

การสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA ตัวเดียวที่ต่อใช้งานด้วย LM13700

A Synthesis Current-mode Amplifier Employing Single VDTA Implementation with LM13700

ชิติสัน วิชิต¹ วุฒิพงษ์ พิชิตวงศ์² พุทธาวุฒิ ลีกุลธร³ และสมชาย ศรีสกุลเดียว⁴
Chitisan Wichito¹ Wudthipong Pichiwong² Puttawud Leekruntorn³ Somchai Srisakultiew⁴

^{1, 2, 3, 4}วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

E-mail: somchaikorat2008@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว สามารถต่อใช้งานจริงได้ด้วยไอซี LM13700 ที่มีลักษณะเด่นคือใช้อุปกรณ์แอกทีฟ VDTA เพียงตัวเดียวปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟ สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีผลกระทบกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยที่ 27-100°C จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรสามารถทำงานได้สอดคล้องตามที่คาดการณ์ไว้ในทฤษฎี จากการต่อใช้งานจริงด้วยไอซีสามารถทำงานได้จริงเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลอง ทั้งนี้มีผลตอบสนองทางความถี่มากกว่า 1 MHz มีอัตราการใช้พลังงานเมื่อทำการจำลองการทำงานเท่ากับ 0.58 mW ที่แหล่งจ่าย 1.5 โวลต์ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านการสื่อสารข้อมูลได้อีกด้วย

คำสำคัญ วงจรขยาย โหมดกระแส วงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดันไอซี LM13700

Abstract

This article describes a synthesis current-mode amplifier employing single VDTA (Voltage differencing Transconductance Amplifier). It can be implemented with LM13700. Their features are that: it consists of VDTA only without any passive elements, electronically controllable, non-effect in low temperature at 27-100°C. The simulation result obtained from PSpice are accordance with the theoretical predictions.

From the actual used from IC can actually work to the theory and simulation results. The proposed circuits have frequency responds of more than 1MHz, power consumption 0.58mW at 1.5V supply voltage. It can be application to the data communication.

Keywords: Amplifier, Current-mode, VDTA, LM13700

1. บทนำ

วงจรขยายกระแสได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบที่ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟต่ำ เช่น ระบบสื่อสาร เครื่องมือวัด เป็นต้น [1-2] ทั้งนี้ตั้งแต่ทศวรรษที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยง ในวงจรและระบบอิเล็กทรอนิกส์เนื่องมาจากความต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย ที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการทำงานในโหมดกระแส (Current-mode) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับเทคนิคการทำงานในโหมดแรงดัน เช่น มีช่วงพิสัยพลวัตกว้าง (Larger dynamic range) มีแบนด์วิธกว้าง และบริโภคกำลังงานต่ำ [3-4]

สำหรับอุปกรณ์ที่สามารถนำมาออกแบบและสร้างเป็นวงจรขยายกระแสได้นั้น ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในอุปกรณ์เหล่านั้นที่ได้รับความนิยมคือ วงจรขยายความนำถ่ายโอน (Operational transconductance amplifier: OTA) เนื่องจากในปัจจุบันได้ถูกผลิตออกมาจำหน่ายเป็นวงจรรวมหรือไอซี

อย่างแพร่หลาย เช่น เบอร์ CA3800, LT1228, LM13600 เป็นต้น โดยวงจรขยายความนำถ่ายไอออนเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active element) ที่เหมาะในการนำไปออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก [5] ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถควบคุมอัตราขยายทางด้านเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [6] มีแบนด์วิธกว้างเมื่อเทียบกับบออปแอมป์ [7] เป็นต้น ไอซี LM13700 [8] วงจรภายในเสมือนมีวงจรขยายความนำถ่ายไอออน จำนวนสองตัวอยู่ในสามารถต่อใช้งานจริงได้

นอกจากวงจรขยายความนำถ่ายไอออนแล้ว ยังมีอุปกรณ์แอคทีฟอีกชนิดอื่น ๆ ที่สามารถออกแบบให้เป็นวงจรขยายกระแสได้ เช่น CCI [9], CCCII [10], CFA [11], CDTA [12], CCTA [13] ต่างก็สามารถออกแบบให้เป็นวงจรขยายกระแสได้เช่นกัน แต่ก็ยังมีข้อด้อยของวงจรดังต่อไปนี้คือ

- ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ เป็นจำนวนมาก [9, 10, 11, 12, 13]
- ต้องต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ [9, 10, 11, 12, 13]
- ไม่สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [9]

วงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดัน (Voltage Differencing Transconductance Amplifier: VDTA) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีการนำเสนอมานาน [14] มีลักษณะเด่นของตัวอุปกรณ์คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ขาอินพุต (V_{VP} , V_{VN}) จะส่งผ่านกระแสที่ขา Z โดยอัตราการส่งผ่านความนำกระแสด้วยค่าความนำกระแสตัวแรก และแรงดันตกคร่อมที่ Z ยังทำให้ส่งผ่านกระแสไปยังขา $X+$ และ $X-$ ด้วยค่าความนำกระแสตัวที่สอง อีกทั้งค่าความนำกระแสยังสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบแอสจากภายนอก จึงทำให้มีการนำเอาอุปกรณ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ มากมาย เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

จุดมุ่งหมายของบทความวิจัยนี้ เพื่อสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA ตัวเดียวที่สามารถต่อใช้งานจริงได้ด้วยไอซี LM13700 ที่มีลักษณะเด่นคือวงจรขยายกระแสใช้อุปกรณ์แอคทีฟ VDTA เพียงตัวเดียวปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟใดๆ มาต่อรวม มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ที่สามารถต่อใช้งานจริงได้ด้วยไอซี สามารถ

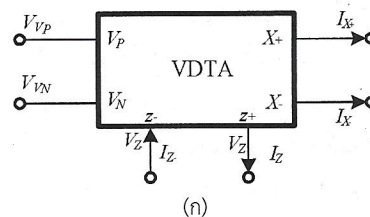
ควบคุมอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านสื่อสารข้อมูลได้

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

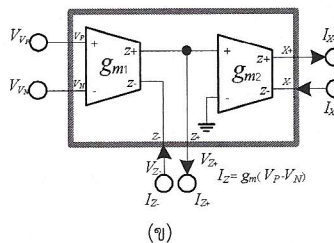
2.1 หลักการทำงานของ VDTA

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอมีอุปกรณ์ VDTA เป็นอุปกรณ์หลักอีกยังใช้อุปกรณ์นี้เพียงตัวเดียว จึงขอกล่าวถึง VDTA สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่นำเสนอ VDTA ที่แสดงในรูปที่ 1 มีขาอินพุต 2 ขาคือ V_{VP} และ V_{VN} มีเอาต์พุตคือขา Z และ $X+$, $X-$ ที่มีอิมพีแดนซ์สูงทุกขา มีคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันดังสมการที่ 1

$$\begin{bmatrix} I_Z \\ I_{X+} \\ I_{X-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{m1} & -g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & g_{m2} \\ 0 & 0 & -g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{VP} \\ V_{VN} \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) สัญลักษณ์และ (ข) วงจรสมมูลของ VDTA

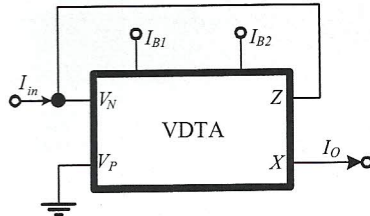
จากโครงสร้างของ VDTA ได้เลือกใช้เป็นทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ดังนั้นค่า g_{m1} และ g_{m2} จะมีค่าของ g_m ดังสมการที่ 2

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

เมื่อ V_T เป็นศักดาความร้อนที่มีค่า 26mV ที่อุณหภูมิห้อง (27°C)

2.2 หลักการออกแบบวงจรขยายในโหมดกระแส

พิจารณาวงจรสมมูลของ VDTA ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) แล้ว สามารถออกแบบวงจรขยายในโหมดกระแสได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรขยายโหมดกระแสที่นำเสนอ

จากคุณสมบัติของอุปกรณ์ในสมการที่ 1 จะได้

$$I_Z = g_{m1}(V_{VP} - V_{VN}) \quad (3)$$

และ

$$I_X = g_{m2}V_Z \quad (4)$$

จากรูปที่ 2

$$\begin{aligned} V_N &= V_Z \\ I_{in} + I_Z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

จะได้

$$I_{in} = -I_Z \quad (6)$$

จากสมการที่ 4 จะได้

$$V_Z = -\frac{I_Z}{g_{m1}} \quad (7)$$

ฉะนั้น เมื่อแทน \$V_Z\$ ลงในสมการที่ 4 จะได้

$$I_X = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_{in} \quad (8)$$

เมื่อ \$I_X = I_O\$ จะได้

$$I_O = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_{in} \quad (9)$$

อัตราขยายของวงจรหาได้

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} \quad (10)$$

แทน

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T}$$

สามารถเขียนสมการที่ 10 ใหม่ได้

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} \quad (11)$$

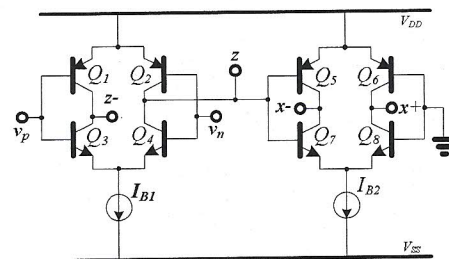
จากสมการที่ 10 และ 11 จะเห็นได้ว่ากระแสเอาต์พุตที่ได้จากสัดส่วนของ \$I_{B2}\$ และ \$I_{B1}\$ ที่สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยการปรับกระแส หรือกล่าวได้ว่าเป็นการปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และอัตราการขยายของวงจรไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเนื่องจากไม่มีค่าของ \$V_T\$ มาเกี่ยวข้องในสมการ

3. ผลการจำลองการทำงาน

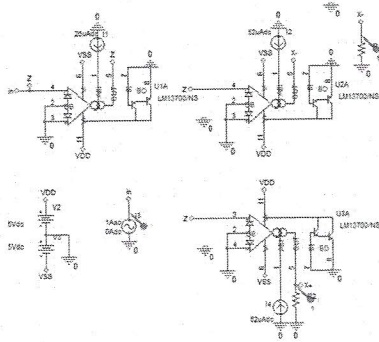
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของบริษัท AT&T [15] จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างภายในของ VDTA ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองการทำงานนี้กำหนดให้แหล่งจ่ายของวงจร คือ $\pm 1.5V$. และใช้ไอซี LM13700 ต่อเลียนแบบวงจร VDTA ได้ดังรูปที่ 4 ใช้ไอซีสองตัวเพื่อให้ได้วงจรขยายกระแสแบบตามสัญญาณ และกลับสัญญาณเนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ และวัดรูปสัญญาณที่มีเป็นแบบแรงดัน ดังนั้น ต้องต่อตัวต้านทาน 100Ω ขนานกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ และวัดรูปสัญญาณจากนั้นสามารถคำนวณหา \$I_{in}\$ และ \$I_O\$ ได้ดังสมการที่ 12 และ 13 กำหนดแรงดันอินพุตเท่ากับ 100mV และใช้แหล่งจ่าย $\pm 5V$.

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{100} \quad (12)$$

$$I_O = \frac{V_O}{100} \quad (13)$$



รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ VDTA

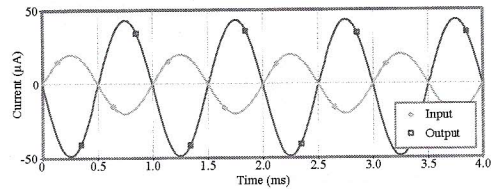


รูปที่ 4 วงจรขยายกระแสตามสัญญาณ และกลับสัญญาณ ด้วยไอซี LM13700

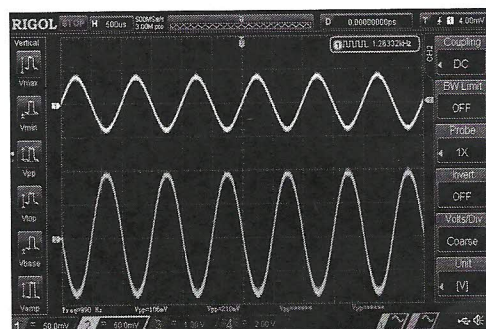
รูปที่ 5 เป็นการจำลองการทำงานของวงจรขยายในโหมดกระแส แสดงในรูปที่ 5 (ก) เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็น i_{sin} ขนาด $20\mu A$ ที่ความถี่ $1kHz$ ให้กระแสไบแอสที่ $I_{B1}=50\mu A$ และ $I_{B2}=100\mu A$ และเพื่อให้สะดวกในการดูผลจำลองจึงให้เอาต์พุตเห็นเป็นค่าติดลบ (กลับสัญญาณ) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ผลการทำงานของไอซี LM13700 ที่ต่อเลียนแบบ VDTA ดังรูปที่ 6 แสดงวงจรขยายกระแสด้วยไอซีจริง รูปที่ 7 แสดงให้เห็นการทดลองที่ต่อไอซีเป็นวงจรขยายกระแส และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทดลองปรับอัตราขยายกระแสด้วยการปรับกระแส I_{B2} ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) เป็นการจำลองการทำงานด้วยการกำหนดเงื่อนไขคือ ป้อนอินพุตเป็น i_{sin} ขนาด $20\mu A$ ที่ความถี่ $1kHz$ และกำหนดให้ $I_{B1}=50\mu A$ และปรับกระแสไบแอส $I_{B2}=25\mu A, 50\mu A, 100\mu A$ และ $150\mu A$ ตามลำดับจะเห็นว่าอัตราขยายสัญญาณสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับกระแส ไบแอสจากภายนอก หรือที่เรียกอีกนัยหนึ่งว่าการปรับอัตราขยายด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่นกันเพื่อให้ง่ายในการดูผลลัพธ์จึงได้ทำการกลับสัญญาณเอาต์พุต รูปที่ 8(ข) ผลการทดลองของไอซีกำหนดให้อินพุตเป็นสัญญาณไซน์ ขนาด $90mV$ ที่ความถี่ $1kHz$ เช่นกันจากนั้นทำการกำหนดให้ $I_{B1}=631\mu A$ ปรับกระแส $I_{B2}=195\mu A, 629\mu A$ และ $1643\mu A$ ตามลำดับ ในรูปที่ 9 เป็นการทดสอบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายกระแส รูปที่ 9(ก) ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ดัง

แสดงในรูปที่ 9(ข) ได้จากการวัดเอาต์พุตในแต่ละช่วงความถี่ทั้งหมด 45 ค่าจากนั้นทำการเขียนแผนภูมิด้วยคอมพิวเตอร์ความถี่ด้วยโปรแกรม Excel จะเห็นได้ว่าวงจรมีผลตอบสนองทางความถี่มากกว่า $1MHz$

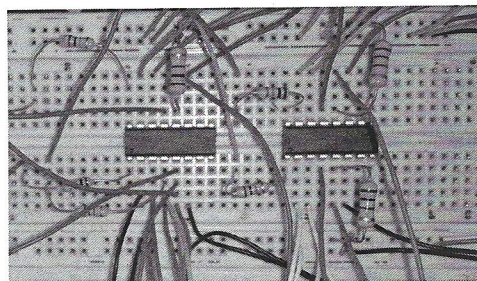


(ก) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม



(ข) ผลการทำงานของไอซี

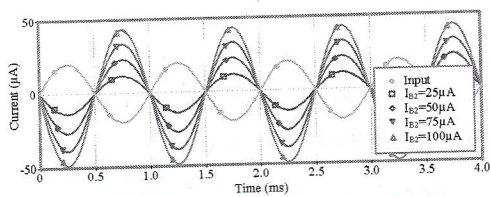
รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราขยายอินพุตกับเอาต์พุต



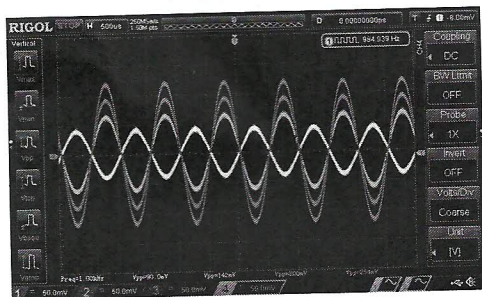
รูปที่ 6 วงจรขยายกระแสต่อเลียนแบบ VDTA ด้วยไอซี LM13700



รูปที่ 7 เป็นรูปเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองใช้อิซี LM13700 เลียนแบบ VDTA เป็นวงจรขยายกระแส

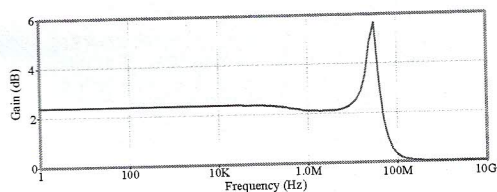


(ก) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม

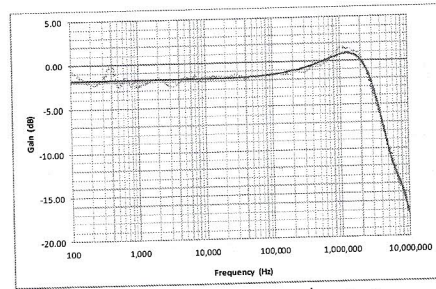


(ข) ผลการทำงานของอิซี

รูปที่ 8 ปรับอัตราขยายด้วยกระแสไบแอส I_{B2}



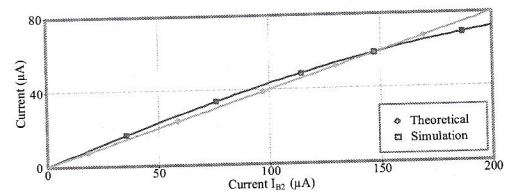
(ก) ผลการจำลองด้วยโปรแกรม



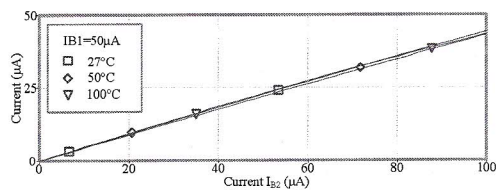
(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของอิซี

รูปที่ 9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่นำเสนอ

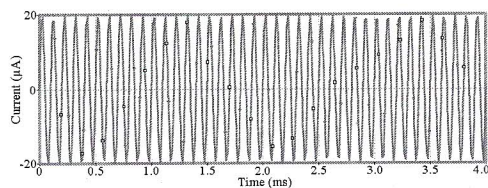
ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 10 เพื่อแสดงให้เห็นคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอด้วยการเปรียบเทียบการจำลองการทำงาน กับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 11 เมื่อทำการคงที่ $I_{B1}=50\mu A$ และปรับเปลี่ยนค่ากระแส I_{B2} จาก $0\mu A$ ถึง $200\mu A$ จะเห็นได้ว่ามีผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับทฤษฎีที่วิเคราะห์ไว้ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงอัตราขยายเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแส I_{B2} เริ่มจาก $0-100\mu A$ พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง $27-100^\circ C$ จะเห็นได้ว่ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยส่วนในรูปที่ 12 เป็นการจำลองการทำงานของวงจรให้เป็นวงจรคล้ำสัญญาณด้วยการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ (I_{sin}) มีขนาด $20\mu A$ ที่ความถี่ 10 kHz ดังรูปที่ 12(ก) กำหนดให้ $I_{B1}=50\mu A$ และ I_{B2} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาด $20-100\mu A$ ความถี่ 1 kHz ดังรูปที่ 12(ข) ส่วนรูปที่ 12(ค) เป็นผลการจำลองที่วัดค่าได้จากเอาต์พุตของวงจร จะเป็นเหมือนกับวงจรคล้ำสัญญาณทางแอมพลิฟิเคชันที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 13



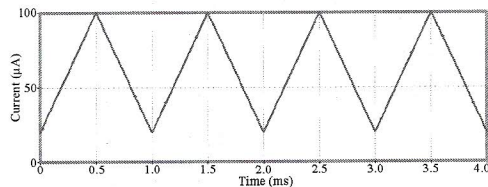
รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการจำลองการทางกับค่าที่คำนวณได้



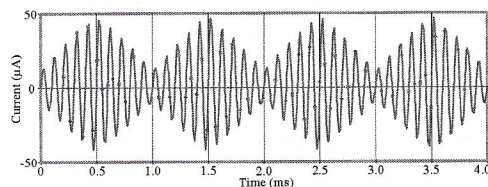
รูปที่ 11 อัตราขยายเมื่อปรับ I_{B2} และอุณหภูมิ 27°C, 50°C และ 100°C



(ก) อินพุตที่ป้อนเข้าเป็น I_{sin} ขนาด 20μA

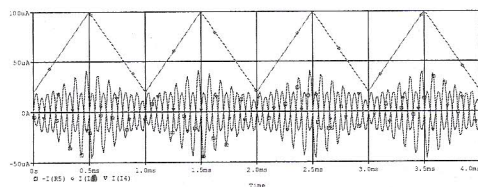


(ข) สัญญาณที่ป้อนเข้า I_{B2}



(ค) ผลการจำลองที่ได้จากการที่ป้อนอินพุต

รูปที่ 12 ประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรลำสัญญาณแบบ แอมพลิฟายเออร์



รูปที่ 13 ผลการประยุกต์เป็นวงจรลำสัญญาณแบบ แอมพลิฟายเออร์

4. สรุปผลการทดลอง

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ การสังเคราะห์ วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว ซึ่งมี คุณสมบัติเด่นคือ สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทาง อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2} ใช้เพียง อุปกรณ์ VDTA เพียงตัวเดียว ปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟมา ต่อรวม ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องทางทฤษฎีมี อัตราสิ้นเปลืองพลังงาน 0.58mW ที่แหล่งจ่าย $\pm 1.5V$ ทั้งนี้สามารถต่อใช้งานจริงได้ด้วยไอซีมีผลการทำงาน เป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองการทำงาน มีการ ตอบสนองความถี่มากกว่า 1MHz นอกจากนี้จะเป็น วงจรขยายสัญญาณในโหมดกระแสทั้งแบบตามสัญญาณ และกลับสัญญาณยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรลำ สัญญาณแบบแอมพลิฟายเออร์ได้ด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Palmisano, G. Palumbo, S. Pennisi, "CMOS Current Amplifiers," Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] K. Kaewdang, W. Surakamontom, and N. Fujii, "A design of controllable gain class B push-pull current amplifier," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2005. ISCAS 2005, vol. 2, pp.1577 - 1580, 2005.
- [3] C. Toumazou, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, "Analogue IC design: the current-mode approach," Peregrinus, London, 1990.
- [4] C. S. Hilar, and T. N. Laopoulos, "Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique," *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON '96, Bari, Italy, May 13-16*, pp. 1309-1312, 1996.
- [5] S.-H. Yang, K.-H. Kim, Y.-H. Kim, Y. You, and K.-R. Cho, "A novel CMOS operational transconductance amplifier based on a mobility compensation technique," *IEEE*

- Transactions on Circuits and system—II: Express Briefs*, vol. 52, no. 1, pp. 37–41, 2005.
- [6] S. Minae, G. Topcu, and O. Cicekoglu, "Active only integrator and differentiator with tunable time constants," *INT. J. Electronics*, vol. 90, no. 9, pp. 581–588, 2003.
- [7] W. Surakamponorn, V. Riewruja, K. Kumwachara, C. Surawatpunya, and K. Anuntahirunrat, "Temperature-insensitive voltage-to-current converter and its applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 6, pp. 1270–1277, 1999.
- [8] TexasInstruments, LM13700, Copyright©2013, Texas Instruments Incorporated.
- [9] วิทยา ศรีกุล, สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว และมนตรี ศิริปรัชญานันท์, "การสังเคราะห์ตัวควบคุม PI, PD และ PID โหมดกระแสโดยใช้วงจรสายพานกระแส" ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4, หนองคาย, 2555.
- [10] สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว และมนตรี ศิริปรัชญานันท์, "การสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ในโหมดกระแส โดยใช้วงจรสายพานกระแสควบคุมด้วยกระแส" การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม ระดับชาติ ครั้งที่ 3 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, หน้า 63-68, 2553.
- [11] สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว, ศุภวัฒน์ ลาวณย์วิสุทธ์ และมนตรี ศิริปรัชญานันท์, "การสังเคราะห์ตัวควบคุมในโหมดกระแส PI, PD และ PID ด้วยวงจรขยายป้อนกลับกระแส" ประชุมวิชาการ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ, หน้า 28-35, 2553.
- [12] D. Birolek, "CDTA building for current-mode analog signal processing", *Proceeding of European conference theory and design*, ECC TD03, 2003.
- [13] S. Srisakultiew, S. Lawanpisut, M. Siripruchyanun, "A synthesis of low component count for current-mode PI, PD and PID controller employing CCTA", 37th International conference on telecommunication and signal proceeding (TSP-2014), Germany, pp. 409-413, 2014.
- [14] V. BILKOVA, Z. KOLKA, D. BIOLEK, "Fully balanced voltage differencing buffered amplifier and its applications." In 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS'09. Cancun (Mexico), p.45 – 48, 2009.
- [15] D.R. Frey, "Log-Domain Filtering: An Approach to Current-Mode Filtering", *IEE Proc. Circuit Devices Syst.* Vol.140: pp. 406–410, 1993.