

## วงจรกรองผ่านทุกความถี่โหมตแรงดันอันดับที่หนึ่งที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจร DDCCTA วงจรเดียว

วิทวัส มงคล<sup>1\*</sup> และ มนตรี คำเงิน<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับที่หนึ่งทำงานในโหมตแรงดันโดยใช้วงจร DDCCTA หนึ่งวงจร และตัวเก็บประจุหนึ่งตัว สามารถปรับค่าความถี่เชิงมุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร DDCCTA ผ่านกระแสไบอัส การสร้างผลการตอบสนองแบบผ่านทุกความถี่

ไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ คุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอสามารถแสดงได้โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันทฤษฎีที่นำเสนอ

**คำสำคัญ:** วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับที่หนึ่ง วงจรโหมตแรงดัน วงจร DDCCTA

<sup>1</sup> นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-7559-0677 อีเมล: titikaka\_awake@hotmail.com



## Electronically Tunable Voltage Mode First-order All-pass Filter Using a Single DDCCTA

Vittawat Mongkol<sup>1\*</sup> and Montree Kumngern<sup>2</sup>

### Abstract

This paper presents a new voltage-mode, first-order, all-pass filter using one differential difference current conveyor transconductance amplifier and one capacitor. The pole frequency of the filter can be controlled electronically by adjusting the transconductance value through the biasing current. For realizing a first-order all-pass response, no component-matching

condition is required. The characteristics of the proposed filter can be confirmed by using PSPICE simulators.

**Keywords:** First-order, All-pass Filter, Voltage-mode Circuit, Differential Difference Current Conveyor Transconductance Amplifier (DDCCTA)

<sup>1</sup> Student, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

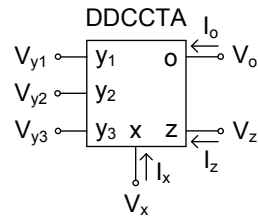
\* Corresponding Author, Tel. 08-7559-0677, E-mail: titikaka\_awake@hotmail.com

## 1. บทนำ

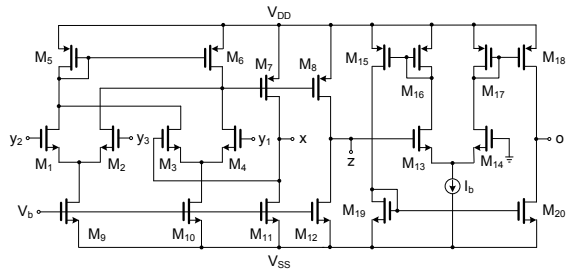
วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากมาย ตัวอย่างเช่น สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรกำเนิดสัญญาณ สร้างเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่า Q สูง หรือประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรมอดูเลตทางเฟส ที่ผ่านมามีวงจรกรองผ่านทุกความถี่นำเสนอโดยใช้อุปกรณ์แฉีกที่ฟที่แตกต่างกัน [1]-[9] [1] วงจรกรองผ่านทุกความถี่โดยใช้โอปแอมป์เป็นวงจรพื้นฐานจะทำงานได้ที่ความถี่ที่จำกัด นอกจากนี้โอปแอมป์เป็นวงจรขนาดใหญ่และซับซ้อนซึ่งเมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรรวมจะใช้พื้นที่ชิปมาก ดังนั้นมีความพยายามออกแบบวงจรกรองผ่านทุกความถี่โดยใช้อุปกรณ์แฉีกที่ฟแบบอื่นๆ เช่น ใช้วงจร CCII [2]-[4] ใช้วงจร CCIII [5] ใช้วงจร DVCC [6] ใช้วงจร DDCC [7] ตลอดจนกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน แต่วงจรเหล่านั้นไม่สามารถปรับค่าความถี่ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่สามารถปรับค่าความถี่ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้โดยใช้วงจร CCCII เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน [8],[9] แต่วงจรดังกล่าวใช้โอปแอมป์และพาสซีฟมากเกินไป นอกจากนี้การสร้างการตอบสนองแบบผ่านทุกความถี่ของบางวงจรยังต้องการเงื่อนไขความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น กำหนดให้  $R_1$  เท่ากับ  $R_2$  ใน [9] เป็นต้น

เมื่อเร็วๆ นี้ วงจรแฉีกที่ฟชนิดใหม่เรียกว่าวงจร DDCCTA ได้ถูกนำเสนอ [10] วงจรชนิดนี้ได้รวมเอาข้อดีของวงจร DDCC เช่น สามารถสร้างฟังก์ชันบวกและลบแรงดันได้โดยง่าย และวงจรทรานส์คอนดักเตอร์ เช่น ปรับค่าทรานส์คอนดักแทนซ์ได้ด้วยกระแสไบอัสเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาวงจร DDCCTA มาออกแบบเป็นวงจรกรองความถี่นำเสนอ [11],[12] แต่ยังไม่มีการนำเอาวงจร DDCCTA มาออกแบบเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านอันดับที่หนึ่ง

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับที่หนึ่งโดยใช้วงจร DDCCTA เป็นวงจรพื้นฐาน



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของวงจร DDCCTA



รูปที่ 2 วงจร DDCCTA สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

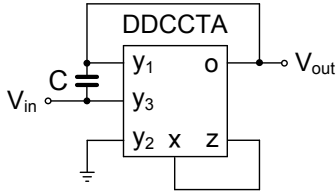
วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร DDCCTA หนึ่งวงจร และตัวเก็บประจุหนึ่งตัว การสร้างการตอบสนองแบบผ่านทุกความถี่ไม่ต้องการเงื่อนไขความสมพงษ์กันของอุปกรณ์ ความถี่เชิงมุมของวงจรสามารถปรับค่าได้ด้วยกระแสไบอัส วงจรที่นำเสนอจะถูกตรวจสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันทฤษฎีที่นำเสนอ

## 2. วงจรที่นำเสนอ

สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจร DDCCTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 คุณสมบัติของวงจร DDCCTA ที่เป็นอุดมคติสามารถแสดงได้คือ

$$\left. \begin{aligned} I_{y1} = I_{y2} = I_{y3} = 0 \\ V_x = V_{y1} - V_{y2} + V_{y3} \\ I_z = I_x \\ I_o = g_m V_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

วงจร DDCCTA ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2 ถ้าสมมติว่า  $M_{13}$  และ  $M_{14}$  มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ และทำงานในช่วงอิมิตัว



รูปที่ 3 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอ

ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร DDCCTA สามารถกำหนดได้คือ

$$g_m = \sqrt{\mu C_{ox} (W/L) I_b} \quad (2)$$

โดยที่  $I_b$  คือกระแสไบอัส  $\mu$  คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน  $C_{ox}$  คือค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์  $W$  และ  $L$  คือค่าความกว้างและความยาวของแชนแนล ตามลำดับ จากสมการที่ (2) จะเห็นได้ว่าค่าทรานส์คอนดักแตนซ์  $g_m$  สามารถปรับค่าได้ด้วยกระแสไบอัส  $I_b$  โดยมีความสัมพันธ์กันในแบบรากที่สอง

วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอใช้วงจร DDCCTA หนึ่งวงจร และตัวเก็บประจุตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ถึงแม้ว่าวงจรที่นำเสนอจะใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยตัวแต่ในทางปฏิบัติ ถ้าใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าไม่เกิน 50 pF ตัวเก็บประจุแบบลอยตัวนี้สามารถสร้างได้ในวงจรรวม [13] การไม่ใช้ตัวต้านทานทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมมากยิ่งขึ้น เมื่อใช้สมการที่ (1) ค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ในรูปที่ 3 สามารถแสดงได้คือ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{sC - g_m}{sC + g_m} \quad (3)$$

ดังนั้นค่าความถี่เชิงมุม ( $\omega_0$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{g_m}{C}$$

และเฟสสามารถหาได้จาก

$$\phi = \pi - 2 \tan^{-1} \left( \frac{\omega C}{g_m} \right) \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และ (5) ค่าความถี่เชิงมุมสามารถปรับค่าได้ด้วย  $g_m$  ผ่านกระแสไบอัส  $I_b$  ดังนั้นจึงเรียกว่าวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และจากสมการที่ (5) สามารถแสดงได้ว่าค่าเฟสของวงจรสามารถปรับได้อยู่ระหว่างจาก  $\pi$  ถึง 0 องศา

### 3. วิเคราะห์คุณสมบัติของวงจร

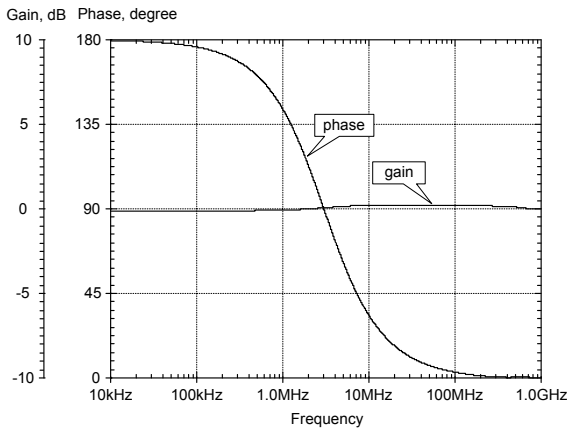
ความไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจร DDCCTA สามารถเขียนได้คือ

$$\left. \begin{aligned} I_{y1} = I_{y2} = I_{y3} = 0 \\ V_x = \beta_1 V_{y1} - \beta_2 V_{y2} + \beta_3 V_{y3} \\ I_z = \alpha I_x \\ I_o = g_{mi} V_z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

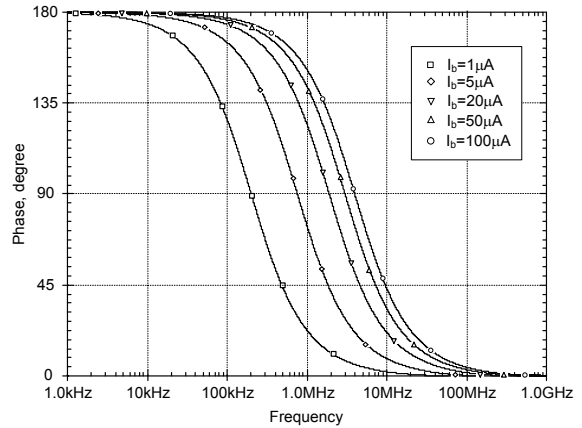
เมื่อ  $\beta_1(s) = \beta_1 = 1 - \varepsilon_{1v}$  และ  $\varepsilon_{1v} (|\varepsilon_{1v}| \ll 1)$  คือค่าความผิดพลาดของแรงดันระหว่าง  $V_{y1}$  และ  $V_x$  ในขณะที่  $\beta_2(s) = \beta_2 = 1 - \varepsilon_{2v}$  และ  $\varepsilon_{2v} (|\varepsilon_{2v}| \ll 1)$  คือค่าความผิดพลาดของแรงดันระหว่าง  $V_{y2}$  และ  $V_x$  ส่วน  $\beta_3(s) = \beta_3 = 1 - \varepsilon_{3v}$  และ  $\varepsilon_{3v} (|\varepsilon_{3v}| \ll 1)$  คือค่าความผิดพลาดของแรงดันระหว่าง  $V_{y3}$  และ  $V_x$  และค่า  $\alpha$  คือค่าความผิดพลาดของกระแสระหว่าง  $I_z$  และ  $I_x$   $g_{mi}$  คือทรานส์คอนดักแตนซ์ที่ไม่เป็นอุดมคติ โดย  $g_{mi} \cong g_m (1 - \mu s)$  เมื่อ  $\mu = 1/\omega_g$  และ  $\omega_g$  คือค่าโพลอันดับที่หนึ่งของทรานส์คอนดักเตอร์ เมื่อการใช้สมการที่ (6) ค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของรูปที่ 3 เขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{sC - \beta_3 g_{mi}}{sC + \beta_1 g_{mi}} \quad (7)$$

ค่าความผิดพลาดของวงจร DDCCTA จะมีผลทำให้สมการการกรองผ่านทุกความถี่ผิดพลาดไปจากอุดมคติ



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟส



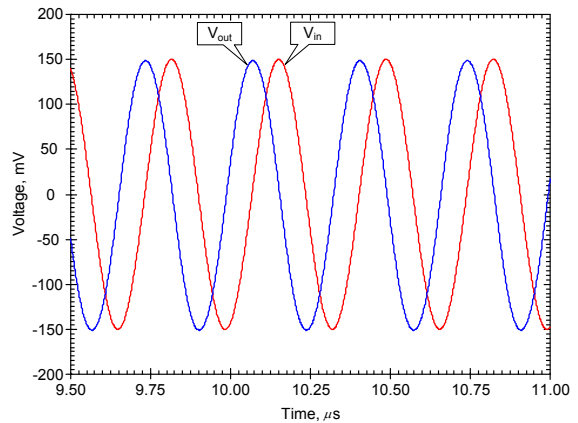
รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อปรับค่า  $I_b$

#### 4. การจำลองการทำงาน

วงจรรองความถี่ที่นำเสนอในรูปที่ 3 จะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้วงจร DDCCTA ในรูปที่ 2 ที่ออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ซีมอส 0.35  $\mu\text{m}$  จาก TSMC อัตราส่วน W/L แสดงได้ดังตารางที่ 1 กำหนดแหล่งจ่าย  $V_{DD}$  และ  $-V_{SS}$  เท่ากับ 1.65 V แรงดันไบอัส  $V_b$  เท่ากับ -0.76 V สำหรับตัวอย่างการออกแบบกำหนดค่า C เท่ากับ 10 pF รูปที่ 4 แสดงการตอบสนองทางขนาดและเฟสของวงจรรองความถี่เมื่อกำหนดค่ากระแสไบอัส  $I_b = 50 \mu\text{A}$  ( $g_m = 186.25 \mu\text{S}$ ) จากรูปที่เฟส 90 องศา ค่าความถี่  $f_0$  มีค่าเท่ากับ 2.98 MHz ในขณะที่ค่าทางทฤษฎีคือ 2.96 MHz ค่าที่ได้จากการจำลองผิดพลาดจากค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากผลของความไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรรองความถี่ DDCCTA ซึ่งได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (7) และวงจรมีค่าการใช้กำลังงานรวมเท่ากับ 1 mW

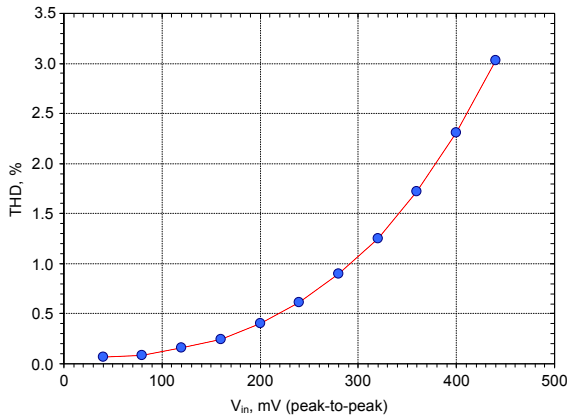
ตารางที่ 1 ค่า W/L ของมอสในวงจรของ DDCCTA

ทรานซิสเตอร์	W/L (um)
$M_1$ - $M_4$ , $M_9$ - $M_{12}$ , $M_{15}$ - $M_{18}$	10/1
$M_5$ - $M_8$	20/1
$M_{13}$ - $M_{14}$ , $M_{19}$ - $M_{20}$	5/1



รูปที่ 6 รูปคลื่นอินพุตและเอาต์พุตเมื่อป้อนอินพุตความถี่ 2.98 MHz ขนาด  $300\text{mV}_{p-p}$

รูปที่ 5 แสดงผลตอบสนองทางเฟสเมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่า  $I_b$  มีค่าเท่ากับ 1, 5, 20, 50 และ  $100 \mu\text{A}$  จากรูปที่มุม 90 องศา ค่า  $f_0$  มีค่าเท่ากับ 0.19, 0.75, 1.89, 2.99 และ 3.95 MHz ตามลำดับ จากรูปที่ 5 เห็นได้ว่าค่าของ  $f_0$  จะเปลี่ยนแปลงเป็นค่าต่างๆ เมื่อปรับค่ากระแส  $I_b$  เป็นค่าต่าง รูปที่ 6 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเมื่อป้อนสัญญาณขนาด  $300 \text{mV}_{p-p}$  ความถี่ 2.98 MHz เข้าที่อินพุตของวงจรรองความถี่ จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตหน้าสัญญาณอินพุตอยู่ 90 องศา ผลการจำลองนี้ยืนยันโดยสมการที่ (5) รูปที่ 7 ค่า THD



รูปที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของวงจรเมื่อป้อนความถี่ 2.98 MHz และแอมพลิจูดขนาดต่างๆ

(Total Harmonic Distortion) ของวงจรเมื่อป้อนสัญญาณความถี่ 2.98 MHz และปรับค่าแอมพลิจูดเป็นค่าต่างๆ จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ THD มีค่า 1.1% เมื่ออินพุตมีค่าเท่ากับ 300 mV<sub>p-p</sub> และจะเพิ่มเป็น 2.3% เมื่ออินพุตมีค่าเท่ากับ 400 mV<sub>p-p</sub>

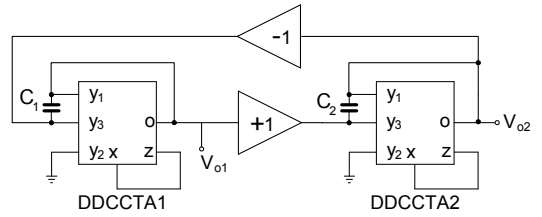
### 5. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

รูปที่ 8 แสดงวงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่สร้างขึ้นจากวงจรกรองผ่านทุกความถี่โดยวงจรกรองผ่านทุกความถี่สองวงจร เนื่องจากวงจรมีความต้านทานทางเอาท์พุทไม่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้บัฟเฟอร์สองวงจร สมการลูปเกนสามารถแสดงได้คือ

$$\left( \frac{g_{m1} - sC_1}{g_{m1} + sC_1} \right) \left( \frac{sC_2 - g_{m2}}{sC_2 + g_{m2}} \right) = 1 \quad (8)$$

ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการ ความถี่ของการออสซิลเลตสามารถกำหนดได้คือ

$$\omega = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (9)$$



รูปที่ 8 วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้วงจรกรองผ่านทุกความถี่

โดยที่ค่า  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร DDCCTA วงจรที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าวงจรออสซิลเลเตอร์สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร DDCCTA

### 6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจร DDCCTA หนึ่งวงจร และตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ค่าความถี่เชิงมุมของวงจรสามารถปรับค่าได้ด้วยกระแสไบอัสที่ไบอัสให้กับวงจร DDCCTA ค่าการตอบสนองแบบผ่านทุกความถี่สามารถสร้างได้โดยไม่ต้องใช้เงื่อนไขความสมพ้องกันของอุปกรณ์ ทฤษฎีและคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอสามารถยืนยันได้โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ถึงแม้ว่าในการประยุกต์ใช้งานวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอจะต้องการวงจรบัฟเฟอร์แต่วงจรให้เฟสเป็นที่น่าพอใจ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวงจรคือ วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. M. Soliman, "Realization of operational amplifier all pass network," *Electronics Letters*, vol. 9, pp. 67-68, 1978.
- [2] O. Cicekoglu, H. Kuntman, and S. Berk, "All-pass using a single current conveyor," *International Journal of Electronics*, vol. 86, pp. 947-955, 1999.
- [3] I. A. Khan and S. Maheshwari, "Simple first-order



- section using a single CCII,” *International Journal of Electronics*, vol. 87, pp. 303-306, 2000.
- [4] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, W.-Y. Chung, H.-L. Liu, and C.-T. Lin, “High output impedance current-mode first-order allpass networks with four grounded components and two CCII,” *International Journal of Electronics*, vol. 93, pp. 621-631, 2006.
- [5] S. Maheshwari and I. A. Khan, “Novel first order all-pass sections using a single CCIII,” *International Journal of Electronics*, vol. 88, pp. 773-778, 2001.
- [6] S. Minaei and M. A. Ibrahim, “General configuration for realizing current-mode first-order all-pass filter using DVCC,” *International Journal of Electronics*, vol. 92, pp. 347-356, 2005.
- [7] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, Y.-T. Lin, I.-C. Shiu, and W.-Y. Chiu, “First-order allpass filter and sinusoidal oscillators using DDCCs,” *International Journal of Electronics*, vol. 93, pp. 457-466, 2006.
- [8] N. Pandey and S. K. Paul, “All-pass filters based on CCII- and CCCII-,” *International Journal of Electronics*, vol. 91, pp. 485-489, 2004.
- [9] S. Minaei and O. Cicekoglu, “A resistorless realization of the first-order all-pass filter,” *International Journal of Electronics*, vol. 93, pp. 177-183, 2006.
- [10] N. Pandey and S. K. Paul, “Differential difference current conveyor transconductance amplifier: a new analog building block for signal processing,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2011, Article ID 361384.
- [11] W. Tangsrirat and O. Channumsin, “High-input impedance voltage-mode multifunction filter using a single DDCCCTA and grounded passive elements,” *Radioengineering*, vol. 20, pp. 905-910, 2011.
- [12] O. Channumsin, T. Pukkalanun, and W. Tangsrirat, “Voltage-mode universal filter with one input and five outputs using DDCCCTAs and all-grounded passive components,” *Microelectronics Journal*, vol. 43, pp. 555-561, 2012.
- [13] R. Schaumann, M. S. Ghausi, and K. R. Laker, *Design of analog filters*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.