

วงจรรองความถี่เอนกประสงค์แบบทโทมัสในโหมดกระแสที่สามารถปรับค่าได้ด้วย วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย VDTA ตัวเดียว

An Electronically Controllable Current-mode Tow-Thomas Universal Biquadratic filter Employing Single VDTA

ภัสสฤกษ์ ฐิติมัทธนากุล^{*1} สมชาย ศรีสกุลเดียว² ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³สาขาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
321 ต.ทะเลชุบศร อ.เมือง จ.ลพบุรี 15000

Phatsagul Thitimahatthanagul^{*1} Somchai Srisakultiew² Supawat Lawanwisut³

¹Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima 30000

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima 30000

³Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Thepsatri Rajabhat University, 321 Naraimaharat Road, Muang District, Lopburi, Thailand, 15000

Tel : 09-4469-1916 E-mail: makyou_sula44@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ วงจรรองความถี่เอนกประสงค์แบบทโทมัสในโหมดกระแสด้วย VDTA ตัวเดียวที่สามารถสนองความถี่ได้ 3 แบบในวงจรเดียวกัน ได้แก่ กรองความถี่ต่ำผ่าน สูงผ่าน และแถบความถี่ผ่าน ด้วยอุปกรณ์วงจรขยายผลต่างแรงดันส่งผ่านความนำกระแส (Voltage Differencing Transconductance Amplifier: VDTA) เพียงตัวเดียว มีลักษณะเด่นของวงจรคือ สามารถปรับค่าความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับกระแส I_b ได้ โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย VDTA เพียง 1 ตัว ร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 2 ตัว ปราศจากตัวต้านทานภายนอกและใช้กับอุปกรณ์พาสซีฟอื่น วงจรที่นำเสนอนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมและมีอัตราสิ้นเปลืองกำลังงาน 0.7964 mW. ที่แหล่งจ่าย

แรงดัน ± 1.5 V. ยิ่งกว่านั้นวงจรที่นำเสนอยังสะดวกในการนำไปต่อใช้งานในโหมดกระแสเนื่องจากเอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์สูง ผลการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice พบว่าให้ผลสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

คำหลัก วงจรรองความถี่หลายหน้าที่ โหมดกระแส VDTA

Abstract

This article presents a current-mode tow-thomas universal biquadratic filter performing 3 standard functions in the same time: low-pass, high-pass and band-pass functions, based on only single voltage differencing transconductance amplifier (VDTA). The features of the circuit are that: the pole

frequency and quality factor can be electronically tuned via the input bias currents. The circuit topology is very simple, consisting of merely single VDTA and 2 grounded capacitors. Without any external resistor and using only grounded elements, the proposed circuit is very comfortable to further develop into an integrated circuit and power consumption is approximately 0.7964 mW at $\pm 1.5V$ supply voltage. Moreover, the proposed circuit enables easy cascading in current-mode circuit, due to high output impedances. The PSpice simulation results are shown. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords: multifunction filter, current-mode, VDTA

1. บทนำ

กว่าสองทศวรรษที่ผ่านมา ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีความพยายามที่ลดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายสำหรับวงจรโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์พหุการลดแหล่งจ่ายแรงดัน จึงเป็นสิ่งจำเป็นด้วยเทคนิคการออกแบบวงจรโหมดกระแสที่มีลักษณะเด่นกว่าโหมดแรงดัน จึงเป็นวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์วงจรโหมดกระแส เนื่องจากมีช่วงพลวัตกว้าง (larger dynamic range) มีแบนด์วิดท์กว้าง (higher signal bandwidth) มีความเป็นเชิงเส้นสูง (greater linearity) ออกแบบวงจรได้ง่าย (simple circuitry) และสิ้นเปลืองกำลังงานต่ำ (low power consumption) [1-2] วงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกมีความสำคัญมากในด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางหลายด้าน เช่น ด้านการสื่อสาร ด้านเครื่องมือวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องวัดทางการแพทย์ และระบบควบคุม [3-4]

จากการสำรวจได้มีการเผยแพร่บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแส อุปกรณ์แอกทีฟที่สามารถทำงานในโหมดกระแสได้มีมากมาย เช่น วงจรขยายความนำส่งผ่านกระแส (Operational Transconductance Amplifier: OTA) วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor: CCII) วงจรขยายกันชนจากผลต่างกระแส (Current Differential Buffer Amplifier: CDBA) วงจรขยายความนำจากผลต่างกระแส

(Current Differential Transconductance Amplifier: CDTA) จากรายงาน [5-16] พบข้อดีของบทความต่าง ๆ บางประการดังต่อไปนี้

- 1) ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ และพาสซีฟมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวต้านทานภายนอก [5-9], [17]
- 2) การตอบสนองความถี่บางส่วนเอาต์พุตเป็นอิมพีแดนซ์ต่ำ [10-11] ในโหมดกระแสจึงเป็นเรื่องยากในการนำไปใช้งาน
- 3) ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [5-9], [12]
- 4) ต้องเปลี่ยนวงจรจึงจะได้ผลตอบสนองครบ [13-14]
- 5) ต้องใช้ตัวเก็บประจุต่อลอย [15-16] ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นไอซี

วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ เป็นที่นิยมและแพร่หลายมาก เนื่องจากสามารถให้ผลตอบสนองได้ครบทุกฟังก์ชันในเวลาเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์แบบบูโทมัสนั้นเป็นที่นิยมกว่า วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์แบบอื่น ๆ เนื่องจากโครงสร้างแบบบูโทมัส มีสมรรถนะของความไวต่ออุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟต่ำ ใช้อุปกรณ์น้อยและมีความเสถียรภาพสูง [18-19]

วงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดัน (Voltage Differencing Transconductance Amplifier: VDTA) เป็นอุปกรณ์แอกทีฟที่มีการนำเสนอมานาน [20-21] มีลักษณะเด่นของตัวอุปกรณ์คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ขาอินพุต (V_{VP} , V_{VN}) จะส่งผ่านกระแสที่ขา Z โดยอัตราการส่งผ่านความนำกระแสด้วยค่าความนำกระแสตัวแรกและแรงดันตกคร่อมที่ Z ยังทำให้ส่งผ่านกระแสไปยังขา X^+ และ X^- ด้วยค่าความนำกระแสตัวที่สอง อีกทั้งค่าความนำกระแสยังสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบแอสจากภายนอก จึงทำให้มีการนำเอาอุปกรณ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ มากมายเช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

ดังนั้นในบทความนี้นำเสนอ วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแสแบบบูโทมัสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุสองตัวแบบต่อลงกราวด์ ที่มีลักษณะเด่นคือ กรองความถี่พื้นฐานสามย่าน

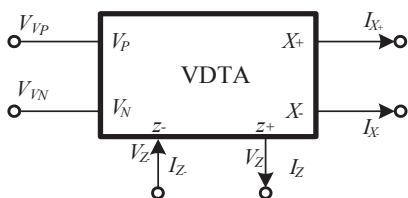
ความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน และแถบความถี่ผ่าน ในโครงสร้างเดียวกัน สามารถควบคุมความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ปราศจากตัวต้านทานภายนอก และจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice เพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

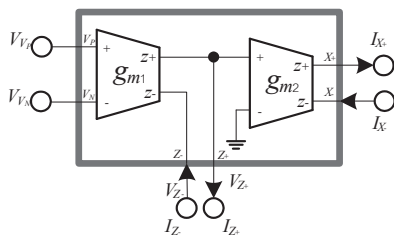
2.1 หลักการทำงานของ VDTA

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)

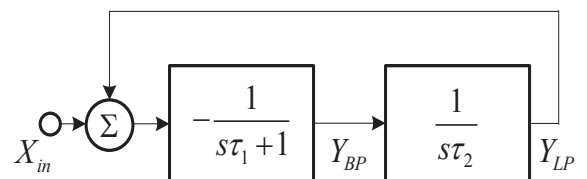
2.2 โครงสร้างของวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ทูโทมัส

โครงสร้างของวงจรของวงจรกรองความถี่ทูโทมัสจะประกอบไปด้วย วงจรอินทิเกรเตอร์แบบสูญเสีย (lossy integrator) กับแบบไม่สูญเสีย (lossless integrator) และวงจรรวม ดังแสดงในรูปที่ 2 จากผังการทำงานสามารถนำมาเขียนสมการถ่ายโอนของ แถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter: BPF) และความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) เป็นสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$Y_{BP} = -\frac{s \frac{1}{\tau_1}}{s^2 + s \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (3)$$

และ

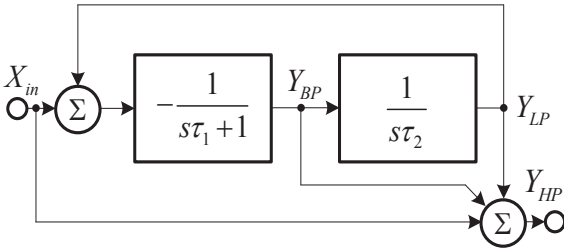
$$Y_{LP} = -\frac{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}}{s^2 + s \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (4)$$



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ของทูโทมัส

จากรูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ของทอโมส จะสามารถกรองได้เป็นแถบความถี่ผ่านและกรองความถี่ต่ำผ่านได้เท่านั้น ส่วนการกรองความถี่สูงผ่านนั้น ต้องปรับปรุงโครงสร้างทอโมสเป็นรูปที่ 3 สามารถเขียนสมการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านได้เป็นสมการที่ (5)

$$Y_{HP} = -\frac{s^2}{s^2 + s\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \quad (5)$$



รูปที่ 3 โครงสร้างการกรองความถี่เอนกประสงค์แบบทอโมสที่ปรับปรุงใหม่

จากสมการที่ (3) - (5) ค่าความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ สามารถเขียนดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_1\tau_2}} \quad (6)$$

และ

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (7)$$

2.3 วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ของทอโมสด้วย

VDTA

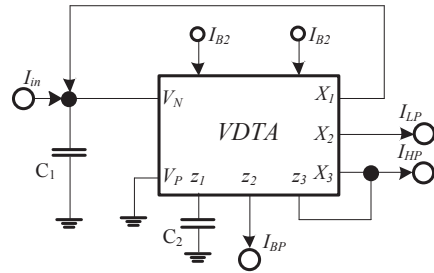
ส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่นำเสนอวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ของทอโมสด้วย VDTA อันประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ตัว จึงทำให้ไม่สิ้นเปลืองอุปกรณ์ ดังนั้นวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ของทอโมสด้วย

VDTA ที่นำเสนอในรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการถ่ายโอนกระแสดังสมการที่ (8) - (11) ได้ดังนี้

$$\frac{Y_{BP}}{X_{in}} = -\frac{s\frac{g_{m1}}{C_1}}{s^2 + s\frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (8)$$

$$\frac{Y_{LP}}{X_{in}} = -\frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s\frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (9)$$

$$\frac{Y_{HP}}{X_{in}} = -\frac{s^2}{s^2 + s\frac{g_{m1}}{C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (10)$$



รูปที่ 4 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (11)$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}C_2}{C_1g_{m2}}} \quad (12)$$

แทนค่า g_m ด้วย $I_B/2V_T$ ลงในสมการที่ (11) ได้สมการที่ (13)

$$\omega_0 = \frac{1}{2V_T} \sqrt{\frac{I_{B1}I_{B2}}{C_1C_2}} \quad (13)$$

และแทนค่า g_m ด้วย $I_B/2V_T$ ลงในสมการที่ (12) ได้สมการที่ (14)

$$Q_0 = \sqrt{\frac{I_{B2}C_1}{I_{B1}C_2}} \quad (14)$$

จากสมการ ω_0 และ Q_0 ค่าความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ยิ่งไปกว่านั้น อัตราส่วนถ้าให้ค่ากระแส I_{B1} และ I_{B2} คงที่จะสามารถปรับความถี่โพลได้ด้วย ในขณะที่เดียวกันหากต้องการให้ค่า Q สูงสามารถทำได้ด้วยการให้ C_1 มากกว่า C_2 และสามารถหาค่า BW ได้ดังสมการที่ (15)

$$BW = \frac{I_{B1}}{2V_TC_1} \quad (15)$$

2.4 ความไวของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองาน

ค่าความไวของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองานได้ตามสมการที่ (16) และ (17)

$$S_{I_{B1}}^{\omega_0} = S_{I_{B2}}^{\omega_0} = \frac{1}{2}, S_{C_1}^{\omega_0} = S_{C_2}^{\omega_0} = -\frac{1}{2} \quad (16)$$

และ

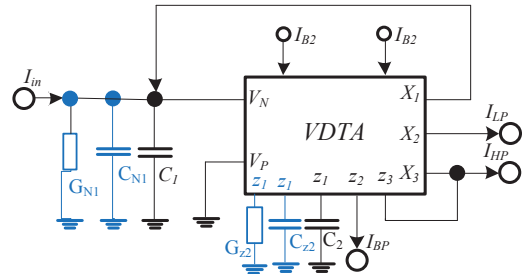
$$S_{I_{B1}}^{Q_0} = S_{C_2}^{Q_0} = -\frac{1}{2}, S_{I_{B2}}^{Q_0} = S_{C_1}^{Q_0} = \frac{1}{2} \quad (17)$$

โดยค่าความไวของอุปกรณ์แอกทีฟ และพาสซีฟทั้งหมดต้องมีค่าเท่ากับ หรือน้อยกว่า 1 เสมอ

2.5 การวิเคราะห์กรณีไม่เป็นอุดมคติ

วงจรกรองความถี่อเนกประสงค์แบบทูโทมัสในโหมดกระแสด้วย VDTA ตัวเดียว ในทางปฏิบัติ อุปกรณ์

VDTA จะมีค่าความจุแผลงและค่าความนำแผลง ส่งผลกระทบบั้สมรรถนะของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองาน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบค่าความจุแผลงและความนำแผลง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความจุแผลงและค่าความนำแผลงที่เกิดขึ้นในวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองาน

ผลกระทบในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติของ VDTA ที่อินพุตจะเพิ่มค่าความจุแผลงที่ V_N (C_{N1}) กับค่าความนำแผลง (G_N) และที่เอาต์พุตที่ Z จะเพิ่มจะเพิ่มค่าความจุแผลง (C_Z) กับค่าความนำแผลง (G_Z) ที่ต่อขนานเข้าที่ขาอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นสามารถแสดงค่าความจุแผลงและค่าความนำแผลงในวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองานได้ดังรูปที่ 5 เมื่อ C_{N1} = ความจุแผลงที่ V_N ส่วนของ C_{Z2} = ความจุแผลงที่ โดยที่ Z ให้ $G_{N1} = G_{X1}$ และ $G_{Z2} = G_{N2} + G_{X2}$ เมื่อพิจารณาผลกระทบพารามิเตอร์ค่าความจุแผลงกับค่าความนำแผลง ความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนองานจะสามารถเขียนสมการผลกระทบของพารามิเตอร์แผลงได้ดังสมการที่ (18) และ (19)

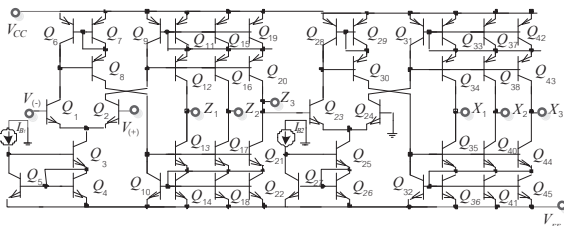
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2} + G_{N1}(g_{m2} + G_{Z2})}{(C_1 + C_{N1})(C_2 + C_{Z2})}} \quad (18)$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_{N1})(C_2 + C_{Z2})g_{m1}g_{m2} + G_{Z2}(g_{m2} + G_{Z2})}{(C_2 + C_{Z2})G_{N1} + (C_1 + C_{N1})(g_{m2} + G_{Z2})}} \quad (19)$$

3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อบั้เป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนองาน จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice

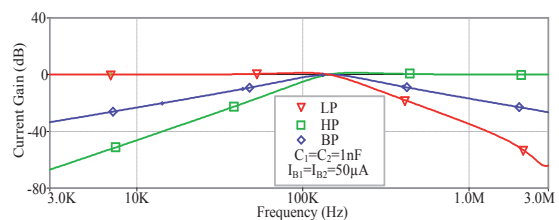
สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของบริษัท AT&T [22] จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างภายในของ VDTA โดยเงื่อนไขในการจำลองการทำงานนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายของวงจร คือ $\pm 1.5V$ ความต้านทานที่เป็นโหนดวงจรเท่ากับ 1Ω ค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 1nF$ และ $I_{B1} = I_{B2} = 50\mu A$ จะได้ค่าความถี่โพล $144.242kHz$ จากการจำลองการทำงาน และได้ค่าความถี่โพล $153.033kHz$ จากการคำนวณตามสมการที่ (12) ในกรณีนี้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ร้อยละ 5.744



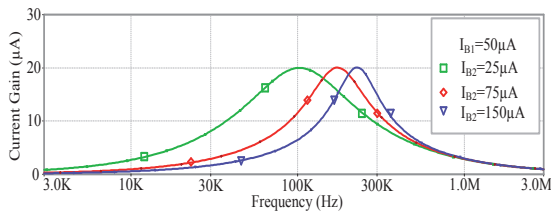
รูปที่ 6 โครงสร้างภายในของ VDTA

จากรูปที่ 7 เป็นผลจำลองการทำงานของ การตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองเอวกระแสด แบบทูโหมัสด้วย VDTA เพื่อแสดงให้เห็นผลการจำลองอย่างชัดเจนของวงจร การกรองความถี่ต่ำผ่าน การกรองความถี่สูงผ่าน และการกรองแถบความถี่ผ่าน ในโครงสร้างของวงจรที่นำเสนอมีได้เปลี่ยนแปลง และในสภาวะการทำงาน มีอัตราการใช้พลังงานกำลังงาน $0.7964 mW$ ดังรูปที่ 8 แสดงให้เห็นผลการจำลองการทำงานของ แถบความถี่ผ่าน โดยวิธีการปรับกระแส $I_{B1} = 50\mu A$ และทำการปรับ $I_{B2} = 25\mu A, 75\mu A, 150\mu A$ พบว่าได้ค่าความถี่โพลสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ ค่าความถี่โพลที่ $108.211kHz, 187.427kHz$ และ $265.062kHz$ ค่าความถี่โพลที่ได้จากการจำลองนี้คือ $103.365 kHz, 172.956kHz$ และ $227.556kHz$ ในกรณีนี้จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 4.47, 7.72 และ 14.647 ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่าน จากการปรับ $I_{B1} = 25\mu A, 75\mu A, 150\mu A$ ให้ $I_{B2} = 50\mu A$ พบว่าได้ค่าความถี่โพลนั้นสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณคือ ค่าความถี่โพลที่

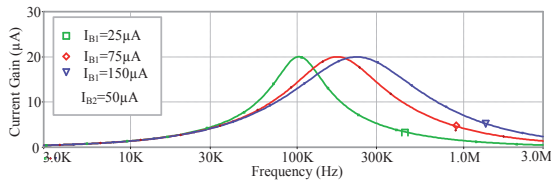
$108.211kHz, 187.427kHz$ และ $265.062kHz$ ในส่วนของค่าความถี่โพลที่ได้จากการจำลองนี้คือ $103.35kHz, 172.588kHz$ และ $230.41kHz$ ซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 4.492, 7.917 และ 9.88 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ผลจากการทดลองและผลจากการคำนวณสอดคล้องกัน ในสมการที่ (12) และสามารถนำมาใช้งานได้จริง ในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นผลตอบสนองทางความถี่ด้วยการให้ $I_{B1} = I_{B2}$ ซึ่งทำการปรับให้มีค่าเท่ากับ $25\mu A, 75\mu A, 150\mu A$ ส่งผลให้ได้ค่าความถี่โพลสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ ค่าความถี่โพลที่ $76.516 kHz, 229.55kHz$ และ $459.1kHz$ ในส่วนของค่าความถี่โพลที่ได้จากการจำลองนี้คือ $73.765kHz, 210.049kHz$ และ $375.238kHz$ ซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 3.59, 8.49 และ 18.266 ตามลำดับ พบว่าการปรับกระแส $I_{B1} = I_{B2}$ ทำให้แบนด์วิดท์และความถี่โพลจะเปลี่ยนแปลงไปตามกัน และไม่มีผลต่อค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ จะเห็นได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอมีสมรรถนะดีมีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 10 ที่ความถี่ไม่เกิน $200 kHz$ ในช่วงความถี่ที่เกิน $200 kHz$ จะมีค่าผิดพลาดเกินร้อยละ 10 เนื่องจากค่าความจุแฝงและค่าความนำแฝงที่แสดงให้เห็นในความไม่แน่นอนของ VDTA และโครงสร้างภายในของ VDTA ที่เลือกใช้ที่ Z และ X นั้นเกิดการสะท้อนกระแสและการคัดลอกกระแสที่ Z_1, Z_2 และ Z_3 ที่ X ก็เช่นกันเพื่อให้ได้ X_1, X_2 และ X_3 ทำให้ค่า inversion error ไม่เท่ากับ 1 ในรูปที่ 11 ถึง 13 นั้นแสดงผลตอบสนองรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่โพล $144.242kHz$ ในสภาวะเริ่มต้นต่อการกรอง แถบความถี่ผ่าน ความถี่ต่ำผ่าน และความถี่สูงผ่าน ตามลำดับมีค่า THD = 2.2175% ค่าความผิดพลาดสูงเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแบบทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์



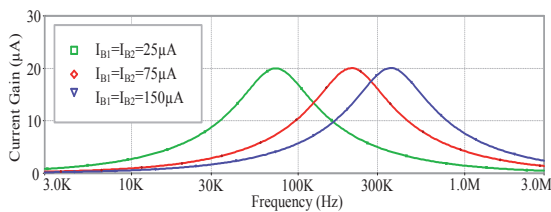
รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่นำเสนอ



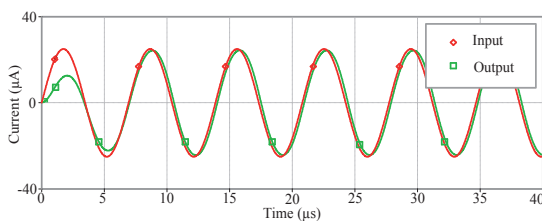
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่าน จาก $I_{B1} = 50\mu A$ และปรับ $I_{B2} = 25\mu A, 75\mu A$ และ $150\mu A$



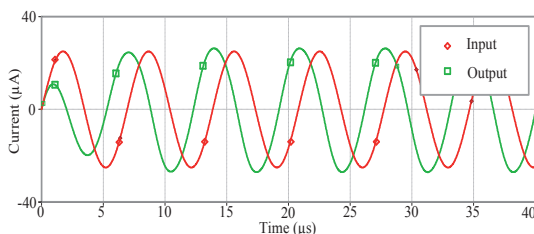
รูปที่ 9 ผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่าน จากการปรับ $I_{B1} = 25\mu A, 75\mu A, 150\mu A$ และ $I_{B2} = 50\mu A$



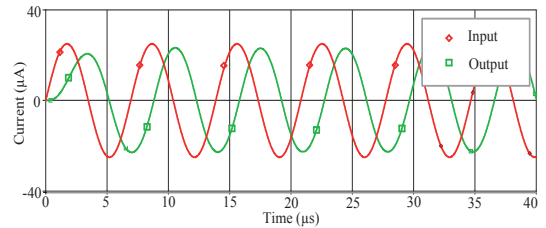
รูปที่ 10 ผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่านด้วยการกำหนดให้ $I_{B1} = I_{B2}$ ให้มีค่าเท่ากับ $25\mu A, 75\mu A$ และ $150\mu A$



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่านด้วย รูปคลื่นขาอินพุตความถี่ 144.242kHz



รูปที่ 12 ผลตอบสนองของการกรองความถี่ต่ำผ่านด้วย รูปคลื่นขาอินพุตความถี่ 10kHz



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของการกรองความถี่สูงผ่านด้วย รูปคลื่นขาอินพุตความถี่ 10kHz

5. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยเรื่องวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแสแบบบูโธมัสด้วย VDTA เพียงตัวเดียวที่นำเสนอ ต่อทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุสองตัวแบบต่อลงกราวด์ เหมาะสมในการนำเป็นทำเป็นไอซี เนื่องจากสามารถปรับความถี่โพลได้อย่างอิสระ จากค่าควิลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ปราศจากตัวต้านทานภายนอกและอุปกรณ์ต่อลอย ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าให้ผลสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี มีอัตราการใช้พลังงาน 0.7964mW ที่แหล่งจ่าย $\pm 1.5V$.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Toumazou, C., Lidgey, F.J., Haigh, D.G. Analogue IC design: the current-mode approach. London: Peter Peregrinus . 1990.
- [2] Bhaskar, D.R., Sharma, V.K., Monis, M., Rizvi, S.M.I. New current mode universal biquad filter. Microelectron J. 1999; 30:837-839 .
- [3] Sedra, A.S., Smith, K.C. Microelectronic circuits. 3rd ed., Florida: Holt, Rinehart and Winston. 1991.
- [4] Ibrahim, M.A., Minaei, S., Kuntman, H.A. A 22.5 MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and grounded passive elements. International Journal of Electronics and Communication (AEU). 2005; 59:311-318.
- [5] Shah, N.A. and Malik, M.A. Voltage/current-mode universal filter using FTFN and CFA. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2005; 45:197-203.

- [6] Chang, C.M., Liao, T.S., Yu, T.Y., Lin, E.S., Teng, C.H., Hou, C.L. Novel universal current-mode filters using unity-gain cells. *International Journal of Electronics*. 2001; 86:929-932.
- [7] Wang, H.Y., Lee, C.T. Versatile insensitive current-mode universal biquad implementation using current conveyors. *IEEE Transaction on Circuits and Systems II*. 2005; 48:409-413.
- [8] Sharma, R.K., Senani, R. Universal current-mode biquad using a single CFOA. *International Journal of Electronics*. 2004; 91:175-183.
- [9] Tu, S.H., Chang, C.M., Liao, K.P. Novel versatile insensitive universal current-mode biquad employing two second-generation current conveyors. *International Journal of Electronics*. 2002; 89:897-903.
- [10] Keskin, A.Ü., Biolek, D., Hancioglu, E. Biolková, V. Current-mode KHN filter employing current differencing transconductance amplifiers. *International journal of electronics and Communications*. 2006; 60:443-446.
- [11] Prasada, D., Bhaskara D.R., Singh, A.K. Universal current-mode biquad filter using dual output current differencing transconductance amplifier. *International journal of electronics and Communications (AEU)*. 2008.
- [12] Soliman, A.M. New current mode filters using current conveyors. *International Journal of Electronics and Communication (AEU)*. 1997; 51:275-278.
- [13] Biolek, D., Biolková, V. Universal biquads using CDTA elements for cascade filter design. *Proceedings of the multiconference CICC*. 2003.
- [14] Tangsirat, W., Surakamponorn, W. Systematic realization of cascaded current-mode filters using CDTAs. *Frequenz*. 2006; 60:241-245.
- [15] Ozoguz, S., Toker A., Acar, C. Cascadable current-mode multipurpose filters employing current differencing buffered amplifier (CDBA). *International journal of electronics and Communications (AEU)*. 2000; 56:67-72.
- [16] Keskin, A.Ü., Hancioglu, E. Current-mode multifunction filter using two CDBAs. *International journal of electronics and Communications (AEU)*. 2005; 59:495-498.
- [17] Muhammed, A.I. Tunable current-mode two Thomas biquad based on CDTAs. ISBN: 978-0-9853483-3-5 @2013 SDIWC. 2013; 366-370.
- [18] Thomas, L.C. The biquad: part I – some practical design considerations. *Proc. IEEE Trans on Circuit Theory*. 1971; 18:350-357.
- [19] Thomas, L.C. The biquad: part II—a multipurpose active filtering system. *Proc IEEE Trans on Circuit Theory*. 1971; 18:358-361.
- [20] Biolek, D., Senani, R., Biolková, V., Kolka, Z. Active elements for analog signal processing: Classification, review, and new proposals. *Radioengineering*. 2008; 17:15-32.
- [21] Biolková, V. , Kolka, Z. , Biolek, D. Fully balanced voltage differencing buffered amplifier and its applications. In 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS'09. Cancun (Mexico) 2009: 45 – 48.
- [22] Frey, D.R. Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering, *IEEE Proceeding of Circuit Devices Systems*. 1993; 140:406-416.