

การสังเคราะห์และออกแบบโครงข่ายกรองความถี่หลายหน้าที่ โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเพียงอย่างเดียวด้วย CCCFTA

ชโลทร หลีเหลี่ยม¹, ณัฐพล สุดสอาด¹, กิตติวัฒน์ สมสุวรรณ¹, ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอโครงข่ายกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแสโดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟเพียงอย่างเดียว ที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ตอบสนองได้ 3 พังก์ชันที่จำเป็น ได้แก่ กรองความถี่ต่ำผ่าน สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน ซึ่งใช้หลักการของวงจรถิฟเฟอร์เรนซิเอเตอร์แบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Differentiator) โดยใช้อุปกรณ์สายพานกระแสตามความนำที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCFTA) และออปแอมป์ สามารถควบคุมความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยกระแสไบแอส โครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยใช้เพียง CCCFTA 3 ตัว และออปแอมป์ที่มีการชดเชยความถี่ภายใน 2 ตัว สมรรถนะของวงจรถองความถี่ที่นำเสนอถูกทดสอบผ่านการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้ผลการทดสอบวงจรที่ได้มีความสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

คำสำคัญ: โครงข่ายกรองความถี่, วงจรถิฟเฟอร์เรนซิเอเตอร์แบบไม่มีการสูญเสีย, วงจรสายพานกระแสตามความนำ

The Synthesis and Design of Multi-function Network Using only Active Devices Using CCCFTA

Chalotorn Lelem¹, NattapolSutsaart¹, GitwanunSomsuwan¹, Supawat Lawanwisut²

¹Department of Electrical Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University

²Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

Abstract

This article presents an active only current-mode multifunction filter network performing completely standard functions: low-pass, high-pass, band-pass, The circuit principle is based on active-only circuit design by using an differentiator which stems from CCCFTA cooperating with an internally compensated operational amplifier. 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 3 CCCFTAs and 2 operational amplifiers. The PSpice simulation results are shown. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords: filter network, Lossless Differentiator, CCCFTA

1. บทนำ

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายสาขา งานอิเล็กทรอนิกส์ระบบสื่อสาร ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด [1] โดยเฉพาะวงจรกรองความถี่ที่สามารถให้ผลตอบสนองการกรองความถี่ได้หลายหน้าที่ในโครงสร้างวงจรเดียวกัน หรือเรียกว่าวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในสาขาวิชาระบบเครือข่าย ที่ผ่านมามีวงจรกรองผ่านทุกความถี่นำเสนอโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟที่แตกต่างกัน [1-7] ได้มีนักวิจัยนำเสนอวงจรกรองความถี่มากมาย แต่งานวิจัยเหล่านั้นยังมีข้อด้อยดังต่อไปนี้ในวงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมาก [8-18] ต้องเปลี่ยนโครงสร้างวงจรเพื่อให้วงจรให้ผลตอบสนองได้หลายฟังก์ชัน [10-12,19-20] ไม่สามารถควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ [8-16] ไม่สามารถควบคุมค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้อย่างอิสระจากควอลิตี้โพล [21-23]

วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกที่ใช้ อุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม จะทำให้วงจรมีความซับซ้อน ชิปวงจรมีขนาดใหญ่ ทำให้ดึงกำลังไฟฟ้าสูง การปรับค่าของอุปกรณ์ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะสร้างวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกที่ใช้ อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว โดยไม่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟภายนอก [16,24-26] ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น วงจรไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้างเป็นวงจรรวม วงจรมีความแม่นยำสูง [27] จึงได้มีผู้นำเทคนิคการออกแบบวงจรโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว ในวงจรต่างๆ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ [26] วงจรกรองความถี่ [16] วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ [28] เป็นต้น

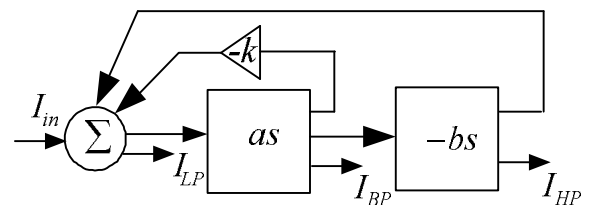
จากปัญหาที่ได้นำเสนอหลักการข้างต้น บทความวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอ โครงสร้างวงจรกรองความถี่ โหมดกระแสหลายหน้าที่ โดยใช้ CCCFTA ร่วมกับออปแอมป์ ซึ่งวงจรที่นำเสนอนี้ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟอย่าง

เดียว สามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์และค่าความถี่โพลได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่ได้ 3 ฟังก์ชันพร้อมกันคือ กรองความถี่ต่ำผ่าน สูงผ่าน แลบความถี่ผ่าน โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างใดๆของวงจร นอกจากนี้แล้ววงจรที่นำเสนอยังใช้อุปกรณ์น้อย ประกอบกับไม่ต้องการอุปกรณ์ใดที่มีความสมพ่วงกัน วงจรที่นำเสนอจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน หรือพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานของวงจรโดย PSpice แสดงถึงความสอดคล้องกับทฤษฎี

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การออกแบบโครงข่ายวงจรกรองความถี่

ออกแบบโครงข่ายวงจรกรองความถี่ ประกอบด้วย วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Differentiator) ต่อร่วมกับวงจรรวมสัญญาณ และ วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) โดยการจับบล็อกไดอะแกรมในลักษณะคาสเคดกัน ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการสังเคราะห์โครงข่ายวงจรกรองความถี่ [18]

$$\frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{\frac{1}{ab}}{s^2 + \frac{sk}{b} + \frac{1}{ab}} \quad (1)$$

$$\frac{I_{BP}}{I_{in}} = \frac{\frac{s}{b}}{s^2 + \frac{sk}{b} + \frac{1}{ab}} \quad (2)$$

$$\frac{I_{HP}}{I_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{sk}{b} + \frac{1}{ab}} \quad (3)$$

จากสมการที่ (1-3) สามารถหาความถี่โพลและควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ดัง สมการ (4-5)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{ab}}, \quad Q = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{b}{a}} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) พบว่าความถี่โพลและควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถปรับได้อย่างอิสระจากกัน โดยค่าความถี่โพลสามารถปรับได้จาก a หรือ b และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถปรับได้โดยค่า K

2.2 วงจร CCCFTA

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักหนึ่ง คือ CCCFTA หัวข้อนี้จึงขอกกล่าวถึง CCCFTA พอสังเขป ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของ CCCFTA แสดงด้วยสมการในเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้ [29]

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_z \\ I_{x+} \\ I_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & g_{m2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ V_z \\ V_{x+} \\ V_{x-} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

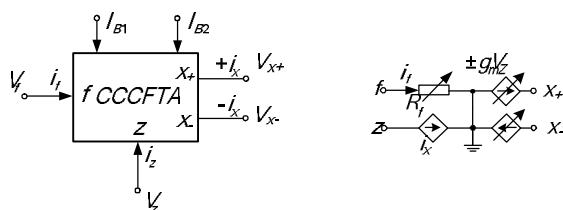
โดยที่ CCCFTA มีค่าความต้านทานแฝงทางด้านอินพุตของขา X คือ R_x มีค่าดังแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$R_x = \frac{V_T}{2I_B}, \quad (6)$$

ส่วนค่าขยายความนำถ่ายโอน g_m แสดงได้เป็น

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T}. \quad (7)$$

เมื่อ V_T คือค่าศักดาความร้อน และ คือค่ากระแสไบแอส มีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CCCFTA แสดงรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2 CCCFTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

2.3 ผลคูณอัตราขยายแบนด์วิธของออปแอมป์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีการขดเชยความถี่ภายในสามารถเขียนสมการฟังก์ชันส่งผ่าน : $A(s)$ ได้ดังนี้

$$A(s) = \frac{A_0 \omega_{p1}}{s + \omega_{p1}} = \frac{B}{s + \omega_{p1}}, \quad (8)$$

เมื่อ A_0 เป็นอัตราขยายไฟตรงขณะลูปเปิด ω_{p1} เป็นความถี่ของโพลตัวแรก B เป็นผลคูณอัตราขยายแบนด์วิธของออปแอมป์ซึ่งมีค่าเท่ากับ $A_0 \omega_{p1}$ เมื่อ $\omega \ll \omega_{p1}$ จะพบว่า [16,23-25]

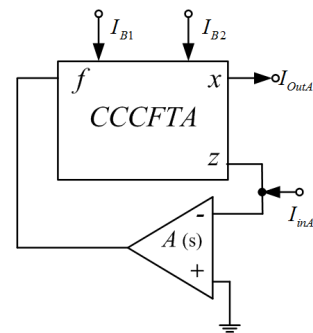
$$A(s) \cong \frac{B}{s}. \quad (9)$$

2.3 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์เตอร์และวงจรรขยายกระแส

การออกแบบวงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียใช้อุปกรณ์แอกทีฟ CCCFTA และออปแอมป์อย่างละหนึ่งตัว 1 วงจร ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

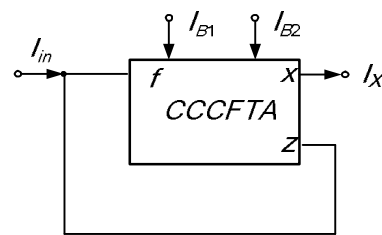
$$\frac{I_{OutA}}{I_{inA}} = sa \quad (10)$$

เมื่อ $a, b = \frac{R_x g_m}{B} \quad (11)$



รูปที่ 3 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีการสูญเสีย

การออกแบบวงจรรขยายกระแสจะใช้อุปกรณ์แอกทีฟ CCCFTA 1 ตัว ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้



รูปที่ 4 วงจรรขยายกระแส

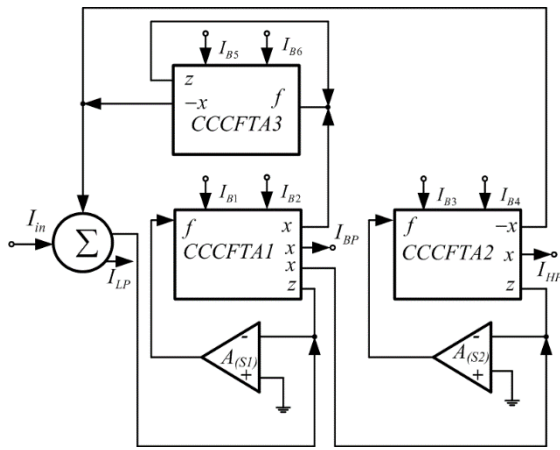
จากวงจรรูปที่ 3 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ วงจรขยายกระแสได้ดังสมการที่ (12)

$$I_{OA} = KI_{inA} \quad (12)$$

เมื่อ $K = g_m R_f / 2$

3. วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

โครงข่ายวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ที่ได้จากการ ออกแบบ ซึ่งผลตอบสนองความถี่ทางเอาต์พุต ประกอบด้วย ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรอง ผ่านความถี่ต่ำ ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ดังแสดงใน รูปที่ 5 และหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้



รูปที่ 5 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ที่นำเสนอ

$$\frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{\frac{B^2}{R_{f1}R_{f2}g_{m1}g_{m2}}}{s^2 + s \frac{R_{f3}g_{m3}}{2} \left(\frac{B}{R_{f2}g_{m2}} \right) + \left(\frac{B^2}{R_{f1}R_{f2}g_{m1}g_{m2}} \right)} \quad (13)$$

$$\frac{I_{BP}}{I_{in}} = \frac{\frac{sB}{R_{f2}g_{m2}}}{s^2 + s \frac{R_{f3}g_{m3}}{2} \left(\frac{B}{R_{f2}g_{m2}} \right) + \left(\frac{B^2}{R_{f1}R_{f2}g_{m1}g_{m2}} \right)} \quad (14)$$

$$\frac{I_{HP}}{I_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + s \frac{R_{f3}g_{m3}}{2} \left(\frac{B}{R_{f2}g_{m2}} \right) + \left(\frac{B^2}{R_{f1}R_{f2}g_{m1}g_{m2}} \right)} \quad (15)$$

จากสมการที่ (13-15) สามารถหาความถี่โพลและควอ ลิตีแฟกเตอร์ได้เป็น

$$\omega_0 = B \sqrt{\frac{1}{R_{f1}R_{f2}g_{m1}g_{m2}}}, \quad Q = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{R_{f2}g_{m2}}{R_{f1}g_{m1}}} \quad (16)$$

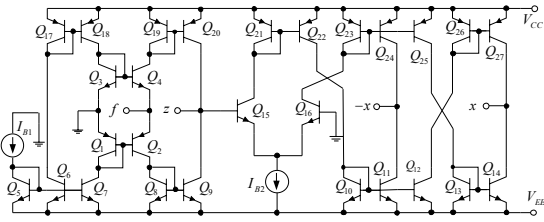
เมื่อ $R_{f1} = V_T / 2I_{B1}$, $R_{f2} = V_T / 2I_{B3}$, $R_{f3} = V_T / 2I_{B5}$, $g_{m1} = I_{B2} / 2V_T$, $g_{m2} = I_{B4} / 2V_T$, $g_{m3} = I_{B6} / 2V_T$ และ กำหนดให้ $B_2 = B_3 = B$ แทนค่าในสมการที่ (16) จะได้ดังนี้

$$\omega_0 = 4B \sqrt{\frac{I_{B1}I_{B3}}{I_{B2}I_{B4}}}, \quad Q = \frac{8I_{B5}}{I_{B6}} \sqrt{\frac{I_{B1}I_{B4}}{I_{B2}I_{B3}}} \quad (17)$$

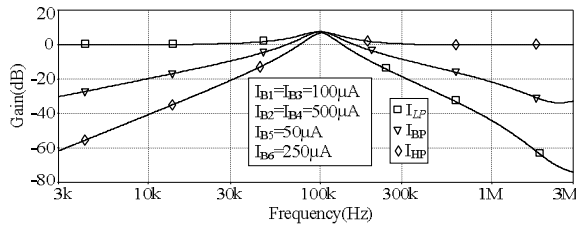
จากสมการที่ (17) ถ้ากำหนดให้ $I_{B1} = I_{B3}$ จะพบว่า สามารถใช้กระแสนี้ในการควบคุมค่า ω_0 โดยไม่ส่งผล กระทบต่อค่า Q_0 ในทำนองเดียวกัน หากปรับค่า I_{B5} หรือ I_{B6} ก็ใช้กระแสนี้ในการควบคุมค่า Q_0 ไม่ส่งผล กระทบต่อค่า ω_0 จึงสรุปว่า วงจรนี้ สามารถปรับค่าควอ ลิตีแฟกเตอร์และความถี่โพลของวงจรกรองความถี่ได้ด้วย วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นอิสระต่อกัน

4. ผลการจำลองการทำงาน

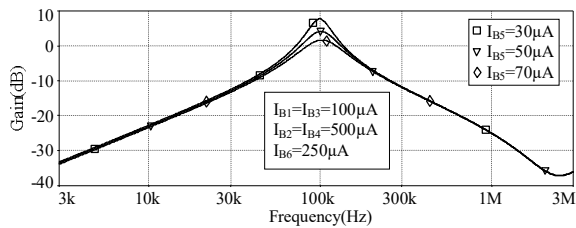
ทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการ ทำงานของวงจรผ่านโปรแกรม PSpice โดยใช้ ทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ในการจำลองการทำงาน ของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ [30] และออปแอมป์ เบอร์ MC1741 แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ $\pm 12V$ และมี โครงสร้างภายในแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อกำหนดค่า $I_{B1} = I_{B3} = 300\mu A$, $I_{B2} = I_{B4} = 500\mu A$, $I_{B5} = 50\mu A$ และ $I_{B6} = 250\mu A$ ผลการจำลองการทำงานของวงจร กรองความถี่ที่นำเสนอในรูป 7 เป็นการตอบสนองทาง ความถี่ของฟังก์ชันต่าง ๆ ส่วนในรูปที่ 8 ผลตอบสนองทาง ขนาดของฟังก์ชันกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลง ค่า I_{B5} ไว้ที่ $30\mu A$, $50\mu A$ และ $70\mu A$ ในรูปที่ 9 ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชันกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $I_{B1} = I_{B3}$ ไว้ที่ $30\mu A$, $50\mu A$ และ $70\mu A$ จากผลการจำลองพบว่า สามารถปรับค่าควอลิตี แฟกเตอร์และความถี่โพล ได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน สอดคล้องกับสมการที่ (17)



รูปที่ 6 โครงสร้างภายในของ CCCFTA

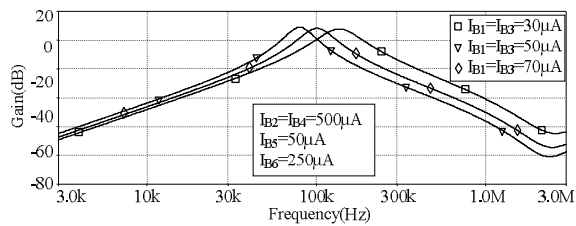


รูปที่ 7 ผลตอบสนองความถี่ของโครงข่ายที่นำเสนอ



รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางเฟสของฟังก์ชันกรองแถบ

ความถี่ผ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า I_{B5}



รูปที่ 9 ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชันกรองแถบ

ความถี่ผ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า I_{B1} และ I_{B3}

5. สรุปผล

บทความวิจัยนี้นำเสนอ การออกแบบโครงข่ายกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แอกทิฟเพียงอย่างเดียว แบบหลายหน้าที่โหมตกระแส สามารถตอบสนองฟังก์ชัน กรองความถี่ต่ำผ่าน สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน ที่นำเสนอประกอบไปด้วยเพียง CCCFA จำนวน 3 ตัว และออปแอมป์ที่มีการชดเชยความถี่ภายใน จำนวน 2 ตัว ซึ่ง

ปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟใดๆ โดยสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ และค่าความถี่โพลได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ได้อย่างอิสระต่อกันจากลักษณะเด่นดังที่ได้กล่าว จึงเหมาะสมกับการนำไปพัฒนาให้อยู่ในรูปของวงจรรวม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kumngern, and S. Junnapiya, "Tunable voltage-mode multifunction biquadratic filter with three inputs single output employing three single-ended OTAs and two capacitor," The 4th International Conference on Intelligent System Modeling and Simulation, 2013, pp. 642-645.
- [2] Y.H. Ghallab, M.A. El-Ela, and M. Elsaid, "A novel universal voltage-mode filter With three inputs and single output using only two operational floating current conveyor," The 12th International Conference on Microelectronics, 2000, pp. 95-98.
- [3] J.W. Horng, "High-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter using three plus-type CCIs," IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2001, pp. 996-997.
- [4] M. Sagbas, and M. Koksal, "An electronically tunable voltage-mode universal filter using two current conveyors," Research in Microelectronics and Electronics, 2006, pp. 137-140.
- [5] M. Kumngern, M. Somdunyanok, and P. Prommee, "High-input impedance voltage-mode multifunction filter with three-input single-output based on simple CMOS OTAs," IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, 2008, pp. 426-431.
- [6] W.Y. Chiu, and J.W. Horng, "High-input and low-output impedance voltage-mode

- universal biquadratic filter using DDCCs,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2007, pp. 649-652.
- [7] M. Kumngern, and S. Junnapiya, “Voltage-mode universal filter with three-input single-output using DDCCs,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2010, pp. 746-749.
- [8] N. A. Shah, and M. A. Malik, “Multifunction mixed-mode filter using FTFNs,” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 47, pp. 339-343, 2006.
- [9] N. Pandey, S. K. Paul, A. Bhattacharyya, and S. B. Jain, “A new mixed mode biquad using reduced number of active and passive elements,” IEICE Electron. Express, vol. 3, pp. 115-121, 2006.
- [10] C. L. Hou, C. C. Huang, Y. S. Lan, J. J. Shaw, and C. M. Chang, “Current-mode and voltage-mode universal biquads using a single current-feedback amplifier,” International Journal of Electronics, vol. 86, pp. 929-932, 1999.
- [11] N. A. Shah, and M. A. Malik, “Voltage/current-mode universal filter using FTFN and CFA,” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 45, pp. 197-203, 2005.
- [12] S. T. Liu, and J. L. Lee, “Insensitive current/voltage-mode filters using FTFNs,” Electronics Letters, vol. 32, pp. 1079-1080, 1996.
- [13] N. A. Shah, S. Z. Iqbal, and B. Parveen, “SITO high output impedance transadmittance filter using FTFNs,” Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 40, pp. 87-89, 2004.
- [14] C.L. Hou, and C.C. Lin, “A Filter with three voltage-inputs and one voltage-output and one current-output using current conveyors,” Tamkang Journal of Science and Engineering, vol. 7, pp. 145-148, 2004.
- [15] A. Toker, O. Çiçekoğlu, S. Özcan, and H. Kuntman, “High output impedance transadmittance type continuous time multifunction filter with minimum active elements,” International Journal of Electronics, vol. 88, pp. 1085-1091, 2001.
- [16] M. T. Abuelma’Atti, and A. Bentrchia, “Multi-function active-only current-mode filter with three input and one output,” International Journal of Electronics, vol. 85, pp. 431-435, 1998.
- [17] M. T. Abuelma’Atti, “A novel mixed-mode current controlled current conveyor based filter,” Active and Passive Electronic Components, vol. 26, pp. 185-191, 2003.
- [18] สมมาตร สุพรรณพงษ์, บัญชา ศรีวิโรจน์ และ ศุภวัฒน์ ลาวัญย์วิสุทธิ์ “วงจรกรองความถี่โหมดกระแสหลายหน้าที่ ที่ควบคุมด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ CCCII,”วารสารวิชาการเทพสตรี I-TECH ปีที่ 12 ฉบับที่ 1, หน้าที่ 81-87 , 2560.
- [19] J. Wu, and E. I. El-Masry, “Universal voltage and current-mode OTAs based biquads,” International Journal of Electronics, vol. 85, pp. 553-560, 1998.
- [20] D. R. Bhaskar, R. K. Sharma, A. K. Singh, and R. Senani, “New dual-mode biquads using OTAs,” Frequenz, vol. 60, pp. 246-252, 2006.
- [21] D. Birolek, and V. Biolkova, “CDTA-C current-mode universal 2nd-order filter,” Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications, pp. 411-414, 2003.
- [22] A. Ü., Keskina, D. Birolek, E. Hancioglu, and V. Biolková. “current-mode KHN filter employing current differencing

- transconductance amplifiers,” *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 60, pp. 443-446, 2006.
- [23] W. Tangsirat, T. Dumawipata, and W. Surakamponorn, “Multiple-input single-output current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifiers,” *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, pp. 209-214, 2007.
- [24] T. Tsukutani, M. Higashimura, Y. Sumi, and Y. Fuhui, “Electronically tunable current-mode active-only biquadratic filter,” *Int. J. Electron.*, vol. 87, pp. 307-314, 2000.
- [25] A. K. Singh and R. Senani, “Low-component-count active-only immittance and their application in realising simple multifunction biquads,” *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 718-719, 1998
- [26] มนตรี ศิริปรัชญานันท์, “วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นขายน้ชนิด ควอดเรเตอร์โหมตกระแสที่ใช้เพียงอุปกรณ์แอคทีฟและสามารถควบคุมความถี่ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), หน้าที่ 245-248, 2547.
- [27] T. Tsukutani, Y. Kinugasa, Y. Sumi, M. Higashimura, and Y. Fuhui, “Novel current-mode active-only biquad with loss-less and lossy integrators,” *Int. J. Electron*, vol. 90, pp. 627-633, 2003.
- [28] S. Minaei , O. Cicekoglu, H. Kuntman, and S. Turkoz, “Electronically tunable, active only floating inductance simulation,” *Int. J. Electron.*, vol. 89, no. 12, pp. 905–912, 2002.
- [29] N. Herencsar, j. Koton, K. Vrba, Lahiri, O. Cicekoglu, “Current Controlled CFTA-based Current-mode SITO Universal Filter and Quadrature Oscillator,” 2010 International Conferent on Applied Electronics (AE), 2010, pp.1-4.
- [30] D. R. Frey, “Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering,” *IEE Proceeding of Circuit Devices Systems*, vol.140, pp. 406-416, 1993.