

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

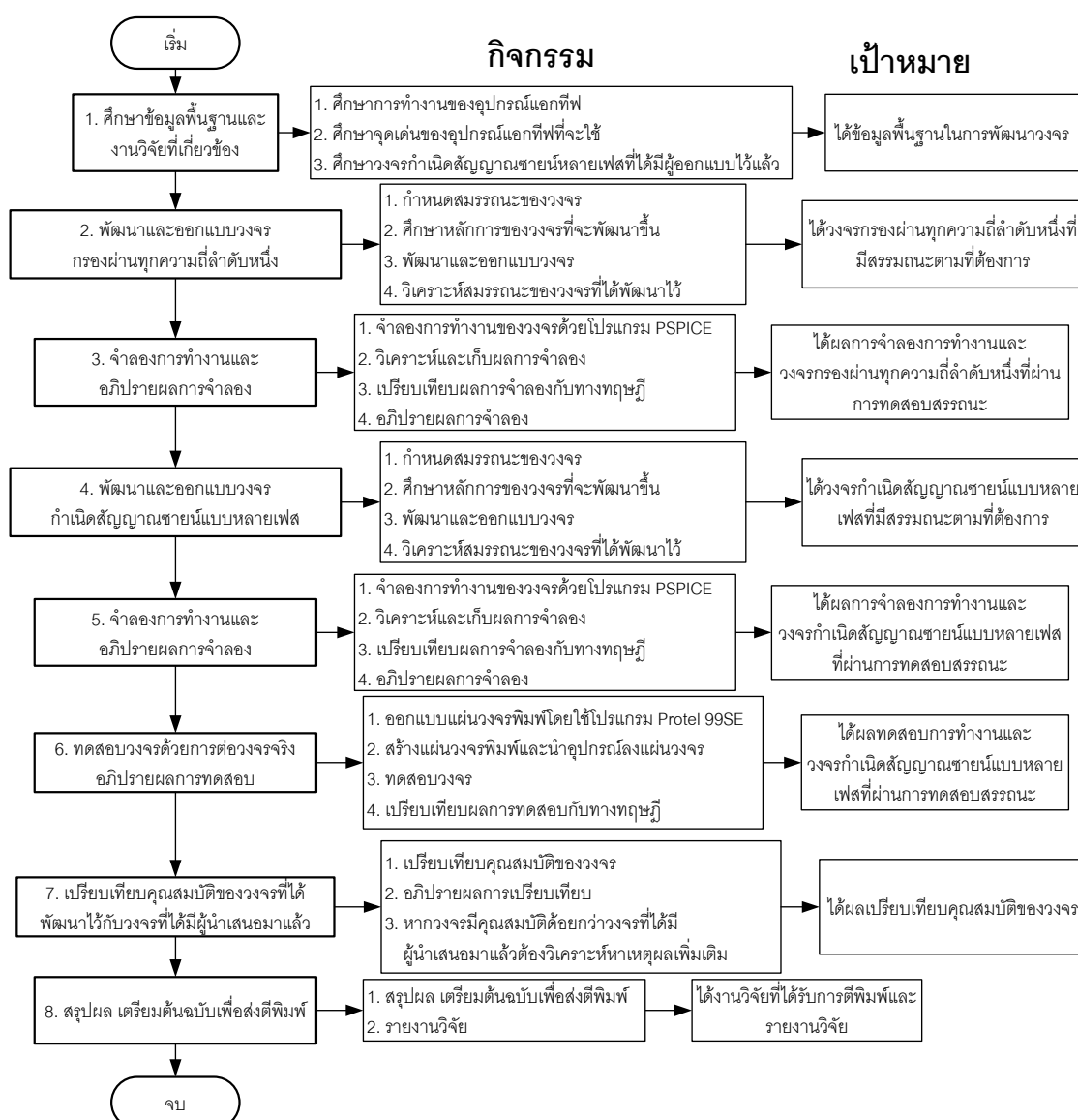
หลังจากที่ได้มีศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 แล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการ พัฒนาและออกแบบวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแส จากนั้นจึงนำวงจรนี้ไปพัฒนา เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณหลายเฟสโดยใช้ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลัก รวมถึงการวิเคราะห์หา สมรรถนะ การดำเนินงานวิจัยนี้มีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 3.1

วิธีดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.1 จะเริ่มที่ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ จะพัฒนาขึ้น ว่ามีลักษณะเด่น ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดอย่างไรบ้าง ซึ่งในส่วนนี้ได้กระทำมาแล้วใน บทที่ 2 จากนั้นจะพัฒนาและออกแบบวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งซึ่งจะเป็นวงจรพื้นฐานใน การนำไปพัฒนาเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณชายน้แบบหลายเฟส โดยเริ่มที่กำหนดขอบเขต สมรรถนะ ของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งให้ได้ตามขอบเขตที่ต้องการ แล้วทำการพัฒนาและออกแบบ วงจร เพื่อให้ได้ขอบเขตและสมรรถนะตามที่ได้กำหนดเอาไว้แล้วตรวจสอบและทดสอบวงจรที่ได้ด้วย โปรแกรมจำลอง PSpice พร้อมทั้งแก้ไขและปรับแต่งโครงสร้างของวงจร เพื่อให้ได้ขอบเขตและ สมรรถนะตามที่กำหนดไว้ และทดสอบวงจรอีกครั้ง หลังจากที่ได้วงจรกรองความถี่ลำดับหนึ่งแล้วก็จะ นำวงจรมานำมาพัฒนาเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบหลายเฟส ซึ่งจะมีขั้นตอนในการพัฒนาเหมือนกับการ พัฒนาวงจรกรองความถี่ลำดับหนึ่ง โดยส่วนที่เพิ่มมาก็จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของวงจรด้วยการ ต่อวงจรจริง แล้วจึงนำวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่พัฒนาขึ้นมาเปรียบเทียบกับวงจรอื่นๆ ที่มี นักวิจัยได้นำเสนอไว้แล้ว โดยหากวงจรที่พัฒนาขึ้นมาดูดีต่อยกว่าวงจรที่ได้มีผู้เสนอมาก็จะทำการ วิเคราะห์หาเหตุผลเพิ่มเติม ในส่วนของผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรทั้งหมดจะแสดงในบทที่ 4 และสรุปผลการวิจัยจะแสดงในบทที่ 5

3.1 การพัฒนาและออกแบบวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแส

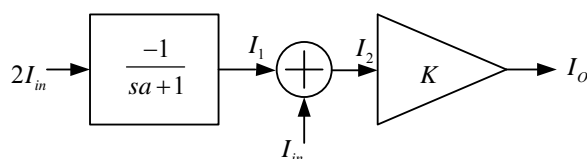
ดังที่กล่าวมาแล้วว่าวงจรถูกกำเนิดสัญญาณโหมดกระแสหลายเฟสที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทาง อิเล็กทรอนิกส์มีหลักการพื้นฐานสำคัญของวงจรถูกอยู่บนวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมด

กระแสโดยใช้ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งรายละเอียดของ CCCCTA ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาประกอบร่วมกันเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณตามหลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณหลายเฟส สำหรับรายละเอียดของการพัฒนาและออกแบบวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแสจะได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

หลักการพัฒนางจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแสที่ควบคุมอัตราขยายกระแสได้ประกอบไปด้วยวงจรพื้นฐาน 2 ส่วน ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับหนึ่ง (First-order low-pass filter) ต่อร่วมกับวงจรขยายกระแส (Current amplifier) แสดงแผนผังการทำงานในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แผนผังการพัฒนางจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแส

จากแผนผังในภาพที่ 3.2 สามารถหากระแสเอาต์พุตได้ดังนี้ เขียนสมการกระแส I_1 ได้เป็น

$$I_1 = \frac{-2I_{in}}{sa+1} \quad (3.1)$$

ส่วนกระแส I_2 แสดงได้ดังนี้

$$I_2 = I_1 + I_{in} \quad (3.2)$$

แทนสมการที่ (3.1) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$I_2 = \frac{-2I_{in}}{sa+1} + I_{in} = \left(\frac{sa-1}{sa+1} \right) I_{in} \quad (3.3)$$

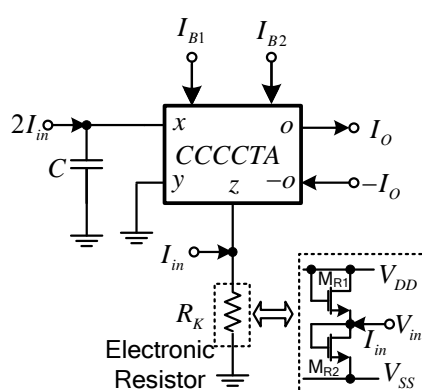
ส่วนสมการของกระแส I_o เขียนได้เป็น

$$I_o = I_2 K \quad (3.4)$$

แทนสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.4) จะได้

$$I_o = K \left(\frac{sa-1}{sa+1} \right) I_{in} \quad (3.5)$$

สำหรับวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแสที่ควบคุมอัตราขยายกระแสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะประกอบจากอุปกรณ์แอกทีฟ CCCCTA เป็นหลัก โดยอาศัยหลักการจากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.2 จะได้ว่าวงจรดังแสดงในภาพที่ 3.3 จากภาพพบว่า วงจรประกอบไปด้วย CCCCTA จำนวน 1 ตัว ตัวต้านทานแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อลงกราวนด์ (R_K) 1 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวนด์จำนวน 1 ตัว โดย I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบอัสให้กับ CCCCTA โดยความต้านทาน R_K หาได้ดังนี้



ภาพที่ 3.3 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งโหมดกระแสที่ควบคุมอัตราขยายกระแสได้

$$R_K = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{L}{2\mu C_{ox} W (V_{DD} - V_T)} \quad (3.6)$$

จะพบว่าวงจรสามารถให้เอาต์พุตได้ทั้งสองทิศทาง เมื่อพิจารณาวงจรในภาพที่ 3.3 และอาศัยคุณสมบัติของ CCCCTA ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว x ได้เป็น

$$i_x = \frac{2I_{in}}{sCR_x + 1} \quad (3.7)$$

โดยกระแสที่ขั้ว z พิจารณาได้จาก

$$i_z = i_x \quad (3.8)$$

แทนสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.8) จะได้

$$i_z = \frac{2I_{in}}{sCR_x + 1} \quad (3.9)$$

จากวงจรพบว่าแรงดัน V_z หาได้จาก

$$V_z = R_k (I_{in} - i_z) \quad (3.10)$$

แทนสมการที่ (3.9) ลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$V_z = R_k \left(\frac{sCR_x - 1}{sCR_x + 1} \right) I_{in} \quad (3.11)$$

ในขณะที่กระแส I_o เท่ากับ

$$I_O = \pm g_m V_z \quad (3.12)$$

แทนสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$\frac{I_O(s)}{I_{in}(s)} = \pm g_m R_K \left(\frac{s - \frac{1}{R_x C}}{s + \frac{1}{R_x C}} \right) \quad (3.13)$$

เมื่อ $s = j\omega$ ในสมการที่ (3.13) จะได้ขนาดของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$|T(j\omega)| = \left| \frac{I_O(s)}{I_{in}(s)} \right| = g_m R_K \quad (3.14)$$

ส่วนผลตอบสนองทางเฟสเท่ากับ

$$\angle T(j\omega)_{(-)} = \varphi(\omega)_{(-)} = -2 \tan^{-1}(2\pi f C R_x) \quad (3.15)$$

และ

$$\angle T(j\omega)_{(+)} = \varphi(\omega)_{(+)} = \pi - 2 \tan^{-1}(2\pi f C R_x) \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.15) พบว่าผลตอบสนองทางเฟสเป็น 0 องศา เมื่อความถี่ของสัญญาณมีค่าต่ำๆ และค่าการเลื่อนเฟสจะค่อยๆ ลดเพิ่มจนเข้าใกล้ 180 องศา เมื่อความถี่ของสัญญาณเข้ามามีค่ามากๆ ส่วนสมการที่ (3.16) พบว่าผลตอบสนองทางเฟสเป็น 180 องศา เมื่อความถี่ของสัญญาณมีค่าต่ำๆ และค่าการเลื่อนเฟสจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าใกล้ 0 เมื่อความถี่ของสัญญาณเข้ามามีค่ามากๆ เมื่อ $R_x = 1/\sqrt{8kI_{B1}}$ และ $g_m = \sqrt{kI_{B2}}$ จะพบว่ามุมต่างเฟสและอัตราขยายของวงจรตรงผ่านทุกความถี่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือ ปรับมุมเฟสได้ที่ I_{B1} และปรับอัตราขยายได้ที่ I_{B2}

3.2 การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในลำดับแรกนี้จะพิจารณารณกรณี CCCCTA ที่ใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & \beta & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

เมื่อ α, β และ γ เป็นค่าส่งผ่านกระแสและแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุตที่สามารถเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งสามารถเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ภายในตัว CCCCTA พิจารณาวงจรในภาพที่ 3.3 อีกครั้งโดยใช้คุณสมบัติของ CCCCTA ตามสมการที่ (3.17) สามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว x ได้เป็น

$$i_x = \frac{2I_{in}}{sCR_x + 1} \quad (3.18)$$

โดยกระแสที่ขั้ว z พิจารณาได้จาก

$$i_z = \alpha i_x \quad (3.19)$$

แทนสมการที่ (3.18) ลงในสมการที่ (3.19) จะได้

$$i_z = \frac{2\alpha I_{in}}{sCR_x + 1} \quad (3.20)$$

จากวงจรพบว่าแรงดัน V_z หาได้จาก

$$V_z = R_k (I_m - i_z) \quad (3.21)$$

แทนสมการที่ (3.20) ลงในสมการที่ (3.21) จะได้

$$V_z = R_k \left(\frac{sCR_x + 1 - 2\alpha}{sCR_x + 1} \right) I_{in} \quad (3.22)$$

ในขณะที่กระแส I_o เท่ากับ

$$I_o = \pm \beta g_m V_z \quad (3.23)$$

แทนสมการที่ (3.22) ลงในสมการที่ (3.23) จะได้

$$\frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \pm \beta g_m R_k \left[\frac{s - \left(\frac{2\alpha - 1}{R_x C} \right)}{s + \frac{1}{R_x C}} \right] \quad (3.24)$$

เมื่อ $s = j\omega$ ในสมการที่ (3.24) จะได้ขนาดของทรานส์เฟออร์ฟังก์ชันเป็น

$$|T(s)| = \left| \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} \right| = \beta g_m R_k \quad (3.25)$$

ส่วนผลตอบสนองทางเฟสเท่ากับ

$$\angle T(j\omega)_{(-)} = \varphi(\omega)_{(-)} = -2 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi f C R_x}{2\alpha - 1} \right) \quad (3.26)$$

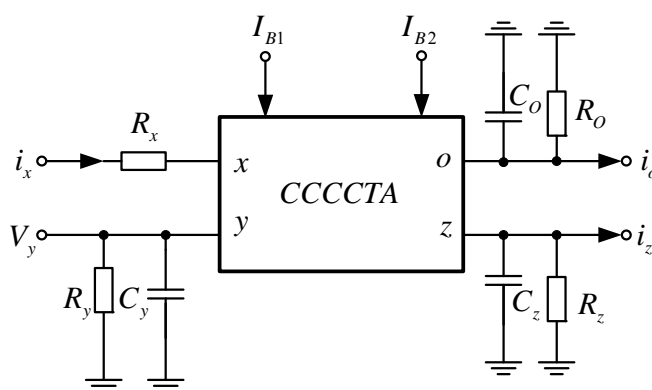
และ

$$\angle T(j\omega)_{(+)} = \varphi(\omega)_{(+)} = \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi f C R_x}{2\alpha - 1} \right) \quad (3.27)$$

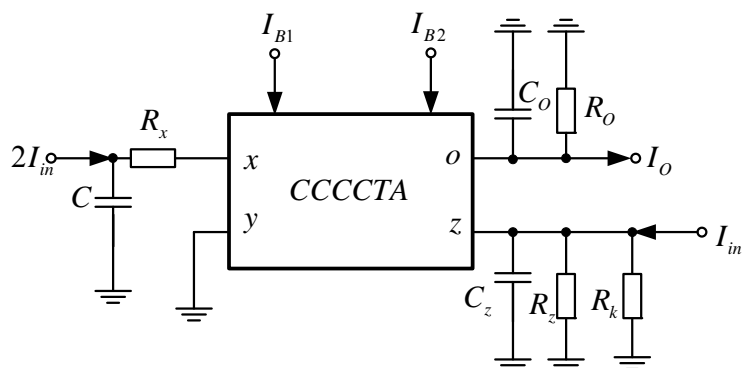
จากสมการที่ (3.25)-(3.27) พบว่าค่าในทางอุดมคติจะส่งผลทั้งมุมต่างเฟสและอัตราขยาย

นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาที่ความถี่สูงจะพบว่าค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงในตัว CCCCTA จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อดำเนินถึงค่าอุปกรณ์แฝงเหล่านั้นสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงของ CCCCTA ได้ดังภาพที่ 3.4 จากวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งในภาพที่ 3.3 เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงสามารถเขียนวงจรได้ใหม่ดังภาพที่ 3.5 เมื่อ $G_z = 1/R_z$, $G_y = 1/R_y$ และ $G_o = 1/R_o$ กำหนดให้

$$Y_1 = sC_z + G_z + G_K \quad (3.28)$$



ภาพที่ 3.4 วงจรเทียบเคียงของ CCCCTA เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง



ภาพที่ 3.5 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งเมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง

เมื่อกำหนดให้โหลดที่เอาต์พุตมีค่าต่ำมากๆ สามารถเขียนสมการกระแสที่ขั้ว z ได้เหมือนสมการที่ (3.9) ส่วนแรงดันที่ขั้ว z เขียนได้เป็น

$$V_z = \frac{1}{Y_1} \left(\frac{sCR_x - 1}{sCR_x + 1} \right) I_{in} \quad (3.29)$$

เมื่อแทนค่า Y_1 ตามสมการที่ (3.28) ลงในสมการที่ (3.29) จะได้

$$V_z = \left(\frac{1}{sC_z + G_z + G_K} \right) \left(\frac{sCR_x - 1}{sCR_x + 1} \right) I_{in} \quad (3.30)$$

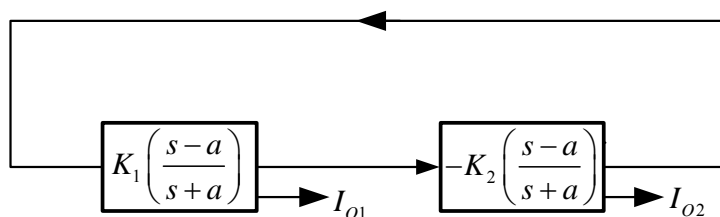
ดังนั้นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \pm \left(\frac{g_m}{sC_z + G_z + G_K} \right) \left(\frac{sCR_x - 1}{sCR_x + 1} \right) \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.31) พบว่า C_z และ R_z จะส่งผลต่อวงจรมีความถี่สูง และในย่านความถี่ใช้งานเพื่อลดผลกระทบต่อค่า C_z และ R_z ควรเลือกค่า R_K ให้มีค่าน้อยๆ

3.3 การพัฒนาและออกแบบวงจรมีกำเนิดสัญญาณชายน้แบบหลายเฟส

วงจรมีกำเนิดสัญญาณชายน้หลายเฟสที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยฉบับนี้จะพัฒนาให้สามารถกำเนิดสัญญาณได้ตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไป โดยใช้วงจรรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งเป็นวงจรถูกมาต่อคาสเคดกัน ในกรณีที่ต้องการวงจรมีชายน้ 2 เฟสสามารถออกแบบวงจรมีตามบล็อกไดอะแกรมตามภาพที่ 3.6 ซึ่งพบว่าเป็นการต่อคาสเคดกันของวงจรรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งที่สามารถควบคุมอัตราขยายกระแสได้ชนิดบวกและลบ



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างของวงจรมีกำเนิดสัญญาณชายน้ 2 เฟส

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.6 สามารถหาสมการคุณสมบัติของวงจรมีได้ดังนี้

$$s^2 (k_1 k_2 + 1) + 2s a_1 a_2 (1 - k_1 k_2) + (k_1 k_2 + 1) a_1 a_2 = 0 \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.32) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณเป็น

$$K_1 K_2 = 1 \quad (3.33)$$

ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้เป็น

$$\omega_{osc} = \sqrt{a_1 a_2} \quad (3.34)$$

จุดเด่นของวงจรกำเนิดสัญญาณในภาพที่ 3.6 คือ สามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกัน โดยปรับเงื่อนไขได้ที่อัตราขยายของวงจร (K_1 และ K_2) ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้ที่ความถี่โพล (a_1 และ a_2)

ความต่างเฟสของกระแสเอาต์พุต I_{O1} และ I_{O2} หาได้จาก

$$\frac{I_{O1}(s)}{I_{O2}(s)} = -K_2 \left(\frac{s-a}{s+a} \right) \quad (3.35)$$

จากสมการที่ (3.35) ที่ความถี่ออสซิลเลตจะได้ความต่างเฟสเป็น

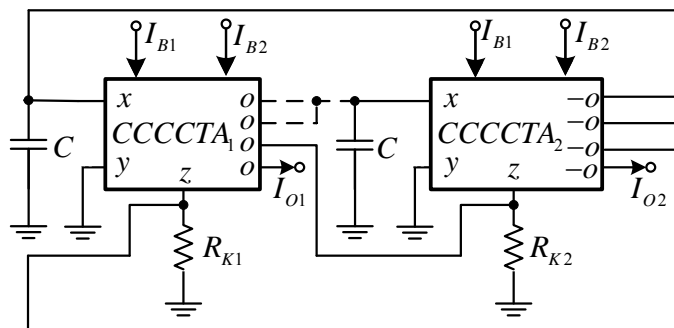
$$\angle T(\omega_{osc}) = \varphi(\omega_{osc}) = \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega_{osc}}{a} \right) \quad (3.36)$$

จากสมการที่ (3.34) เมื่อ $a_1 = a_2 = a$ จะได้ $\omega_{osc} = a$ ดังนั้นที่ความถี่ออสซิลเลตจะได้ความต่างเฟสเป็น

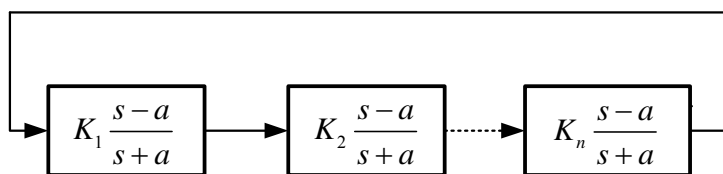
$$\varphi(\omega_{osc}) = 90^\circ \quad (3.37)$$

สมการที่ (3.37) ซึ่งให้เห็นว่าที่ความถี่ออสซิลเลตความต่างเฟสของสัญญาณ I_{O1} และ I_{O2} เท่ากับ 90 องศา จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.6 จะได้โครงสร้างวงจรถัดภาพที่ 3.7

การพัฒนาระบบกำเนิดสัญญาณชายนี้นั้นที่มากกว่า 2 เฟส เน้นที่จะใช้วงจรกรองผ่านทุกความถี่ลำดับหนึ่งชนิดเดียวกัน เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ การนำไปสร้างเป็นวงจรรวมและเพื่อให้แต่ละสัญญาณเอาต์พุตมีความต่างเฟสเท่ากัน โดยสามารถสร้างได้จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.8 โดยหากต้องการสัญญาณ n เฟส ก็ต้องใช้วงจรกรองผ่านความถี่ลำดับหนึ่งในภาพที่ 3.3 จำนวน n ชุด โดยไม่ต้องต่อวงจรขยายกระแสเพิ่มเติม ซึ่งจำนวนเฟสของสัญญาณเอาต์พุตต้องมีค่าตั้งแต่ 3 เฟสขึ้นไป



ภาพที่ 3.7 วงจรกำเนิดสัญญาณชายน์ 2 เฟส



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของวงจรถ่ายสัญญาณชายน์ n เฟส

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.8 จะได้ อัตราขยายลูปเปิดของระบบ (System loop gain) เป็น

$$L(s) = K_1 K_2 \dots K_n \left(\frac{s-a}{s+a} \right)^n \quad (3.38)$$

จากเงื่อนไขของบาร์คัสเซินที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ $\omega_{osc} = 2\pi f_{osc}$ จะได้ว่า

$$L(j\omega_{osc}) = \left(K \frac{j\omega_{osc} - a}{j\omega_{osc} + a} \right)^n = 1 \quad (3.39)$$

เมื่อ $K_1 = K_2 = \dots K_n = K$ จะได้ขนาดอัตราขยายลูปเปิดของระบบเป็น

$$|L(j\omega_{osc})| = 1 \quad (3.40)$$

หรือกล่าวได้ว่าเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณกำหนดได้จาก

$$K = 1 \quad (3.41)$$

ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณจะพิจารณาได้จากผลตอบสนองทางเฟสของสมการที่ (3.38) ดังนี้

$$\angle L(j\omega_{osc}) = n\pi - 2n \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{osc}}{a}\right) \quad (3.42)$$

โดยผลตอบสนองทางเฟสในสมการที่ (3.42) เท่ากับ 2π ดังนั้นจะได้

$$2\pi = n\pi - 2n \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{osc}}{a}\right) \quad (3.43)$$

จากสมการที่ (3.43) จะได้

$$\omega_{osc} = a \tan\left[\left(\frac{n-2}{2n}\right)\pi\right] \quad (3.44)$$

จากสมการที่ (3.41) และ (3.44) พบว่าสามารถปรับเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกัน โดยปรับเงื่อนไขที่ K ส่วนความถี่ในการกำเนิดสัญญาณปรับที่ a

ส่วนความต่างเฟสของสัญญาณแต่ละตัวพิจารณาได้จากผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองผ่านทุกความถี่แต่ละชุด เมื่อ $\omega_{osc} = a \tan\left[\left(\frac{n-2}{2n}\right)\pi\right]$ จะได้

$$\angle L(j\omega_{osc}) = \pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{a}{a} \tan \left[\left(\frac{n-2}{2n} \right) \pi \right] \right) \quad (3.45)$$

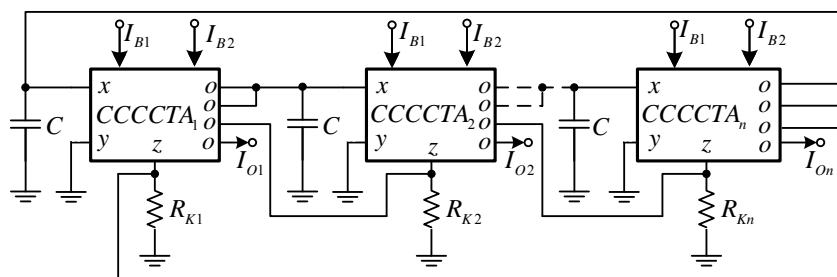
จะได้ความต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตแต่ละเฟสเป็น

$$\angle L(j\omega_{osc}) = \varphi(\omega_{osc}) = \frac{2\pi}{n} \quad (3.46)$$

จากสมการที่ (4.41), (4.44) และ (4.46) ในกรณีที่ n มีค่าต่างๆ สามารถสรุปคุณสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบหลายเฟสได้ดังตารางที่ 3.1 เมื่อนำเอาวงจรกรองผ่านทุกความถี่ในภาพที่ 3.3 มาต่อตามบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.8 จะได้วงจรกำเนิดสัญญาณหลายเฟสดังภาพที่ 3.9

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบหลายเฟสจากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.8

จำนวนเฟส	เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ	ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ	ความต่างเฟสของสัญญาณข้างเคียง
3	K=1	$\omega_{osc} = 0.577a$	120°
4	K=1	$\omega_{osc} = a$	90°
5	K=1	$\omega_{osc} = 1.376a$	72°
:	:	:	:
:	:	:	:
n	K=1	$\omega_{osc} = a \tan \left[\left(\frac{n-2}{2n} \right) \pi \right]$	$\frac{2\pi}{n}$



ภาพที่ 3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณชายนี้นเฟส

เมื่อทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองผ่านทุกความถี่เป็น $\frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = g_m R_K \left(\frac{s - \frac{1}{R_x C}}{s + \frac{1}{R_x C}} \right)$ จะได้เงื่อนไขและ

ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณดังนี้

$$OC: \quad g_m R_K = 1 \quad (3.47)$$

และ

$$OF: \quad \omega_{osc} = \frac{1}{R_x C} \tan^{-1} \left[\left(\frac{n-2}{2n} \right) \pi \right] \quad (3.48)$$

เมื่อ $R_x = \sqrt{\frac{1}{k_R I_{B1}}}$ และ $g_m = \sqrt{k_g I_{B2}}$ จะได้ความถี่และค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณใหม่เป็น

$$OC: \quad R_K \sqrt{k_g I_{B2}} = 1 \quad (3.49)$$

และ

$$OF: \quad \omega_{osc} = \frac{\sqrt{k_R I_{B1}}}{C} \tan^{-1} \left[\left(\frac{n-2}{2n} \right) \pi \right] \quad (3.50)$$

จากสมการที่ (3.50) พบว่าสามารถควบคุมความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกันด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

3.4 การเปรียบเทียบสมบัติของวงจรถักับวงจรรอื่น

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติของวงจรถักกำเนิดสัญญาณชายนแบบหลายเฟสโหมดกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นกับวงจรรอื่นที่ได้นักวิจัยได้นำเสนอไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของการเปรียบเทียบสมบัติของวงจรถักับวงจรรอื่นกับวงจรรอื่น

Ref	Design technique	Active element	No. of active element per phase	Additional amplifier	Grounded C only	No. of R+C per phase	Electronic control	CM output
[7]	Lossy integrator	CCCII	1	No	Yes	0+2	Yes	Yes
[8]	Lossy integrator	CCCII	1	Yes	Yes	1+1	Yes	Yes
[9]	Lossy integrator	CDTA	1	Yes	Yes	0+1	Yes	Yes
[10]	Allpass filter	CDTA	2	Yes	No	0+1	Yes	Yes
[11]	Allpass filter	CDTA	1	No	No	2+1	Yes	Yes
[12]	Allpass filter	Opamp	1	Yes	Yes	3+1	No	No
[13]	Lossy integrator	Opamp	1	No	No	2+1	No	No
[14]	Lossy integrator	OTA	1 (Fig. 2a)	No	Yes	1+1	Yes	No
		OTA & Buffer	1 OTA, 1 Buffer (Fig. 2b)	No	Yes	2+1	Yes	No
		OTA	2 (Fig. 3a)	No	Yes	0+1	Yes	No
		OTA & Buffer	1 OTA, 1 Buffer (Fig. 3b)	No	No	0+3	Yes	No
[15]	Lossy integrator	OTA	1	Yes	Yes	0+1	Yes	No
[16]	Lossy integrator	CFOA	1	No	*	2+0	No	No

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Ref	Design technique	Active element	No. of active element per phase	Additional amplifier	Grounded C only	No. of R+C per phase	Electronic control	CM output
[17]	Lossy integrator	CCII	1	No	Yes	2+1	No	No
[18]	Lossy integrator	OTA & Buffer	1 OTA, 1 Buffer	No	Yes	2+1	No	No
[19]	Lossy integrator	CCII	1	No	*	3+0	No	No
[20]	Lossy integrator	CCII	1	Yes	Yes	2+1	No	No
[21]	Lossy integrator	CDBA	1	Yes	Yes	2+1	No	No
Proposed MSOs	Allpass filter	CCCCTA	1	No	Yes	1+1	Yes	Yes

หมายเหตุ * ไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุภายนอก

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาและออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณชายนแบบหลายเฟสที่สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ CCCCTA ร่วมกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ต่อลงกราวนด์ โดยวงจรกำเนิดสัญญาณชายนแบบหลายเฟสที่จะสังเคราะห์และออกแบบมีจุดเด่นดังนี้

- สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานในระบบที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวนด์จึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

- สามารถควบคุมเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกันด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์
- ความต้านทานที่เอาต์พุตมีค่าสูงจึงง่ายต่อการต่อคาบเคสหรือขับโหลดได้โดยตรง
- ต้องการ CCCTA เป็นอุปกรณ์แยกทีฟเพียง 1 ตัวต่อสัญญาณหนึ่งเฟสโดยปราศจากวงจรขยายกระแสเพิ่มเติม

สำหรับผลการทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบหลายเฟสจะกล่าวถึงเป็นลำดับต่อไปในบทที่ 4