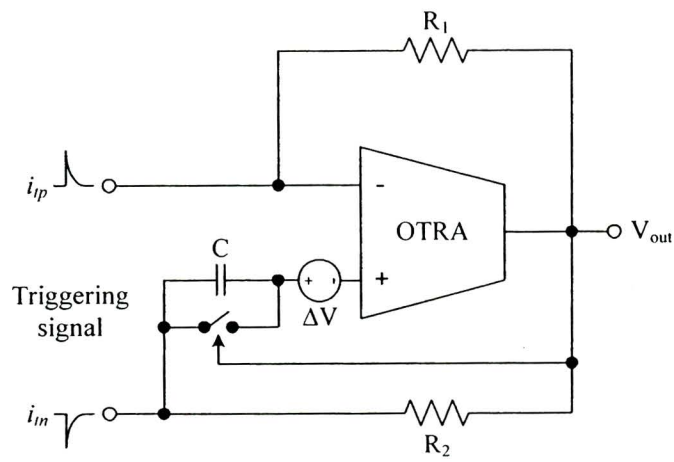
$$T = \frac{R_1C_1I_{B1}}{I_{B3}} \tag{2-74}$$

จุดเด่นของวงจรนี้คือ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและขนาดของสัญญาณพัลส์สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์และเป็นอิสระจากกัน ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นอิสระจากอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำวงจรนี้ไปพัฒนาเป็นวงจรรวมจะทำให้มีพื้นที่ชิปมีขนาดใหญ่ เนื่องจากวงจรนี้ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก



ภาพที่ 2-25 วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA

2.7.9 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTRA



ภาพที่ 2-26 วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTRA

Lo Y.-K. และ Chien H.-C. ได้นำเสนอวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยใช้ OTRA จำนวนหนึ่งตัว ต่อกับตัวต้านทานแบบลอยจำนวนสองตัว ตัวเก็บประจุแบบลอยและ แอนะล็อกสวิตช์อย่างละหนึ่งตัว ดังแสดงในภาพที่ 2-26 (Lo and Chien, 2006) อาศัยหลักการ ทำงานของ OTRA ในสภาวะอิ่มตัว ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ ( $T$ ) หาได้จาก

$$V_{out(p-p)} = 2V_{SAT} \tag{2-75}$$

และ

$$T = R_2 C_2 \ln \left[ \frac{R_1}{R_2} \left( 1 - \frac{\Delta V}{V_{SAT-}} \right) \right] \tag{2-76}$$

เมื่อ  $\Delta V$  คือ แรงดันอินพุตออฟเซต (Input offset voltage)

จุดเด่นของวงจรนี้คือ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและขนาดของสัญญาณพัลส์สามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกัน ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นอิสระจากอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำวงจรนี้ไปพัฒนาเป็นวงจรรวมจะทำให้มีพื้นที่ชิปมีขนาดใหญ่ เนื่องจากวงจรนี้ใช้อุปกรณ์พาสซีฟจำนวนมาก อีกทั้งอุปกรณ์พาสซีฟเป็นลักษณะแบบลอยจำนวนมากในการออกแบบ จึงทำให้ยากในการพัฒนาเป็นวงจรรวม

2.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CC-CDTA วงจรชนิดตรีกรเกอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และชุดการสอน โดยสรุปได้ว่า วงจรที่ได้มีผู้วิจัยมานั้น โดยส่วนใหญ่แล้วมีข้อจำกัดดังแสดงตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ข้อจำกัดของวงจรชนิดตรีกรเกอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ และวงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA CCII และ OTRA

| ชื่อ                                  | ใช้จำนวนอุปกรณ์แอคทีฟหรือพาสซีฟจำนวนมาก | ใช้อุปกรณ์พาสซีฟต่อแบบลอย | ไม่สามารถควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| วงจรชนิดตรีกรเกอร์ที่ใช้ OTA          | ใช่                                     | ไม่ใช่                    | ไม่ใช่                                   |
| วงจรชนิดตรีกรเกอร์ที่ใช้ OTRA         | ใช่                                     | ใช่                       | ใช่                                      |
| วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ CCII | ใช่                                     | ใช่                       | ใช่                                      |
| วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ OTRA | ใช่                                     | ใช่                       | ใช่                                      |

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

| ชื่อ                                                       | ใช้จำนวนอุปกรณ์<br>แอคทีฟหรือพาสซีฟ<br>จำนวนมาก | ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ<br>ต่อแบบลอย | ไม่สามารถควบคุมด้วยวิธี<br>ทางอิเล็กทรอนิกส์ |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| วงจรกำเนิดสัญญาณ<br>สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม<br>ที่ใช้ OTA  | ใช่                                             | ไม่ใช่                        | ไม่ใช่                                       |
| วงจรกำเนิดสัญญาณ<br>สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม<br>ที่ใช้ CCII | ใช่                                             | ใช่                           | ใช่                                          |
| วงจรกำเนิดสัญญาณ<br>มอดูเลตความกว้างพัลส์<br>ที่ใช้ OTA    | ใช่                                             | ไม่ใช่                        | ไม่ใช่                                       |
| วงจร โมโนสเตเบิลมัลติ<br>ไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTA              | ใช่                                             | ไม่ใช่                        | ไม่ใช่                                       |
| วงจร โมโนสเตเบิลมัลติ<br>ไวเบรเตอร์ที่ใช้ OTRA             | ใช่                                             | ใช่                           | ใช่                                          |