

วงจรรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่ปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

Electronically Adjustable Zero and Span Circuits

แสงระวี บัวแก้ว¹ และ วิภาวัลย์ นาคทรัพย์²

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม²

E-mail: wipavan.nar@siam.edu²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน สร้างขึ้นจากวงจร CDTA (Current Differencing Transconductance Amplifier) แบบหลายเอาต์พุตทำงานร่วมกับตัวต้านทาน วงจรที่นำเสนอสามารถปรับอัตราความชัน และตำแหน่งศูนย์ได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร โดยใช้หลักการป้อนกลับแบบลบจึงทำให้วงจรสามารถลดผลกระทบของอุณหภูมิ และ มีความเป็นเชิงเส้นในการทำงานที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ไม่มีการป้อนกลับ ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ได้แสดงให้เห็นว่าวงจรถูกนำเสนอสามารถทำงานได้สอดคล้องตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้เป็นอย่างดี

Abstract

Simple zero and span circuits with electronically adjustable ability are presented in this paper. The proposed circuits employ CDTA (current differencing transconductance amplifier) with multiple outputs and two resistors. The slope

and the zero point of the output responses can be adjusted by the bias current of the CDTA. By using negative feedback in the proposed circuits, temperature effect can be reduced and linear range of the proposed circuits increase when compare with the same category circuit without negative feedback. Simulation results are done by PSPICE show that the proposed circuits work corresponds to the theoretical analysis.

1. บทนำ

ในงานทางด้านเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและระบบควบคุมการวัด วงจรรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมากและขาดเสียมิได้ มีอยู่ประจำในระบบวัดอุณหภูมิ การวัดความเค้นความเครียด งานทางด้านการวัดความชื้น วัดความดัน เป็นต้น วงจรรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ใช้เป็นวงจรรับแต่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ให้เป็นสัญญาณที่มีระดับที่เหมาะสมสอดคล้องสำหรับการนำไปใช้กับวงจรในภาคส่วนต่อไป โดยจะทำการปรับแต่งค่าความชัน (Slope) และปรับแต่งตำแหน่งศูนย์ (Zero

Position) ของสัญญาณเอาต์พุตให้สอดคล้องกับสัญญาณอินพุต วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์แบบดั้งเดิม[1] สร้างขึ้นจากวงจรรวมสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณซึ่งทั้งสองนั้นใช้ออปแอมป์จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์แยกที่พในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าการปรับค่าความชันและปรับค่าตำแหน่งศูนย์ของวงจรที่สร้างจากออปแอมป์ดังกล่าวนี้ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และในปัจจุบันนี้การวิจัยและพัฒนาวงจรที่สามารถปรับแต่งได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์นั้นเป็นที่นิยมในการคิดและพัฒนาเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่มีการเผยแพร่ วงจรชนิดต่างๆ ที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง [3] - [4]

วง จ ร CDTA (Current Differencing Transconductance Amplifier) เป็นวงจรรอนาลอกเอนกประสงค์ ชนิดหนึ่งที่มีการคิดและวิจัยขึ้นมาเมื่อไม่นาน [5] วงจร CDTA สามารถใช้เป็นองค์ประกอบย่อยในการสังเคราะห์เป็นวงจรประมวลผลสัญญาณชนิดต่างๆ ได้เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น โดยการใช้วงจร CDTA เป็นอุปกรณ์แยกที่พหลักนั้นก็ทำให้วงจรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร CDTA นั้นเอง และจากการศึกษาวิจัยพบว่า วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์นั้นที่สร้างจาก วงจร CDTA นั้น ยังได้รับการวิจัยและพัฒนาไม่กว้างขวางมากนัก

บทความนี้แนะนำเสนอ วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่สามารถปรับค่าความชัน และตำแหน่ง

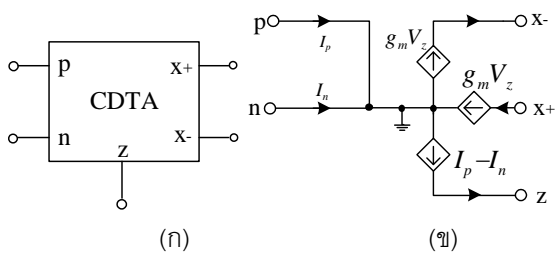
ศูนย์ ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการใช้ประโยชน์จากวงจร CDTA แบบหลายเอาต์พุต จึงทำให้วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้จึงมีข้อดีคือมีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่สลับซับซ้อน อีกทั้งสามารถปรับค่าความชัน และตำแหน่งศูนย์ได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร CDTA นอกจากนี้ วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้ได้สร้างขึ้นโดยให้มีการป้อนกลับแบบลบของสัญญาณเอาต์พุตกลับมายังอินพุต จึงทำให้วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอสามารถลดผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการดริฟ (drift) เมื่อวงจรทำงานที่สภาวะที่อุณหภูมิที่ต่างๆ กัน และมีผลตอบสนองของเอาต์พุตที่มีความเป็นเชิงเส้นที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ไม่มีการป้อนกลับแบบลบ ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ได้แสดงให้เห็นว่า วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอสามารถทำงานได้สอดคล้องตามการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้เป็นอย่างดี

2. ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้สร้างขึ้นจากวงจร CDTA เป็นองค์ประกอบหลัก วงจรมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันที่พอร์ตต่างๆ เป็นไปตามสมการ (1)

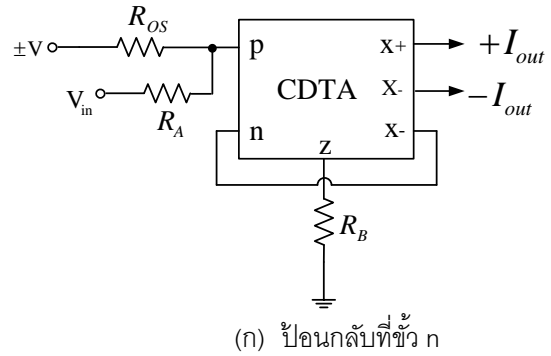
$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_z \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ I_p, I_n, I_z, I_x และ V_p, V_n, V_z, V_x คือกระแสและแรงดันของแต่ละขั้วของวงจรตามลำดับ และกำหนดให้ g_m คือค่าทรานคอนดักแตนซ์ของวงจร มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $I_o/2V_T$ เครื่องหมาย \pm แสดงถึงทิศทางไหลของกระแสที่ขั้ว X ในกรณีไหลออกจะมีเครื่องหมายเป็นบวก และถ้าไหลเข้าจะมีเครื่องหมายเป็นลบ

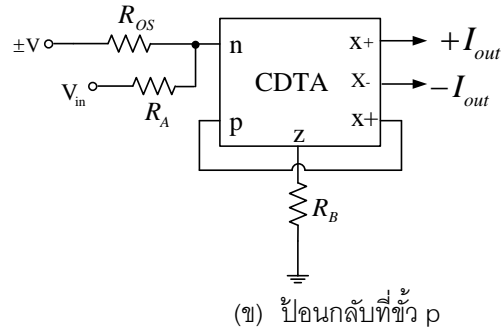


รูปที่ 1 วงจร CDTA แบบหลายเอาต์พุต
(ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

สัญลักษณ์และวงจรสมมูลของวงจร CDTA แบบหลายเอาต์พุต แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) และรูปที่ 1 (ข) วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้สร้างขึ้นได้โดย นำวงจร CDTA แบบหลายเอาต์พุต มาต่อประกอบร่วมกับตัวตัวต้านทาน และทำการป้อนกลับแบบลบของสัญญาณเอาต์พุต มายังอินพุต มี 2 รูปแบบคือ เมื่อนำวงจร CDTA มาต่อประกอบร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวนด์ และทำการป้อนกลับจากขั้ว X- ไปยังขั้ว n ดังแผนภาพของวงจรในรูปที่ 2(ก) ส่วนรูปแบบที่ 2 ป้อนกลับจากขั้ว X+ ไปยังขั้ว p ดังแผนภาพของวงจรในรูปที่ 2(ข) ก็จะได้เป็นวงจร ก็จะได้เป็นวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ที่มีสามารถรับสัญญาณอินพุตเป็นแรงดัน และให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแส



(ก) ป้อนกลับที่ขั้ว n



(ข) ป้อนกลับที่ขั้ว p

รูปที่ 2 แสดงวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและกระแสเอาต์พุต $+I_{out}$ มีค่าเป็น

$$+I_{out} = \frac{g_m R_B}{R_A(1+g_m R_B)} V_{in} + \frac{g_m R_B}{R_{OS}(1+g_m R_B)} (\pm)V \quad (2)$$

และในทำนองเดียวกัน กระแสเอาต์พุต $-I_{out}$ มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} -I_{OUT} &= -1. (+I_{out}) \\ &= -\left(\frac{g_m R_B}{R_A(1+g_m R_B)} V_{in} + \frac{g_m R_B}{R_{OS}(1+g_m R_B)} (\pm)V\right) \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) จะเห็นว่า กระแสเอาต์พุตสัมพันธ์กับแรงดันอินพุตอยู่ในรูปแบบของ

สมการเส้นตรงทั่วไป ดังนั้นค่าความชันของสมการ (2) และสมการ (3) จึงมีค่าเป็น

$$|m| = \frac{g_m R_B}{R_A(1+g_m R_B)} \quad (4)$$

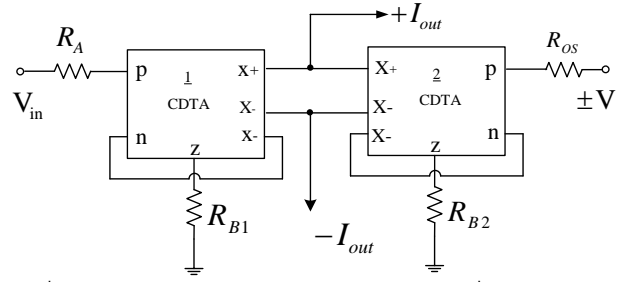
และจุดตัดแกน y ของสมการ (2) และ (3) จึงมีค่าเป็น

$$|b| = \frac{g_m R_B}{R_{OS}(1+g_m R_B)} (\pm)V \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5) พบว่า ค่าความชันและจุดตัดแกน y ของวงจรมีพจน์ของ g_m รวมอยู่ด้วย ดังนั้นวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้ จึงสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร สำหรับวงจรถูกนำเสนอในรูปที่ 3 นั้น เป็นวงจรถูกนำเสนอที่สามารถทำการปรับค่าความชันได้อย่างอิสระไม่มีผลกระทบต่อการทำงานตำแหน่งศูนย์ ซึ่งกระแสเอาต์พุตของวงจรมีความสัมพันธ์กับอินพุตเป็น

$$\pm I_{out} = \pm \left(\frac{g_{m1} R_{B1}}{R_A(1+g_{m1} R_{B1})} V_{in} + \frac{g_{m2} R_{B2}}{R_{OS}(1+g_{m2} R_{B2})} (\pm)V \right) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะเห็นได้ว่าค่าความชันสามารถปรับได้โดยการปรับค่า g_{m1} สำหรับจุดตัดแกน y สามารถปรับได้โดยการปรับค่า g_{m2}



รูปที่ 3 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่ปรับค่าความชันและปรับตำแหน่งศูนย์ได้อย่างอิสระ

พิจารณาสมการ (6) เฉพาะของความชัน

$$m = \frac{g_{m1} R_{B1}}{R_A(1+g_{m1} R_{B1})} \quad (7)$$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิ จึงขอแสดงสมการค่าความชันจากสมการ (7) ใหม่เป็น

$$m = \frac{a}{R_A(1+a)} \quad (8)$$

โดยที่ $a = g_{m1} R_{B1}$

เมื่ออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าความชันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$\frac{dm}{da} = \frac{1}{R_A(1+a)^2} \quad (9)$$

ถ้าพจน์ a มีการเปลี่ยนแปลงโดยผลของอุณหภูมิเป็น δa ดังนั้นค่าความชันก็จะมีเปลี่ยนแปลงเป็น δm ตามไปด้วย ดังนั้นสมการที่ (9) จึงมีค่าเป็น

$$\delta m = \frac{\delta a}{R_A(1+a)^2} \quad (10)$$

ทำการหาร ตลอดสมการที่ (10) ด้วยค่า m จะได้

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{\frac{\delta a}{a}}{1+a} = \frac{\frac{\delta(g_{m1}R_{B1})}{g_{m1}R_{B1}}}{1+g_{m1}R_{B1}} \quad (11)$$

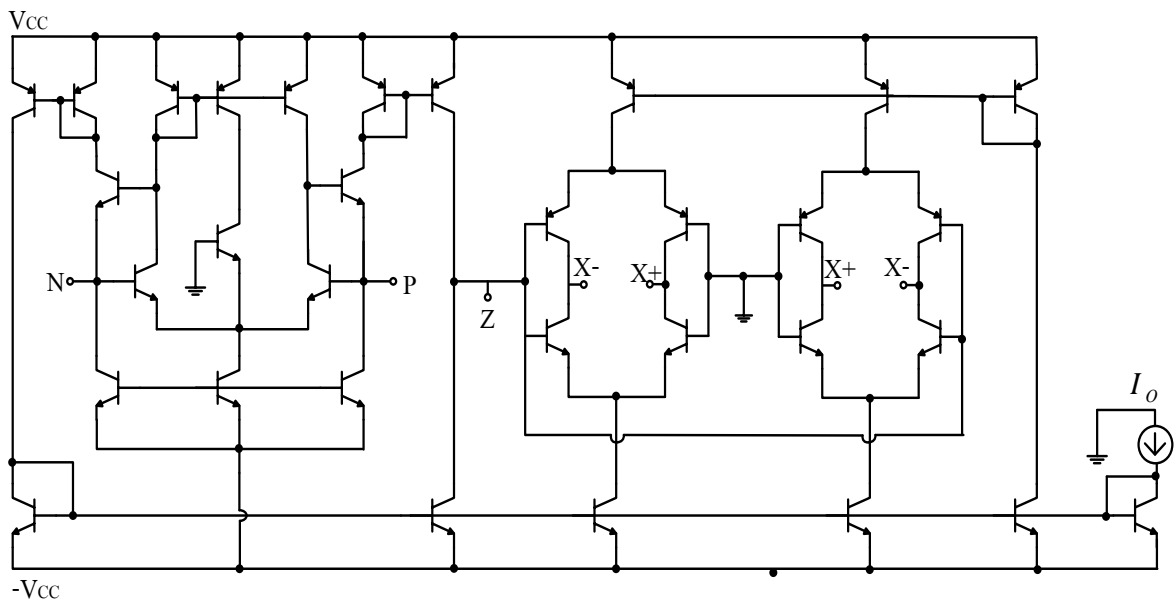
จากสมการ (11) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าความชันต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของ a มีค่าน้อยลง เนื่องจากถูกหารด้วยพจน์ของ $1+a$ หรือ $1+g_{m1}R_{B1}$ นั่นเอง ดังนั้นค่าความชันของวงจรถูกปรับค่าได้ด้วยการปรับค่าการเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก

3. ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

วงจรถูกปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอนี้ได้ถูกตรวจสอบการทำงานโดยอาศัยการจำลองการทำงานของวงจรถูกปรับค่าด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ทรานซิสเตอร์ NPN เบอร์ Q2N2222A และ PNP เบอร์ Q2N2907A ในการประกอบเป็นวงจร CDTA แบบหลาย ตามโครงสร้างที่ปรากฏในรูปที่ 4 กำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าเป็น ± 1.5 โวลต์ เริ่มต้นได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการปรับค่าความ

ชันโดยใช้วงจรถูกปรับค่าที่ 2(ก) กำหนดให้ $R_A=2\text{ k}\Omega$, $R_{OS}=2\text{ k}\Omega$, $R_B=300\Omega$, $I_0=200\ \mu\text{A}$, $400\ \mu\text{A}$, $600\ \mu\text{A}$ โดยที่แรงดัน V_{in} -300mV - 300mV และยังไม่ได้อัดแรงดัน $\pm V$ ในขณะนั้น ได้ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุต ชนิดที่เป็นบวก และเอาต์พุตชนิดลบเป็นดังรูปที่ 5 จากผลตอบสนองเห็นได้ชัดเจนว่ากระแสเอาต์พุตสามารถปรับค่าได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจรถูกปรับค่า CDTA

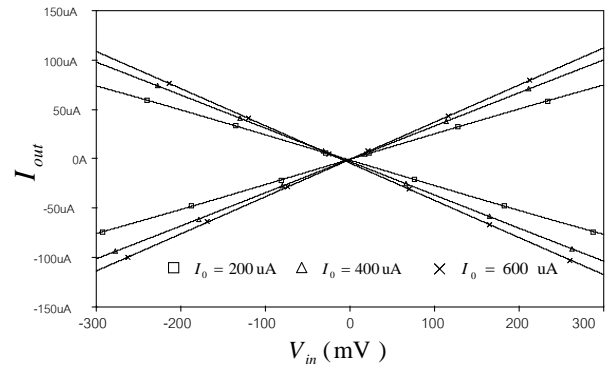
จากนั้นได้ลองปรับตำแหน่งจุดตัดศูนย์ของกระแสเอาต์พุต โดยกำหนดให้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าเป็นดังนี้ $R_{OS}=1\text{ K}\Omega$ $R_B=300\Omega$ $R_A=2\text{ K}\Omega$ $I_0=400\ \mu\text{A}$ ในขณะที่ แรงดันอินพุตมีค่าในช่วง $\pm 200\text{mV}$ แรงดันดีซี ($\pm V$) มีค่าเป็น 50mV ได้ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุต มีค่าเป็นดังรูปที่ 6 จากผลการเลียนแบบการทำงานพบว่าผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุต มีตำแหน่งศูนย์ (จุดตัดแกน y) ที่ค่ากระแสที่แตกต่างกันเมื่อมีแรงดัน ($\pm V$) ที่แตกต่างกัน



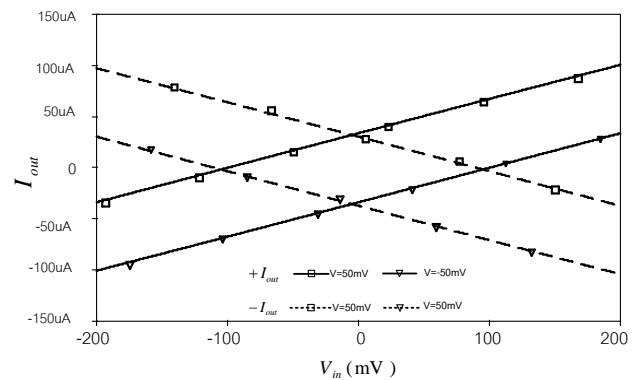
รูปที่ 4 โครงสร้างภายในของวงจรถูกปรับค่าแบบหลายเอาต์พุตที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

นอกจากนี้วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ในรูปที่ 3 ได้เลียนแบบการทำงานของวงจรถ่วง เมื่อกำหนดให้ I_{O1} คงที่ 300 μA เพื่อให้ความชันมีค่าคงที่ จากนั้นปรับค่า $I_{O2} = 20\mu\text{A}, 200\mu\text{A}, 600\mu\text{A}$ ที่ แรงดันอินพุตมีค่าในช่วง $\pm 200\text{mV}$ แรงดันดีซี ($\pm V$) มีค่าเป็น 200mV $R_A = 2\text{ k}\Omega$ $R_{OS} = 2\text{ k}\Omega$ $R_{B1} = R_{B2} = 300\Omega$ ได้กราฟผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าตำแหน่งศูนย์ (จุดตัดแกน y) ของวงจรถ่วงปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ของวงจรถ่วงที่นำเสนอสามารถปรับได้ด้วยค่ากระแสไบอัส

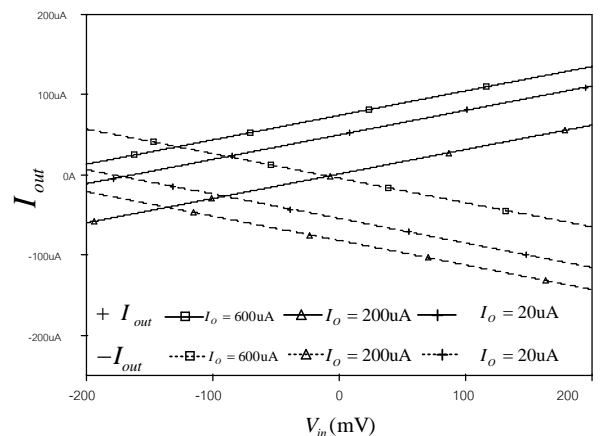
จากนั้นได้ตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันระหว่างการปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ จึงได้ทำการเลียนแบบโดยให้มีการปรับทั้งค่ากระแส I_{O1} และ I_{O2} ของวงจรถ่วงทั้งสองโดยมีค่าเป็น 100 $\mu\text{A}, 200\mu\text{A}, 600\mu\text{A}$ ตามลำดับ ในขณะที่พารามิเตอร์ต่างๆ คงที่เท่าเดิม แรงดันดีซี ($\pm V$) มีค่าเป็น 200mV $R_A = 2\text{ k}\Omega$ $R_{OS} = 2\text{ k}\Omega$ $R_{B1} = R_{B2} = 300\Omega$ ได้กระแสเอาต์พุตของวงจรถ่วงเป็นดังรูปที่ 8 ซึ่งจากผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุต จะเห็นได้ว่าวงจรถ่วงปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์สามารถปรับค่าความชัน และตำแหน่งศูนย์ได้ด้วยการควบคุมกระแสไบอัสของวงจรถ่วง CDTA



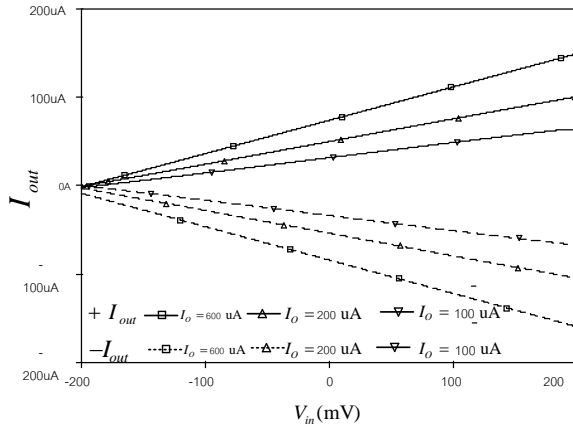
รูปที่ 5 ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุต เมื่อกระแสไบอัสมีค่าต่างๆ กัน



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตต่อค่าแรงดันเมื่อค่าแรงดัน $\pm V$ มีค่าต่างๆ กัน

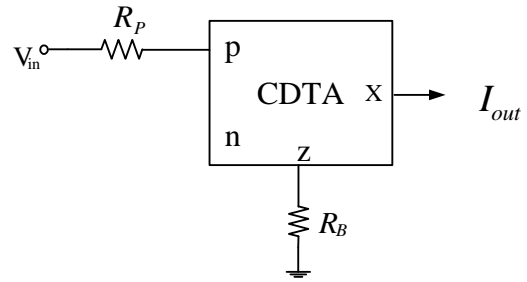


รูปที่ 7 ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตต่อค่าแรงดันของวงจรถ่วงในรูปที่ 3 เมื่อค่ากระแสไบอัสมีค่าต่างๆ กัน

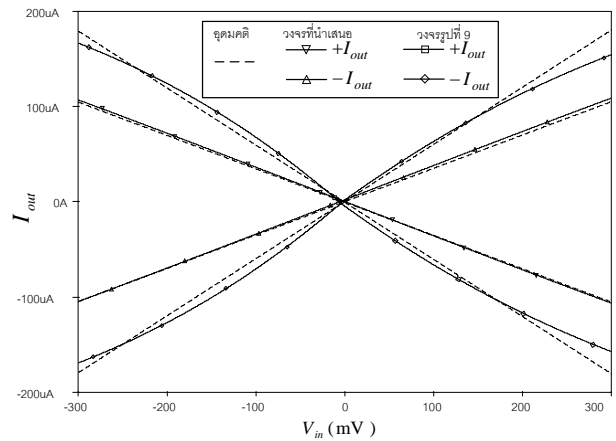


รูปที่ 8 ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3 เมื่อปรับค่ากระแสไบอัส I_{O1} และ I_{O2}

นอกจากนี้วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอยังได้ถูกเลียนแบบการทำงานเพื่อตรวจสอบผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นโดยเปรียบเทียบกับวงจร CDTA ที่ไม่มีการป้อนกลับแบบลบ ดังรูปที่ 9 โดยกำหนดให้ I_O ของทั้งสองวงจรมีค่าเท่ากัน คือ $300\mu\text{A}$ วงจรทั้งสองรับแรงดันอินพุตที่เท่ากันคืออยู่ในช่วง $\pm 300\text{mV}$ ค่าความต้านทานที่ขั้ว p คือ $2\text{k}\Omega$ $R_B = 250\Omega$ ในขณะที่ วงจรในรูปที่ 9 มีค่า $R_B = 500\Omega$ ได้กระแสเอาต์พุตของวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับค่าในอุดมคติ และผลตอบสนองของกระแสในวงจรที่ 9 เปรียบเทียบกับค่าในอุดมคติ เป็นดังรูปที่ 10 ซึ่งจากผลการเลียนแบบการทำงานในรูปที่ 10 พบว่า วงจรที่นำเสนอมีผลตอบสนองการทำงานที่เป็นเชิงเส้น ที่ใกล้เคียงกับค่าอุดมคติ มากกว่าผลตอบสนองของวงจรในรูปที่ 9

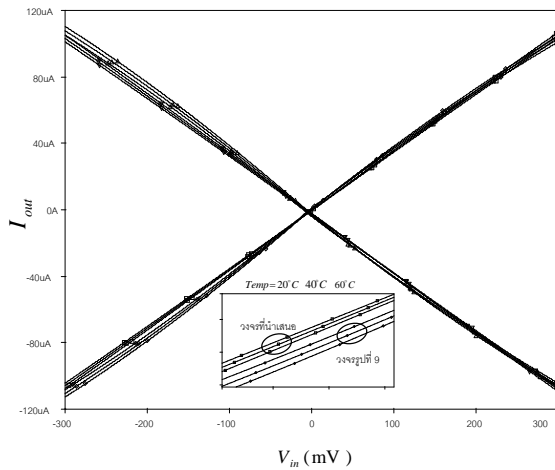


รูปที่ 9 วงจร Transconductance Amplifier



รูปที่ 10 ผลตอบสนองความเป็นเชิงเส้นของวงจรที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับค่าในอุดมคติ และวงจรในรูปที่ 9

สำหรับผลตอบสนองในรูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวงจรในรูปที่ 9 เมื่ออุณหภูมิในการทำงานเป็น 20°C , 40°C และ 60°C ตามลำดับ จากผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตพบว่าวงจรที่นำเสนอสามารถลดผลกระทบจากการดริฟของกระแสเอาต์พุต เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ $20^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$ เมื่อเปรียบเทียบกับ วงจรในรูปที่ 9



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของกระแสเอาต์พุตของวงจร
ที่นำเสนอบริเวณเปรียบเทียบกับ วงจรในรูปที่ 9
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

4.สรุป

บทความนี้ นำเสนอวงจรปรับค่าความชัน และตำแหน่งศูนย์ วงจรสร้างขึ้นจากวงจร CDTA วงจรมีคุณสมบัติคือ วงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ทั้งยังสามารถปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร ผลการเปลี่ยนแปลงการทำงานได้แสดงให้เห็นว่าวงจรมี การทำงานสอดคล้องเป็นไปตามหลักการทาง ทฤษฎีที่นำเสนอ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Franco, "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits," McGraw-Hill, New York, 2015
- [2] H.S. Kalsi, "Electronic instrumentation," New Delhi, Tata McGraw-Hill, 2005
- [3] Verhoeven, C.J.M., "A high-frequency electronically tunable quadrature

oscillator," Solid-State Circuits, IEEE Journal of Vol.27 1992

- [4] Uygun, A.; Kuntman, H., "CDTA-based quadrature oscillator design," Signal Processing Conference, 2006 14th European 2006, Pages:1-4
- [5] Bielek D. "CDTA-Building block for current mode analog signal processing," In Proc. ECCTD03 Cracow, 2003, vol. III, pp. 397-400
- [6] P.R. Gray and R.G. Meyer, Analysis and Design of analog integrated circuit, 3rd ed, 1993, New York, Wiley.