**วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดันชนิดสามอินพุทหนึ่งเอาท์พุทโดยใช้วงจรโอทีเออย่างง่าย**

**Three-Input One-Output Voltage-Mode Universal Filter Using Simple OTAs**

พิชัย สุขใสบูลย์1 บุญยิ่ง นบนอบ1 และมนตรี คำเงิน2

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เสนอวงจรกรองความถี่ในโหมดแรงดันแบบสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วงจรโอทีเออย่างง่ายมาทำเป็นวงจรกรองความความถี่ วงจรที่นำเสนอสามารถสร้างการกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน แถบความถี่หยุดและผ่านทุกความถี่ได้ในวงจรเดียว การสร้างฟังก์ชันการกรองทั้งหมดไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์และไม่ต้องการอินพุทแบบกลับขั้วสัญญาณ ค่าความถี่และตัวประกอบคุณภาพสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกันด้วยแหล่งจ่ายกระแส วงจรกรองความถี่ที่เสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมPSPICE เพื่อยืนทฤษฎีที่เสนอ

**คำสำคัญ:** วงจรกรองความถี่ไบควอดราติก วงจรโหมดแรงดัน วงจรโอทีเอ วงจรประมวลผลสัญญาณอนาล็อก

**Abstract**

This paper presents a three-input one-output voltage-mode electronically tunable universal filter using only simple CMOS operational transconductance amplifiers. The proposed filter provides lowpass, highpass, bandpass, bandstop and allpass filters into one single topology. For realize all the filtering functions, no component-matching conditions and no inverting-type input signals are required. The natural frequency and the quality factor can be controlled orthogonally and electronically by adjusting the bias currents. The proposed filter is simulated using PSPICE simulators to confirm the presented theory.

**Keyword**: biquadratic filter, voltage-mode circuit, operational transconductance amplifier, analog signal processing

**1. บทนำ**

วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟมีความสำคัญสำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองความถี่สามารถนำไปใช้งาน เช่น ในคลอสโอเวอร์เน็ตเวิกคุณภาพสูง วงจรตรวจจับอัตราการเต้นของหัวใจ การถอดรหัสสัญญาณเสียงของโทรศัพท์ และ การกำจัดสัญญาณคลื่นพาห์ในเครื่องรับ [1]-[3] ดังนั้นจึงมีวงจรกรองความถี่นำเสนอมากมายในวารสารต่างๆ [4]-[15] ใน [4]-[8] นำเสนอวงจรกรองความถี่โดยใช้วงจรวงจรสายพานกระแส แต่วงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจรสายพานกระแสเหล่านี้ไม่สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวงจรรวม วงจรกรองความถี่ที่สามารถปรับได้ในทางอิเล็กทรอนิกส์มีข้อได้เปรียบเพราะสามารถปรับความถี่และตัวคุณภาพโดยใช้แรงดันหรือกระแส อย่างไรก็ตามมีวงจรกรองความถี่หลายวงจรที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เสนอใน [9]-[24] วงจรกรองความถี่โดยใช้วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสนำเสนอใน [9]-[10] วงจรกรองความถี่ใช้วงจรสายพานกระแสชนิดผลต่างนำเสนอใน   
[11]-[12] และวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจรสะท้อนกระแสนำเสนอใน [13] เป็นที่ทราบดีว่าวงจรโอทีเอเป็นวงจรมีความสามารถในการปรับค่าความนำในตัวมันได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านแรงดันไฟฟ้าหรือกระแส อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถสร้างได้ทั้งเทคโนโลยีไบโพล่าและซีมอส ยิ่งไปกว่านั้นวงจรที่ใช้วงจรโอทีเอเป็นวงจรพื้นฐานจะไม่ต้องการตัวต้านทานซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาสร้างเป็นวงจรรวม ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจรโอทีเอเป็นวงจรพื้นฐานนำเสนอไว้มากมายใน [14]-[24] เมื่อพิจารณาขั้วอินพุทและขั้วเอาท์พุท วงจรกรองความถี่เหล่านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกคือวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งอินพุทหลายเอาท์พุท [14]-[18] และแบบที่สองคือวงจรกรองความถี่แบบหลายอินพุทและหนึ่งเอาท์พุท [14]-[25] โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งอินพุทหลายเอาท์พุทเป็นวงจรที่สามารถสร้างการกรองความถี่ได้หลายแบบที่เอาท์พุท เช่น การกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter: LP) การกรองแถบความถี่ผ่าน (bandpass filter: BP) การกรองความถี่สูง (highpass filter: HP) การกรองแถบความถี่หยุด (bandstop filter: BS) และ การกรองผ่านทุกความถี่ (allpass filter: AP) เมื่อป้อนสัญญาณเข้าที่อินพุท สำหรับการกรองแบบหลายอินพุทและเอาท์พุทเดียวคือวงจรที่สร้างการกรองได้ด้วยการป้อนอินพุทอย่างเหมาะสมตามเงื่อนไข เปรียบเทียบวงจรกรองความถี่แบบอินพุทเดียวและหลายเอาท์พุท วงจรกรองความถี่แบบหลายอินพุทและหนึ่งเอาท์พุทจะใช้จำนวนอุปกรณ์แอ็กทีฟน้อยกว่า ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อเป็นวงจรกรองความถี่อันดับสูง (high-order filter) มากกว่าวงจรกรองแบบอินพุทเดียวหลายเอาท์พุท เพราะในการต่อใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่อันดับสูงเราอาจจะต้องการการกรองเพียงฟังก์ชันเดียว เช่น ต้องการการกรองแบบผ่านทุกความถี่อันดับสูงเพียงฟังก์ชันเดียว ซึ่งได้จากการต่อคาดเคดของวงจรกรองความถี่อันดับที่สอง ดังนั้นวงจรกรองแบบอินพุทเดียวหลายเอาท์พุทที่ได้ฟังก์ชันการกรองได้ครบแต่อาจจะไม่ถูกนำมาใช้งาน

บทความนี้เสนอวงจรกรองความถี่โหมดแรงดัน  
ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรด้วยวิถีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แบบสามอินพุทและหนึ่งเอาท์พุทโดยใช้โอทีเอห้าวงจร ตัวเก็บประจุสองตัว และ ตัวต้านทานหนึ่งตัว วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาสร้างเป็นวงจรรวมเมื่อใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์ วงจรที่นำเสนอสามารถให้ผลตอบสนองของการกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน แถบความถี่ผ่าน แถบความถี่หยุด และ ผ่านทุกความถี่โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจรและไม่ต้องการความสมพงษ์กันของอุปกรณ์ ค่าความถี่และค่าตัวประกอบคุณภาพสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSPICE สามารถยืนยันการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

**2. ทฤษฏี**

สัญลักษณ์วงจรโอทีเอแสดงดังรูปที่ 1 คุณสมบัติในทางอุดมคติสามารถแสดงได้คือ

 (1)

โดยที่ I0 คือกระแสเอาต์พุต gm คือค่าความนำ V1 คือขั้วอินพุตแบบไม่กลับเฟส และ V2 คือขั้วอินพุตกลับเฟส รูปที่ 2 แสดงวงจรบวกและลบแรงดันที่ใช้วงจรโอทีเอ สมมุติว่า OTA1 และ OTA2 คุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ แรงดัน Vo สามารถแสดงได้คือ [25]

 (2)



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของวงจรโอทีเอ



รูปที่ 2 วงจรบวกและลบแรงดันโดยใช้วงจรโอทีเอ

 (ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

(ข) ตัวต้านทานแบบมอส

วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 วงจรประกอบด้วยวงจรโอทีเอห้าวงจร ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัวและตัวต้านทานหนึ่งตัว การใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะสำหรับนำไปสร้างเป็นวงจรรวม [26] ถ้า Vin1 Vin2 และ Vin3 เป็นขั้วแรงดันของวงจร แรงดันเอาต์พุตของรูปที่ 3 สามารถเขียนได้คือ

 (3)

โดยที่ D(s)=s2C1C2+sC1R1gm2gm3+gm1gm2 จากสมการที่ (3) การกรองความถี่ทั้งห้าแบบสามารถกำหนดได้คือ

(1) การกรองความถี่ต่ำ Vin3=Vin Vin1=Vin2=0

(2) การกรองแถบความถี่ผ่าน Vin2=Vin Vin1=Vin3=0

(3) การกรองความถี่สูงผ่าน Vin1=Vin Vin2=Vin3=0

(4) การกรองแถบความถี่ Vin1=Vin3=Vin Vin2=0

(5) การกรองผ่านทุกความถี่ Vin1=Vin2=Vin Vin3=0

ดังนั้นวงจรที่นำเสนอสามารถสร้างการกรองความถี่ได้ห้าแบบในวงจรเดียวโดยไม่ต้องการคุณสมบัติความสมพงษ์กันของอุปกรณ์และสัญญาณอินพุตแบบกลับขั้ว ค่าพารามิเตอร์ ω0 และ Q สามารถแสดงได้คือ

 (4)

 (5)

สมการที่ 4 และ 5 ถ้ากำหนดให้ gm=gm1=gm2 ค่าพารามิเตอร์ ωo สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับ gm ด้วยกระแสไบอัส ส่วนค่า Q สามารถควบคุมได้โดยปรับ gm3 โดยกำหนดให้ C1=C2 gm1=gm2 และ R1 คงที่ ซึ่งหมายความว่าค่าพารามิเตอร์ ωo และ Q สามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกัน ค่าความไวของพาสซีฟและแอ็กทีฟต่อค่าพารามิเตอร์ ω0 และ Q แสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความไวของพาสซีฟและแอ็กทีฟต่อค่าพารามิเตอร์ ω0 และ Q มีค่าไม่เกินหนึ่งเท่า ดังนั้นไวของพาสซีฟและแอ็กทีฟต่อค่าพารามิเตอร์อยู่ในระดับที่ต่ำ

ตารางที่ 1 ค่าความไวของอุปกรณ์ค่าพารามิเตอร์ ω0 และ Q

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| X |  |  |
| C1 | -0.5 | -0.5 |
| C2 | -0.5 | 0.5 |
| R1 | 0.0 | -1.0 |
| gm1 | 0.5 | -0.5 |
| gm2 | 0.5 | 0.5 |
| gm3 | 0.0 | -0.1 |



รูปที่ 4 วงจรโอทีเอที่ใช้ในบทความนี้

วงจรโอทีเอที่สร้างด้วยเทคโนโลยีซีมอสแสดงได้ดังรูปที่ 4 ถ้าสมมุติว่าทรานส์ซิสเตอร์ M1 และ M2 มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการและทำงานในย่านอิ่มตัว ส่วนทรานซิสเตอร์ M3 และ M4 มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่าความนำ(gm) สามารถเขียนได้คือ

 (6)

โดยที่ Iabc คือกระแสไบอัส µn คือค่าความคล่องตัวของพาหะ Cox คือค่าประจุไฟฟ้าของอ๊อกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่ W และ L เป็นช่องความกว้างและความยาวของแชนแนล ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 ตัวต้านทาน R1 สามารถแทนด้วยตัวต้านทานแบบมอสดังรูปที่ 3(ข) [27] ถ้าสมมุติว่า MR1 และ MR2 มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการและทำงานในช่วงอิ่มตัว ค่าความต้านทานสามารถกำหนดได้คือ

 (7)

โดยที่ K=µnCox(W/L) VTH คือค่าแรงดันแทรชโฮล และ VDD=|VSS| คือแหล่งจ่ายแรงดัน

**3. ผลการจำลอง**

วงจรกรองความถี่ที่เสนอในรูปที่ 3 ได้ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ด้วยเทคโนโลยีซีมอส 0.35 µm จากTSMC วงจรโอทีเอในรูปที่ 4 ถูกออกแบบโดยใช้อัตราส่วน W/L = 10µm/1µm สำหรับ PMOS ทุกตัว อัตราส่วน W/L = 5µm/1µm สำหรับ NMOS ทุกตัว [24] และ อัตราส่วน W/L = 1µm/1µm สำหรับ MR1 และ MR2 (R1≈6.7kΩ) กำหนดแหล่งจ่ายแรงดัน VDD = -VSS = 1.65 V และ แหล่งจ่ายกระแสสำหรับ OTA5 และ OTA6 เท่ากับ 20 µA สำหรับตัวอย่างการออกแบบกำหนดตัวเก็บประจุ C1 = C2   
= 10 µF กระแสไบอัส Iabc1 =Iabc2 =50 µA (gm≈181.97µS) Iabc3 = 37 µA จากการออกแบบจะทำให้ได้ค่า *f*o = 2.89 MHz และ Q ≅ 1 รูปที่ 5 แสดงผลตอบสนองความถี่ของการกรองความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน และ แถบความถี่หยุด จากรูปความถี่ *f*o วัดได้มีค่าเท่ากับ 2.71 MHz รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองของขนาดและเฟสของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ จะเห็นได้จากรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถสร้างการกรองได้ครบทั้งห้าแบบในวงจรเดียว รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองแถบความถี่ผ่านเมื่อปรับค่ากระแส Ib (เมื่อ Ib = Iabc1 = Iabc2) มีค่าเป็น 1 5 20 และ 100 µA ตามลำดับ และ กำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุ C1 = C2 = 10 µF ผลการจำลองนี้เพื่อยืนยันสมการที่ (4)



รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางขนาดของ LP HP BP และ BS



รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ AP



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางขนาดของ BP เมื่อปรับค่า Ib



รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางขนาดของ BP เมื่อปรับค่า Iabc3

รูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านเมื่อปรับค่ากระแส Iabc4 มีค่าเป็น 3 5 20 และ 50 µA ตามลำดับ ผลการจำลองนี้เพื่อยืนยันสมการที่ (5)

**4.สรุป**

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่ที่ทำงานในโหมดแรงดันแบบสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจรโอทีเอแบบเอาต์พุตเดียว วงจรที่นำเสนอใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัวซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาสร้างเป็นวงจรรวม วงจรที่นำเสนอสามารถมารถสร้างการกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน แถบความถี่หยุดและผ่านทุกความถี่ได้ในวงจรเดียวโดยขั้วอินพุตที่มีอิมพิแดนซ์สูง   
ไม่ต้องอาศัยความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์และไม่จำเป็นต้องการอินพุทสัญญาณแบบกลับขั้วสัญญาณ ค่าพารามิเตอร์ ωo และ Q สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระจากกันและด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำเสนอจะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

**5. เอกสารอ้างอิง**

[1] W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, S. M. Durbin, Engineering Circuit Analysis, New York, McGraw-Hill, 2002.

[2] C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, Fundamental of Electric Circuits, New York, McGraw-Hill, 2004.

[3] S.-Y. Lee, C.-J. Cheng, “Systematic design and modeling of a OTA-C filter for portable ECG detection,” IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 3, pp. 53-64. 2009.

[4] S. Yichuang, J. K. Fidler, “Some desing methods of OTA-C and CCII-RC filters,” in Proceedings of IEE Colloquium on Digital and Analogue Filters and Filtering Systems, England 1993, pp. 7/1-7/8.

[5] J.-W. Horng, C.-C. Tsai, M.-H. Lee, “Novel universal voltage-mode universal biquad filter with three inputs and one output using only two current conveyors,” International Journal of Electronics, vol. 80, pp. 543-546, 1996.

[6] J.-W. Horng, “High-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter using three plus-type CCIIs,” IEEE Transactions on Circuits and System-I, vol. 48 pp. 996-997, 2001.

[7] C.-M. Chang, “Universal voltage-mode filter with four inputs and one output using two CCII+s,” International Journal of Electronics, vol. 86, pp. 305-309, 1999.

[8] J.-W. Horng, C.-H. Hsu, C.-Y. Tseng, “High input impedance voltage-mode universal biquadratic filters with three inputs using three CCs and grounding capacitors,” Radioengineering, vol. 21, pp. 290-296, 2012.

[9] M. T. Abuelma’atti, N. A. Tasadduq, “Universal current-controlled current-mode filter using the multiple-output translinear current conveyor,” Frequenz, vol. 52, pp. 252-254, 1998.

[10] M. Kumngern, W. Jongchanavawat, K. Dejhan, “New electronically tunable current-mode universal biquad filter using translinear current conveyors,” International Journal of Electronics, vol. 97, pp. 511-523, 2010.

[11] D. Biolek, V. Biolkova, “CDTA-C current-mode universal 2nd order filter,” in Proceeding of the 5th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications, Malta, 2005, pp. 411-414

[12] D. Biolek, V. Biolkava, Z. Kolka, “Current-mode biquad employing single CDTA,” Indian Journal of Pure & Applied Physics, vol. 47, pp. 535-537, 2009.

[13] C. Laoudias, C. Psychalinos, “Universal biquad filter topology using low-voltage current mirrors,” International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 40, pp. 65-75, 2012.

[14] P. V. A. Mohan, “Generation of OTA-C filter structures from active RC filter structures,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 37, pp. 656-660, 1990.

[15] C. M. Chang, “New multifunction OTA-C biquads,” IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, vol. 46, pp. 820-824, 1999.

[16] T. Tsukutani, M. Higashimura, N. Takahashi, Y. Sumi, Y. Fukui, “Novel voltage-mode biquad without external passive element,” International Journal of Electronics, vol. 88, pp. 13-22, 2001.

[17] J.-W. Horng, “Voltage-mode universal biquadratic filter with one input and five outputs using OTAs,” International Journal of Electronics, vol. 89, pp. 729-737, 2002

[18] M. Kumngern, P. Suwanjan, K. Dejhan, “Electronically tunable voltage-mode universal filter with single-input five-output using simple OTAs,” International Journal of Electronics, vol. 100, pp. 1118-1133, 2013.

[19] T. Tsukutani, M. Higashimura, N. Takahashi, Y. Sumi, Y. Fukui, “Voltage-mode active-only biquad,” International Journal of Electronics, vol. 87, pp. 1435-1442, 2000.

[20] T. Tsukutani, M. Higashimura, N. Takahashi, Y. Sumi, Y. Fukui, “Versatile voltage-mode active-only biquad with lossless and lossy integrator loop,” International Journal of Electronics, vol. 88, pp. 1093-1101, 2001.

[21] M. T. Abuelma’atti and A. Bentrcia, “A novel mixed-mode OTA-Cuniversal filter,” International Journal of Electronics, vol. 92, pp. 375–383, 2005.

[22] H.-P. Chen, S.-S. Shen, J.-P. Wang “Electronically tunable versatile voltage-mode universal filter,” International Journal of Electronics and Communications, vol. 62, pp. 316-319, 2008.

[23] M. Kumngern, B. Knobnob, K. Dejhan, “Electronically tunable high-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter based on simple CMOS OTAs,” International Journal of Electronics, vol. 64, pp. 934-939, 2010.

[24] S.-H. Tu, C.-M. Chang, J. N. Ross, and M. N. S. Swamy, “Analytical synthesis of current-mode high-order single-ended-input OTA and equal-capacitor elliptic filter structures with the minimum number of components” IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, vol. 54, pp. 2195-2210, 2007.

[25] R. R. Torrance, T. R. Viswanathan, J. V. Hanson, “CMOS voltage to current transducers,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. CAS-32, pp. 1097-1104, 1985.

[26] M. Bhusan, R. W. Newcomb, “Grounding of capacitors in integrated circuits,” Electronics Letters, vol. 3, pp. 148-149, 1967.

[27] Z. Wang, “2-MOSFET transistor with extremely low distortion for output reaching supply voltage,” Electronics Letters, vol. 26, pp. 951-952, 1990.