

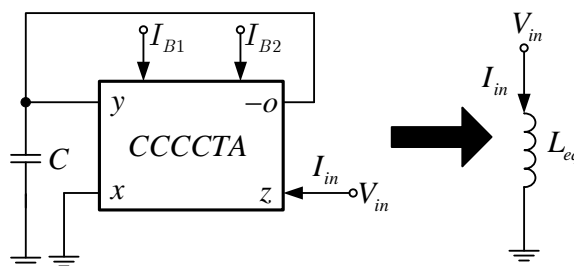
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ได้มีศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 แล้ว ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบอุปกรณ์โดยใช้ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลัก รวมถึงเหตุผลและแนวคิดในการพัฒนาการออกแบบตามลำดับ เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูงขึ้นอีกด้วย

#### 3.1 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ

เพื่อให้วงจรที่ได้ออกแบบขึ้นมีจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้น้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ต่ำลง และใช้เพียงอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวด์ โดยจะทำให้ชิปไอซีมีขนาดเล็กลง เมื่อได้รับการพัฒนาไปผลิตเป็นวงจรรวม อีกทั้งวงจรที่ออกแบบต้องควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อจะได้ง่ายต่อการนำไปใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ จากแนวคิดขั้นต้นดังกล่าวนี้ จึงได้ออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำแบบต่อลงกราวด์ดังแสดงดังภาพที่ 3.1 โดยวงจรประกอบไปด้วย CCCCTA จำนวน 1 ตัว ร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว

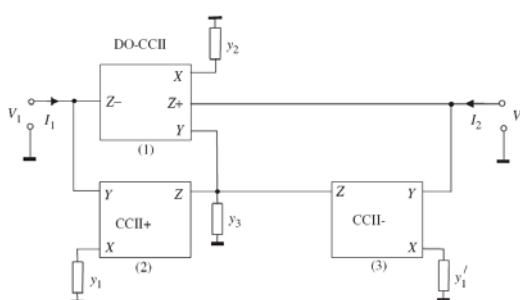


ภาพที่ 3.1 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำที่ต่อลงกราวด์

จากวงจรในภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์วงจรโดยใช้ลักษณะสมบัติของ CCCCTA ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากวงจรจะได้

### 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)

$$I_m = -I_z \quad (3.1)$$

ส่วนแรงดันที่ขั้ว Y เขียนได้เป็น

$$V_y = \frac{I_o}{sC} \quad (3.2)$$

จากคุณสมบัติของ CCCCTA จะพบว่า

$$I_o = -g_m V_z = -g_m V_m \quad (3.3)$$

แทนสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$V_y = -\frac{g_m}{sC} V_m \quad (3.4)$$

ส่วนกระแส  $I_z$  ของ CCCCTA สามารถเขียนได้เป็น

$$I_z = I_x = \frac{V_y}{R_x} \quad (3.5)$$

แทนสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$I_m = -\frac{V_y}{R_x} \quad (3.6)$$

แทนสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.6) จะได้

$$I_{in} = \frac{g_m}{sCR_x} V_{in} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = s \frac{CR_x}{g_m} \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่า  $R_x = V_T / 2I_{B1}$  และ  $g_m = I_{B2} / 2V_T$  จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = s \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} \quad (3.9)$$

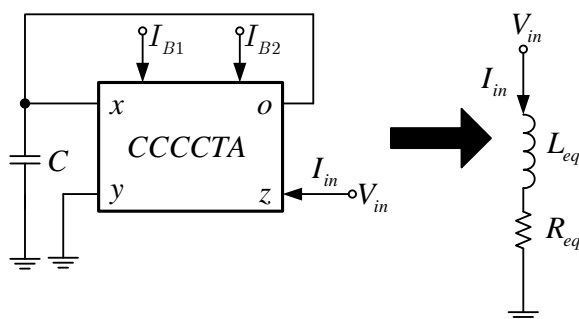
จากสมการที่ (3.9) พบว่าค่าความเหนี่ยวนำเสมือน (Equivalent inductance value :  $L_{eq}$ ) สามารถหาได้จาก

$$L_{eq} = \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าความเหนี่ยวนำสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  นอกจากนี้ยังพบอีกว่าวงจรมีสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติซึ่งสามารถนำวงจรไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิได้ อีกทั้งยังพบอีกว่าวงจรถูกนำเสนอในภาพที่ 3.1 ใช้เพียงตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์โดยไม่มีตัวต้านทานในวงจรและไม่ต้องการความสมพงษ์ (Matching) กันของอุปกรณ์ จึงทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

### 3.2 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทาน

วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์ดังแสดงดังภาพที่ 3.2 ประกอบไปด้วย CCCCTA จำนวน 1 ตัว ร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว



ภาพที่ 3.2 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานแบบต่อลงกราวนด์

จากวงจรในภาพที่ 3.2 เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์วงจรโดยใช้ลักษณะสมบัติของ CCCCTA ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากวงจรจะได้

$$I_m = I_z \quad (3.11)$$

ส่วนกระแสที่ขั้ว X เขียนได้เป็น

$$I_x = \frac{1}{\frac{1}{sC} + R_x} I_o = \frac{1}{sCR_x + 1} I_o \quad (3.12)$$

จากคุณสมบัติของ CCCCTA จะพบว่า

$$I_o = g_m V_z = g_m V_{in} \quad (3.13)$$

แทนสมการที่ (3.13) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$I_x = \frac{g_m}{sCR_x + 1} V_{in} \quad (3.14)$$

จากคุณสมบัติของ CCCCTA กระแส  $I_x = I_z$  ดังนั้นแทนสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้

$$I_{in} = \frac{g_m}{sCR_x + 1} V_{in} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.15) จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = sL_{eq} + R_{eq} = s \frac{CR_x}{g_m} + \frac{1}{g_m} \quad (3.16)$$

เมื่อแทนค่า  $R_x = V_T / 2I_{B1}$  และ  $g_m = I_{B2} / 2V_T$  จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = s \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} + \frac{2V_T}{I_{B2}} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.17) พบว่าค่าความเหนี่ยวนำเสมือน ( $L_{eq}$ ) และค่าความต้านทานเสมือน ( $R_{eq}$ ) สามารถหาได้จาก

$$L_{eq} = \frac{CV_T^2}{I_{B1}I_{B2}} \quad (3.18)$$

และ

$$R_{eq} = \frac{2V_T}{I_{B2}} \quad (3.19)$$

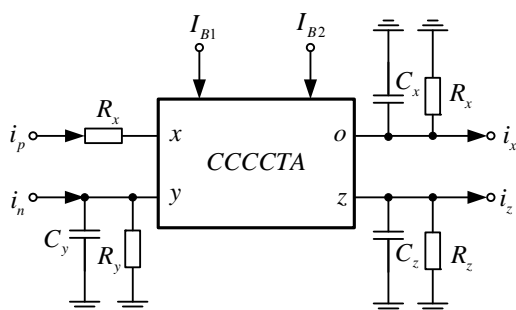
จากสมการที่ (3.19) เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  นอกจากนี้ยังพบอีกว่าวงจรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติซึ่งสามารถนำวงจรไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิได้ อีกทั้งยังพบอีกว่าวงจรที่นำเสนอในภาพที่ 3.2 ใช้เพียงตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์โดยไม่มีตัวต้านทานในวงจรและไม่ต้องการความสมพงษ์ (Matching) กันของอุปกรณ์ จึงทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

### 3.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ CCCCTA ที่ใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & \beta & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm \gamma g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $\alpha, \beta$  และ  $\gamma$  เป็นค่าส่งผ่านกระแสและแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุตที่สามารถเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งสามารถเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ภายในตัว CCCCTA นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาที่ความถี่สูงจะพบว่าค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงในตัว CCCCTA จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรเลียนแบบอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อคำนึงถึงค่าอุปกรณ์แฝงเหล่านั้นสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงของ CCCCTA ได้ดังภาพที่ 3.3



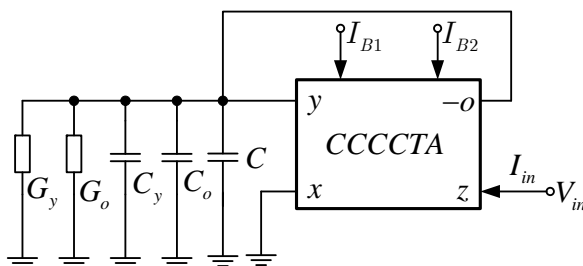
ภาพที่ 3.3 วงจรเทียบเคียงของ CCCCTA เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง

จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงสามารถเขียนวงจรได้ใหม่ดังภาพที่ 3.4 เมื่อ  $G_o = 1/R_o$  และ  $G_y = 1/R_y$  เมื่อคำนึงถึงกรณีไม่เป็นอุดมคติจะได้

$$I_m = -I_z \quad (3.21)$$

ส่วนแรงดันที่ขั้ว Y เขียนได้เป็น

$$V_y = \frac{I_o}{s(C + C_o + C_y) + G_o + G_y} \quad (3.22)$$



ภาพที่ 3.4 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำในภาพที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง

จากคุณสมบัติของ CCCCTA ในทางอุดมคติ จะพบว่า

$$I_o = -\gamma g_m V_z = -\gamma g_m V_{in} \quad (3.23)$$

แทนสมการที่ (3.23) ลงในสมการที่ (3.22) จะได้

$$V_y = -\frac{\gamma g_m}{s(C + C_o + C_y) + G_o + G_y} V_{in} \quad (3.34)$$

ส่วนกระแส  $I_z$  ของ CCCCTA ในทางไม่เป็นอุดมคติ สามารถเขียนได้เป็น

$$I_z = \alpha I_x = \frac{\alpha \beta}{R_x} V_y \quad (3.25)$$

แทนสมการที่ (3.25) ลงในสมการที่ (3.21) จะได้



$$I_m = -\frac{\alpha\beta}{R_x}V_y \quad (3.26)$$

แทนสมการที่ (3.24) ลงในสมการที่ (3.26) จะได้

$$I_m = \frac{\alpha\beta\gamma g_m}{[s(C+C_o+C_y)+G_o+G_y]R_x}V_{in} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.27) จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_m} = s \frac{(C+C_o+C_y)R_x}{\alpha\beta\gamma g_m} + R_x(G_o+G_y) \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) จะพบว่าพจน์หลังสุดจะก่อให้เกิดความต้านทานอนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดผลกระทบของพจน์หลังสุดทำได้โดยออกแบบโครงสร้างภายในของ CCCCTA โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสที่มีสรีรณะสูงซึ่งจะทำให้  $G_o \cong G_y \cong 0$  ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำเสมือนของวงจรในภาพที่ 3.1 จะเปลี่ยนเป็น

$$L_{eq} = \frac{(C+C_o+C_y)R_x}{\alpha\beta\gamma g_m} \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) จะพบว่าความความเหนี่ยวนำจะมีการเบี่ยงเบนไปตามพารามิเตอร์ภายในของ CCCCTA ในทางปฏิบัติ นั้น พารามิเตอร์  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  ค่าความจุและความต้านทานแฝงในตัว CCCCTA จะมีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อความถี่และอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากพารามิเตอร์เหล่านี้ ควรที่จะออกแบบ CCCCTA ให้มีค่าใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด

จากวงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานในภาพที่ 3.2 เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงสามารถเขียนวงจรได้ใหม่ดังภาพที่ 3.5 เมื่อ  $G_o = 1/R_o$  และ  $G_y = 1/R_y$  เมื่อค่านึงถึงกรณีไม่เป็นอุดมคติจะได้

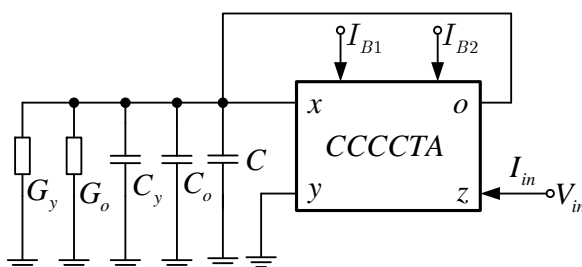
$$I_{in} = I_z \quad (3.30)$$

ส่วนกระแสที่เข้า X เขียนได้เป็น

$$I_x = \frac{\frac{1}{s(C+C_o+C_y)+G_o+G_y}}{\frac{1}{s(C+C_o+C_y)+G_o+G_y} + R_x} I_o = \frac{I_o}{s[(C+C_o+C_y)+G_o+G_y]R_x+1} \quad (3.31)$$

จากคุณสมบัติของ CCCCTA ในกรณีไม่เป็นอุดมคติ จะพบว่า

$$I_o = \gamma g_m V_z = \gamma g_m V_{in} \quad (3.32)$$



ภาพที่ 3.5 วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานในภาพที่ 3.2 เมื่อพิจารณาที่ความถี่สูง

แทนสมการที่ (3.32) ลงในสมการที่ (3.31) จะได้

$$I_x = \frac{\gamma g_m}{[s(C+C_o+C_y)+G_o+G_y]R_x+1} V_{in} \quad (3.33)$$

จากคุณสมบัติของ CCCCTA ในกรณีไม่เป็นอุดมคติ จะได้  $I_z = \alpha_x I_x$  และแทนสมการที่ (3.33) ลงในสมการที่ (3.30) จะได้

$$I_{in} = \frac{\alpha \gamma g_m}{[s(C + C_o + C_y) + G_o + G_y]R_x + 1} V_{in} \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.34) จะได้อิมพีแดนซ์อินพุตเป็น

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = sL_{eq} + R_{eq} = s \frac{(C + C_o + C_y)R_x}{\alpha \gamma g_m} + \frac{(G_o + G_y)R_x + 1}{\alpha \gamma g_m} \quad (3.35)$$

จากสมการที่ (3.35) พบว่าค่าความเหนี่ยวนำเสมือน ( $L_{eq}$ ) และค่าความต้านทานเสมือน ( $R_{eq}$ ) สามารถหาได้จาก

$$L_{eq} = \frac{(C + C_o + C_y)R_x}{\alpha \gamma g_m} \quad (3.36)$$

และ

$$R_{eq} = \frac{(G_o + G_y)R_x + 1}{\alpha \gamma g_m} \quad (3.37)$$

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสังเคราะห์และออกแบบวงจรเลียนแบบอุปกรณ์ จะพบได้ว่าวงจรที่ออกแบบมีจุดเด่นดังนี้

- สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์
- ไม่ต้องการความสมพ้องกันของอุปกรณ์
- ใช้อุปกรณ์แอกทีฟและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวนด์อย่างละหนึ่งตัวจึงเหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม