วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26 ฉบับที่ 2 พ.ค.–ส.ค. 2559
The Journal of KMUTNB., Vol. 26, No. 2, May.–Aug. 2016

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิ โดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ใช้ DO-CCTA

มนตรี ศิริปรัชญานันท์*
รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-1845-2767 อีเมล: montree.s@fte.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.07.018
รับเมื่อ 18 พฤษภาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 7 กรกฎาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 15 มีนาคม 2559
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิโดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ใช้อุปกรณ์ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก จำนวน 3 ตัว ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์อีก 6 ตัว ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ สามารถควบคุมค่าความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นอิสระจากกันและไม่มีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอก ทำให้วงจรที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นมานี้ มีความสะดวกและง่ายต่อทั้งในการนำไปต่อใช้งานหรือมีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมและประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ หรือควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์/โปรเซสเซอร์ได้ ผลการทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice โดยกำหนดให้วงจรทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยง ±1.5 V พบว่าวงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์แบบ 2 เอาต์พุต ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา โดยมีค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} เท่ากับ 5.39% และ 3.59% ตามลำดับ ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 119 kHz ค่าความถี่ของวงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.106%/°C โดยที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต 1 และ 2 ของวงจร จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 16.558%/°C และ 25.168%/°C ตามลำดับ ซึ่งได้ผลสอดคล้องตามทฤษฎีที่คาดไว้ โดยมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าที่ 11.4 mW

คำสำคัญ: วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ แรงดันเป็นกระแส DO-CCTA

การอ้างอิงบทความ: มนตรี ศิริปรัชญานันท์, "วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิ โดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ใช้ DO-CCTA," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 2, หน้า x–x, พ.ค.–ส.ค. 2559

A Temperature-insensitive Sinusoidal Quadrature Oscillator with Using Principle of Voltage to Current Conversion based on DO-CCTA

Montree Siripruchyanun*
Associate Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Moungkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-1845-2767, E-mail: montree.s@fte.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.07.018
Received 18 May 2015; Accepted 7 July 2015; Published online: 15 March 2016
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents a sinusoidal quadrature oscillator with a temperature-insensitive using the principle of voltage to current conversion based on 3 DO-CCTAs cooperating with 6 grounded passive elements. The features of the proposed circuit are that; the frequency of oscillation and condition of oscillation can be adjusted by electronic methods. In addition, it offers constant output frequency at different temperatures. With the mentioned features, the proposed circuits/system is simple and suitable, to further develop into an integrated circuit architecture and can be consequently used in automatic control based systems or microcontroller/microprocessor based circuits and systems. The circuit performance investigations are obtained via PSpice, the circuit is biased with ±1.5 V supply voltage. It is found that the proposed circuit can generate 2 signal outputs with 90 degrees of different phase. The total harmonic distortion (THD) is 5.39% and 3.59% for output signal; the frequency of oscillation reaches 119 kHz. In addition, the temperature deviation of the output frequency is 0.106%/°C, the temperature deviations of the output amplitudes are 16.558%/°C and 25.168%/°C. The results are in accordance with anticipation. The power consumption is 11.4 mW.

Keywords: Sinusoidal Quadrature Oscilator, Voltage to Current, DO-CCTA

Please cite this article in press as: M. Siripruchyanun, "A temperature-insensitive sinusoidal quadrature oscillator with using principle of voltage to current conversion based on DO-CCTA," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 26, no. 2, pp. x–x, May.–Aug. 2016 (in Thai).

1. บทนำ

สัญญาณรูปคลื่นซายน์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านการวัด ระบบเครื่องมือวัด การประมวลผลในงานด้านสัญญาณ ตลอดจนระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบสื่อสาร [1] โดยที่ผ่านมานั้นได้มีการนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ที่มีประสิทธิภาพหรือข้อดีต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยลง สามารถควบคุมค่าความถี่และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้โดยกระแสหรือแรงดันอย่างเป็นอิสระต่อกัน ทำงานโดยมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟเลี้ยงต่ำ สัญญาณมีความถูกต้องสูง [2]–[4] นอกจากนี้แล้ววงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์อีกอย่างหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมพัฒนา คือวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ได้สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา หรือที่เรียกว่าสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้สามารถนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในระบบสื่อสาร เช่น การมอดูเลตสัญญาณ SSB เป็นต้น [5] ซึ่งลักษณะเด่นของวงจรกำเนิดสัญญาณอีกประการหนึ่งที่นิยมพัฒนา คือสามารถให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นได้ โดยสามารถควบคุมค่าความถี่ของสัญญาณ (Oscillation Frequency) เป็นอิสระจากเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition) รวมถึงสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

ที่ผ่านมาได้มีความพยายามที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยงของระบบและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงนั้น มีขนาดเล็กลงส่งผลให้สามารถพกพาได้สะดวกและยาวนานขึ้น จึงได้มีการคิดค้นวิธีการต่าง ๆ เพื่อลดแรงดันไฟเลี้ยง ซึ่งพบว่าเทคนิคการทำงานในโหมดกระแสเป็นเทคนิคหนึ่งที่เหมาะสมกับความต้องการดังกล่าว มากกว่าการทำงานในโหมดแรงดันแบบเดิม นอกจากนี้แล้ว วงจรที่มีการทำงานในโหมดกระแสยังมีลักษณะเด่นกว่าโหมดแรงดันหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น มีพิสัยพลวัตกว้าง (Larger Dynamic Range) ตอบสนองต่อความถี่ในย่านกว้างกว่า มีความเป็นเชิงเส้นดี โครงสร้างของวงจรน้อยกว่า และมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า [6], [7] เมื่อเทียบกับวงจรที่ทำหน้าที่เดียวกันในโหมดแรงดัน

ที่ผ่านมาได้มีผู้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณแบบรูปคลื่นซายน์แบบควอดเดรเจอร์ที่ทำงานในโหมดกระแสที่สามารถให้กำเนิดความถี่ได้ โดยปราศจากเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ แต่วงจรที่นำเสนอไปนั้นยังมีการใช้อุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟจำนวนมาก [8], [9] อีกทั้งยังมีการใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวมเนื่องจากจะมีพื้นที่ขนาดใหญ่และน้ำหนักที่มาก [10] ต่อมาได้มีการนำเสนอการสังเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น DVCCs [11], CC-CDBAs [12], FD-CCIIs [13], CDTAs [14], CC-CFA [15], เป็นต้น แต่วงจรเหล่านั้นยังมีข้อด้อยดังต่อไปนี้

- ใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟจำนวนมากโดยเฉพาะตัวต้านทาน [11]–[15]
- ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ [11], [13]
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมจะสร้างเป็นวงจรรวม [11]

อีกประการที่สำคัญ คือระบบหรือวงจรกำเนิดสัญญาณส่วนใหญ่ที่ได้มีการศึกษาแล้วนั้น ค่าความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณนั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในกรณีที่สภาพแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะเรื่องของอุณหภูมิที่ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จะเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ (Power Consumption) ที่จะเปลี่ยนรูปเป็นความร้อน

ในปี ค.ศ. 2005 ได้มีผู้คิดค้นและนำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่อีกหนึ่งชนิด คือ วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current Conveyor Transconductance Amplifier, CCTA) [16] ซึ่งถือได้ว่า CCTA เป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์มากมายในการสังเคราะห์และออกแบบวงจรที่มีการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก [16]–[18] ซึ่งสามารถใช้อุปกรณ์นี้เป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบวงจรที่ทำงานในโหมดกระแส หรือ

ในโหมดแรงดัน หรือในโหมดผสม (Hybrid-mode) นอกเหนือจากนี้แล้ว ยังสามารถปรับค่าอัตราขยายกระแสที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ได้ ต่อมาจึงได้มีผู้นำ CCTA นี้มาสังเคราะห์เป็นระบบแปลงแรงดันเป็นกระแสที่กระแสเอาต์พุตไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [19]

ต่อมาได้มีผู้พัฒนาวงจร CCTA ให้ทำงานเป็นแบบสองเอาต์พุต เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในวงจรที่ต้องการเอาต์พุตแบบ Dual-output ได้ ซึ่งเรียกว่า วงจรขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแสแบบสองเอาต์พุต (Dual-output Current Conveyor Transconductance Amplifier: DO-CCTA) [20], [21] โดยวงจร DO-CCTA จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับวงจร CCTA แต่จะแตกต่างกันตรงที่วงจร DO-CCTA นั้นจะมีขั้วเอาต์พุตสองขั้วที่แยกอิสระจากกัน ซึ่งขั้วเอาต์พุตทั้งสองจะถูกควบคุมผ่านกระแสไบแอสที่ I_{B1} และ I_{B2} ทำให้สามารถควบคุมค่าความนำถ่ายโอนของทั้งสองเอาต์พุตได้อย่างเป็นอิสระ

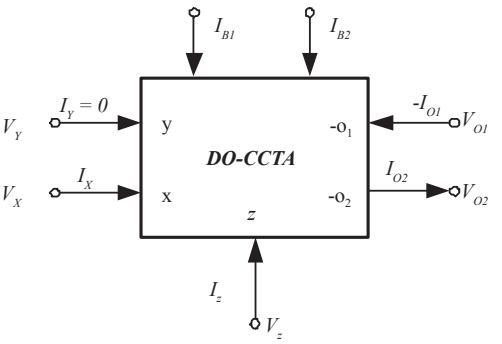
งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์แบบควอดเดรเจอร์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิ โดยใช้หลักการแปลงผันแรงดันเป็นกระแสที่ใช้ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งวงจรที่นำเสนอนี้มีข้อดีคือสามารถให้กำเนิดสัญญาณที่สามารถควบคุมค่าความถี่ได้ด้วยกระแส กระแสเอาต์พุตไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยวงจรทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ นอกเหนือจากนี้แล้วระบบวงจรยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปต่อใช้งานได้จริงหรือนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ ผลการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้ PSpice แสดงถึงความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้มีการวิเคราะห์ไว้

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

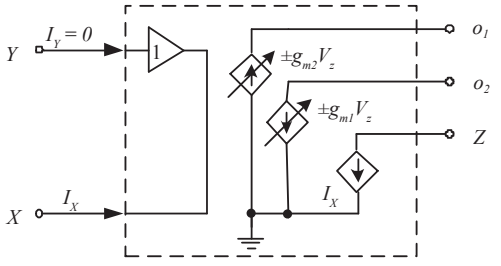
2.1 หลักการทำงานของ DO-CCTA

เนื่องจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอใช้อุปกรณ์ DO-CCTA ที่มีโครงสร้างไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ในส่วนนี้จึงขอกล่าวถึงอุปกรณ์ DO-CCTA พอสังเขป ซึ่งมีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 1

ลักษณะสมบัติของ DO-CCTA โดยทั่วไปสามารถ



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 DO-CCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

แสดงด้วยสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_{m2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_{o1} \\ V_{o2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ g_{m1} และ g_{m2} คือค่าความนำถ่ายโอนของ DO-CCTA สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอสจากภายนอก ซึ่งในกรณีที่ DO-CCTA มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}, g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (2)$$

โดยที่ I_{B1} และ I_{B2} คือ กระแสไบแอส และ V_T คือ ศักดาความร้อนที่อุณหภูมิห้อง มีค่าประมาณ 26 mV

2.2 การสังเคราะห์วงจร DO-CCTA โดยใช้หลักการแปลงผันแรงดันเป็นกระแส

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของวงจร DO-CCTA โดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแส ที่กระแสเอาต์พุตไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อทำการพิจารณาจากรูปที่ 2 จะได้กระแส I_z ดังสมการที่ (3)

$$I_z = I_{O2} = g_{m2} V_z \tag{3}$$

ดังนั้น แรงดัน V_z จะได้ดังสมการที่ (4)

$$V_z = \frac{I_z}{g_{m2}} \tag{4}$$

จากลักษณะสมบัติของ DO-CCTA ในสมการที่ (1) จะได้ค่ากระแส $I_z = I_x = \frac{V_{in}}{Z_x}$ แทนลงในสมการที่ (4) จะได้แรงดัน V_z ดังสมการที่ (5)

$$V_z = \frac{V_{in}}{Z_x g_{m2}} \tag{5}$$

พิจารณาสมการที่ (1) จะได้ กระแส I_{O1} ดังสมการที่ (6)

$$I_{O1} = I_{out} = g_{m1} V_z \tag{6}$$

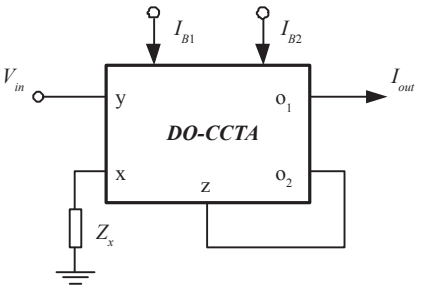
แทนสมการที่ (5) ลงในสมการ (6) จะได้

$$I_{out} = g_{m1}\left(\frac{V_{in}}{Z_x g_{m2}}\right) = \frac{I_{B1}}{I_{B2} Z_x} V_{in} \tag{7}$$

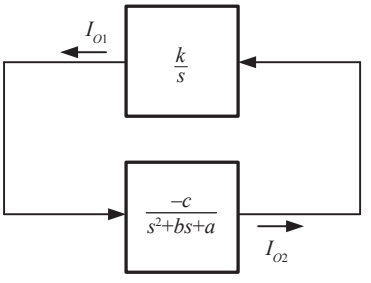
จากสมการที่ (7) พบว่า กระแสเอาต์พุตเป็นผลของการเปลี่ยนแรงดันอินพุตโดยสามารถควบคุมอัตราขยายได้จาก I_{B1} และ I_{B2} อีกทั้งค่าอัตราขยายนี้ไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีกด้วย

2.3 หลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

รูปที่ 3 แสดงแผนผังหลักการของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอประกอบไปด้วย วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Integrator) กับวงจรกรองความถี่ต่ำ



รูปที่ 2 โครงสร้างของวงจร DO-CCTA โดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแส



รูปที่ 3 แผนผังหลักการกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

ผ่านอันดับสองแบบกลับเฟส เมื่อทำการพิจารณาจากรูปที่ 3 จะได้สมการคุณลักษณะของวงจรดังสมการที่ (8)

$$s^3 + bs^2 + as + ck = 0 \tag{8}$$

จากสมการที่ (8) จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ดังสมการที่ (9) และสมการที่ (10) ตามลำดับ ดังนี้

$$ab = ck \tag{9}$$

และ

$$\omega_0 = \sqrt{a} \tag{10}$$

จากสมการที่ (9) เมื่อกำหนดให้ $a = c$ จะพบว่าวงจรสามารถปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกัน นั่นคือ สามารถปรับเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณได้ที่ b กับ k และสามารถปรับ

ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้ที่ a โดยค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ จะได้ดังสมการที่ (11)

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{a} \tag{11}$$

2.4 การวิเคราะห์สมการของวงจรกำเนิดสัญญาณ

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟส และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบกลับเฟส จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 4 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟส ดังแสดงในสมการที่ (12)

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_{B1}}{sC_1R_{x1}I_{B2}} \tag{12}$$

และจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบกลับเฟส ดังนี้

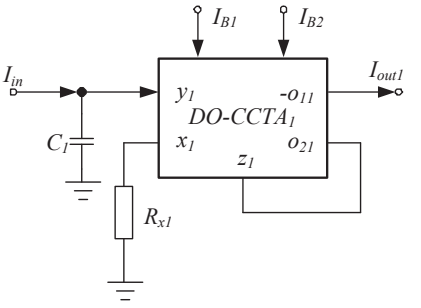
$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{-\dfrac{I_{B3}I_{B5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}I_{B4}I_{B6}}}{s^2 + s\dfrac{I_{B3}}{C_2R_{x2}I_{B4}} + \dfrac{I_{B3}I_{B5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}I_{B4}I_{B6}}} \tag{13}$$

จากสมการที่ (12) และสมการที่ (13) พบว่า เมื่อทำการพิจารณาสมการคุณลักษณะของวงจร ที่ได้แสดงในแผนผังหลักการกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอแสดงดังในรูปที่ 3 และทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (12) และ (13) จะได้

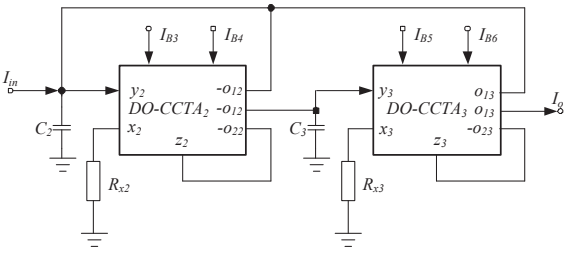
$$k = \frac{I_{B1}}{sC_1R_{x1}I_{B2}} \tag{14}$$

$$a = \frac{I_{B3}I_{B5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}I_{B4}I_{B6}} \tag{15}$$

$$b = \frac{I_{B3}}{C_2R_{x2}I_{B4}} \tag{16}$$



รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟส



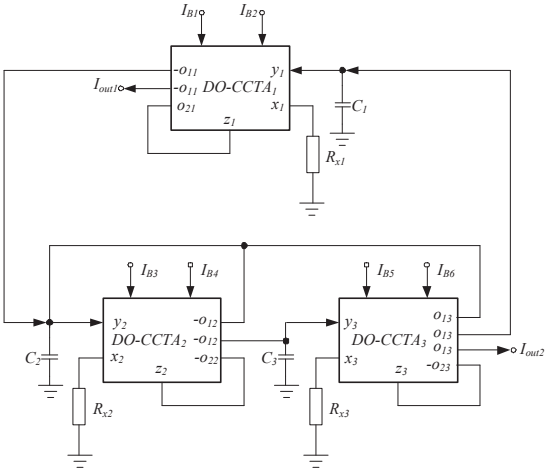
รูปที่ 5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบกลับเฟส

$$c = \frac{I_{B3}I_{B5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}I_{B4}I_{B6}} \tag{17}$$

2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่นำเสนอ

รูปที่ 6 แสดงวงจรสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่นำเสนอ เมื่อทำการนำวงจรจากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 มาต่อร่วมกัน โดยสัญญาณที่จุด I_{O1} และ I_{O2} จะเป็นสัญญาณควอดเดรเจอร์ในโหมดกระแสที่มีความต่างเฟสกัน 90° วงจรจะมีเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงดังสมการที่ (9) และสมการที่ (10) และเมื่อนำสมการที่ (14) ถึงสมการที่ (17) มาทำการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (9) และสมการที่ (10) โดยกำหนดให้ $a = c$ จะได้เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณแสดงดังสมการที่ (18) ดังนี้

$$\frac{I_{B3}}{C_2R_{x2}I_{B4}} = \frac{I_{B1}}{C_1R_{x1}I_{B2}} \tag{18}$$



รูปที่ 6 วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณของวงจร แสดงดังสมการที่ (19)

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{I_{B3}I_{B5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}I_{B4}I_{B6}}} \tag{19}$$

จากสมการที่ (18) และสมการที่ (19) พบว่า วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกัน โดยสามารถควบคุมเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้ที่ I_{B1} และ I_{B2} และควบคุมความถี่ของวงจรได้จาก I_{B5} และ I_{B6}

2.6 การวิเคราะห์วงจรในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ DO-CCTA ที่ใช้ในวงจร เกิดความไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์ได้ดังแสดงในสมการที่ (20)

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm\beta_1 g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & \pm\beta_2 g_{m2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_{o1} \\ V_{o2} \end{bmatrix} \tag{20}$$

เมื่อ α, γ และ β คือ ค่าเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ใน MO-CCTA เมื่อมีการพิจารณาความผิดพลาดนี้แล้ว สามารถหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟส และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบกลับเฟส ตามลำดับได้ดังนี้

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\alpha_1\gamma_1\beta_1 g_{m1}}{sC_1R_{x1}\beta_2 g_{m2}} \tag{21}$$

และ

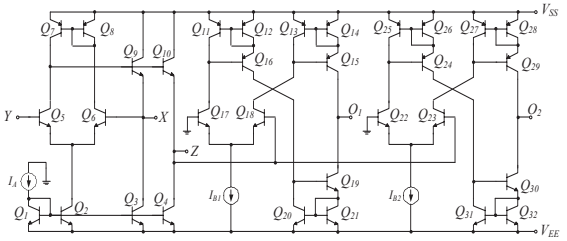
$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{-\dfrac{\alpha_2\alpha_3\gamma_2\gamma_3\beta_3\beta_5 g_{m3}g_{m5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}\beta_4\beta_6 g_{m4}g_{m6}}}{s^2 + s\dfrac{\alpha_2\gamma_2\beta_3 g_{m3}}{C_2R_{x2}\beta_4 g_{m4}} + \dfrac{\alpha_2\alpha_3\gamma_2\gamma_3\beta_3\beta_5 g_{m3}g_{m5}}{C_2C_3R_{x2}R_{x3}\beta_4\beta_6 g_{m4}g_{m6}}} \tag{22}$$

จากสมการที่ (21) และสมการที่ (22) จะเห็นว่าแม้ในทางอุดมคติ ค่า α_i, γ_i และ β_i จะมีค่าเป็น 1 แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าดังกล่าวจะมีการเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงที่อยู่ภายในทรานซิสเตอร์ที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ ดังนั้นจึงควรทำการออกแบบให้ค่าเหล่านี้มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด

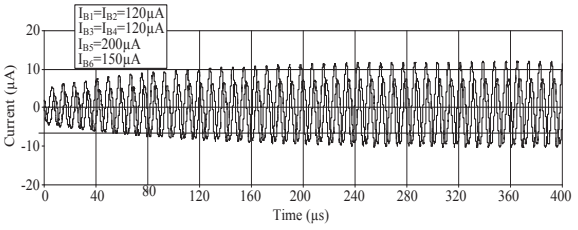
3. ผลการทดสอบการทำงาน

3.1 ผลการทดสอบการจำลองการทำงาน

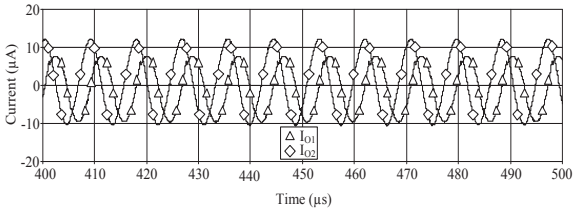
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับโครงสร้างภายในของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T [22] โดยกำหนดให้อุปกรณ์ DO-CCTA ทำงานที่แรงดัน ±1.5 V สามารถแสดงผลการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 7 โครงสร้างภายในของ DO-CCTA ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน



รูปที่ 8 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะเริ่มต้น

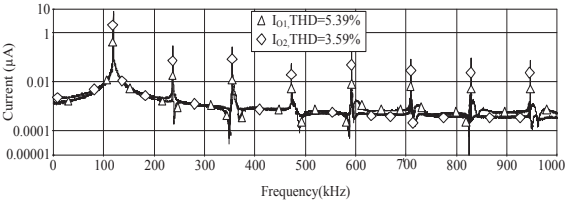


รูปที่ 9 ผลการกำเนิดสัญญาณในช่วงเวลาคงตัว (Steady State)

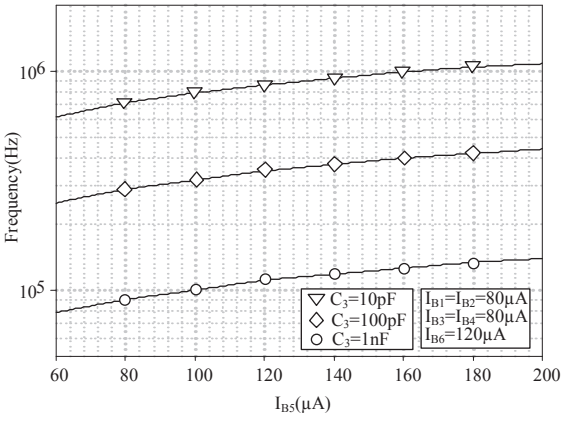
รูปที่ 8 แสดงสัญญาณเอาต์พุตในสภาวะเริ่มต้นของวงจรกำเนิดสัญญาณ เมื่อกำหนดให้ C_1=C_2=C_3=1 nF และ R_{x1}=R_{x2}=R_{x3}=1 kΩ แล้วทำการปรับค่ากระแสไบแอส I_{B1}=I_{B2}=I_{B3}=I_{B4}=120 μA, I_{B5}= 200 μA และ I_{B6}=150 μA

รูปที่ 9 แสดงค่ากระแสเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} ในสภาวะอยู่ตัว โดยเมื่อทำการปรับค่ากระแสไบแอส I_{B1}=I_{B2}=I_{B3}=I_{B4}=120 μA, I_{B5}= 200 μA และ I_{B6}=150 μA พบว่า ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตในช่วงเวลาคงตัวมีค่าเท่ากับ 119 kHz

รูปที่ 10 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} ซึ่งมีค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ



รูปที่ 10 สเปกตรัมของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต

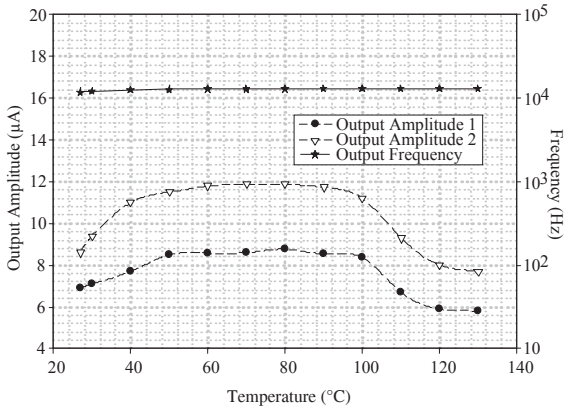


รูปที่ 11 ค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อปรับกระแสไบแอสและตัวเก็บประจุ

119 kHz และค่าผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} มีค่าเท่ากับ 5.39% และ 3.59% ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อกำหนดค่ากระแสไบแอส I_{B1}=I_{B2}=I_{B3}=I_{B4}=80μA และ I_{B6}= 120 μA ทำการปรับค่ากระแสไบแอส I_{B5}=60 μA - 200 μA และทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุ C_3 ไปจำนวนสามค่า คือ 10 pF, 100 pF และ 1 nF โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C_1=C_2=1 nF จากภาพจะเห็นว่า ค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตสามารถควบคุมได้จากการปรับกระแสไบแอสที่ I_{B5} นั่นเอง

รูปที่ 12 แสดงผลของขนาดและค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอเมื่อมีการทำงานที่อุณหภูมิมีความแตกต่างกัน พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปในช่วงระหว่าง 27°C–130°C ค่าความถี่ของ



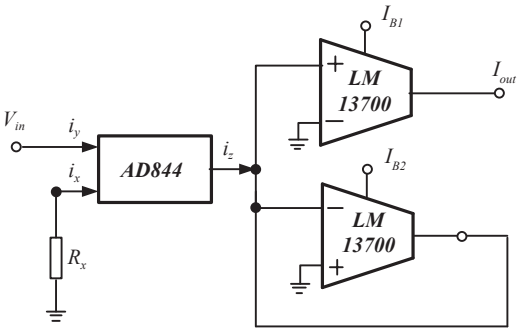
รูปที่ 12 ผลของขนาดและค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

วงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.106%/°C โดยที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต 1 และ 2 ของวงจร จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 16.558%/°C และ 25.168%/°C ตามลำดับ

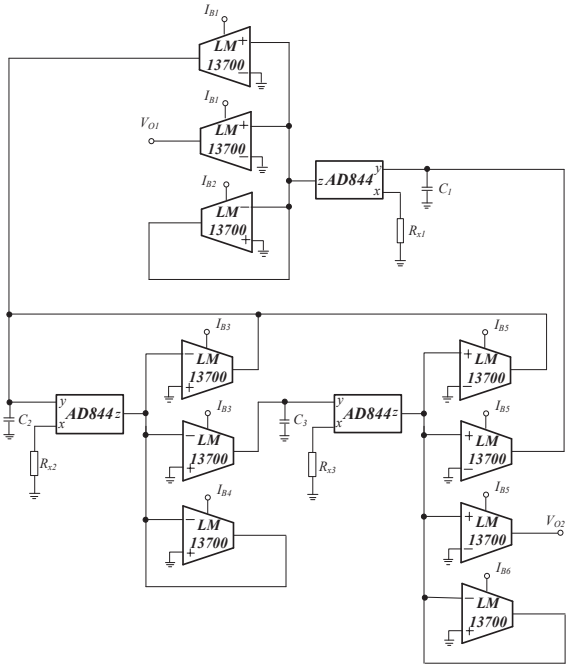
3.2 ผลการทดลองด้วยการต่อวงจรจริง

เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่สังเคราะห์ขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้จริง อีกทั้งเพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะของวงจรในทางปฏิบัติ จึงได้มีการทดลองวงจรจริงโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้การต่อวงจรระบบแปลงผันแรงดันเป็นกระแสที่ใช้อุปกรณ์ DO-CCTA จะประกอบไปด้วยไอซีเบอร์ AD844 จำนวน 1 ตัว และ LM13700 จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 14 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์แบบควอดเดรเจอร์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิโดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแส ที่ใช้อุปกรณ์ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์หลัก โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์ จากภาพจะเห็นว่า การที่จะให้วงจรที่ออกแบบสามารถทำงานได้นั้น จะต้องทำการสร้างตัวอุปกรณ์ DO-CCTA ทั้งหมด 3 ตัว มาต่อร่วมกันเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

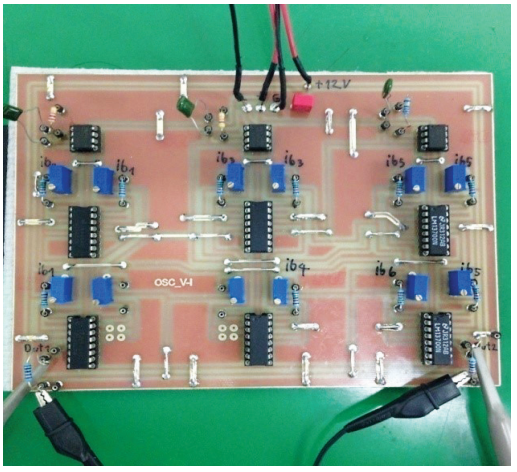


รูปที่ 13 การต่อวงจรระบบแปลงผันแรงดันเป็นกระแสที่ใช้อุปกรณ์ CCTA โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 14 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 15 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง จากภาพจะพบว่าในการต่อใช้งานจริงนั้นจะไม่สามารถวัดสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่ในโหมดของกระแสได้ ดังนั้น เพื่อให้สามารถทำการวัดเอาต์พุตของ



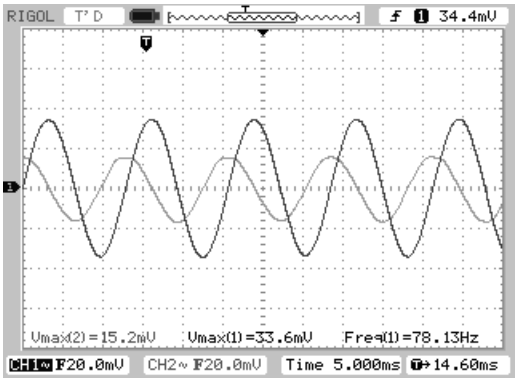
รูปที่ 15 ภาพวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

วงจรได้ จึงต้องทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรในโหมดของแรงดัน โดยเมื่อทำการพิจารณาจากรูปจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ V_{O1} และ V_{O2} ดังสมการที่ (23)

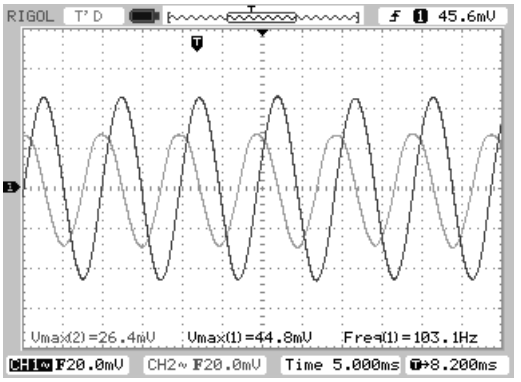
$$\frac{V_{O2}(s)}{V_{O1}(s)} = \frac{s}{k} \tag{23}$$

จากรูปที่ 16 ถึงรูปที่ 21 แสดงผลของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการต่อวงจรทดลองจริงโดยใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดผลของวงจร เมื่อกำหนดให้วงจรทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ ±12 V ทำการป้อนกระแสไบแอสให้กับวงจรที่ $I_{B1} = 36\,\mu A, I_{B2} = 35\,\mu A, I_{B3} = 36\,\mu A, I_{B4} = 35\,\mu A, I_{B5} = 45\,\mu A, I_{B6} = 30\,\mu A$ กำหนดค่าตัวต้านทาน $R_{x1} = R_{x2} = 47\,k\Omega, R_{x3} = 1\,M\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ C_1=C_2=C_3=10 nF จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ที่ความถี่เท่ากับ 78.13 Hz ดังรูปที่ 16 และเมื่อทำการปรับกระแสไบแอส I_{B5} = 80 μA จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ความถี่ 103.1Hz แสดงดังรูปที่ 17 และเมื่อทำการปรับกระแสไบแอส I_{B5} = 200 μA ดังรูปที่ 18 จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ที่ความถี่ 158.2 Hz

เมื่อทำการป้อนกระแสไบแอส I_{B1} = 250 μA, I_{B2} = 29 μA, $I_{B3} = 250\,\mu A, I_{B4} = 34\,\mu A, I_{B5} = 100\,\mu A, I_{B6} = 25\,\mu A$



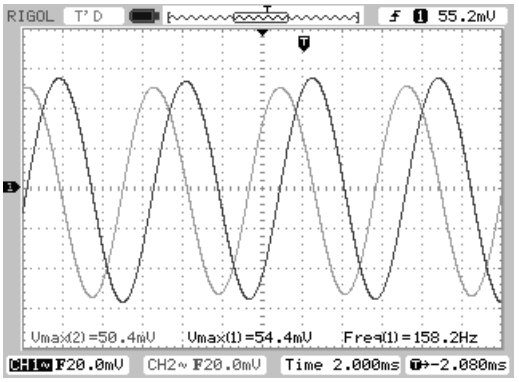
รูปที่ 16 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคปที่ความถี่ 78.13 Hz



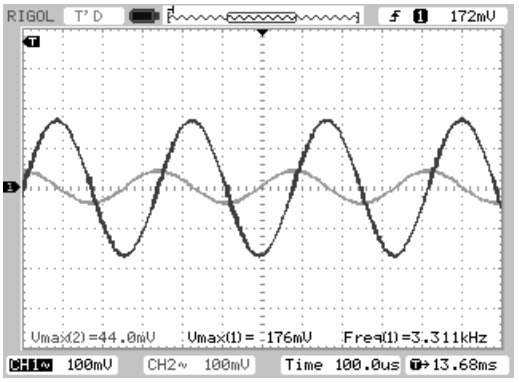
รูปที่ 17 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคปที่ความถี่ 103.1 Hz

กำหนดค่าตัวต้านทาน $R_{x1} = R_{x2} = 47\,k\Omega, R_{x3} = 1\,M\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ C_1=C_2=C_3=1.5 nF จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ที่ความถี่เท่ากับ 3.311 kHz ดังแสดงในรูปที่ 19 และเมื่อทำการปรับกระแสไบแอสไปสองค่าคือ $I_{B5} = 200\,\mu A$ และ I_{B5} = 300 μA จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ความถี่เท่ากับ 4.132 kHz และ 4.950 kHz ดังแสดงในรูปที่ 20 และรูปที่ 21 ตามลำดับ

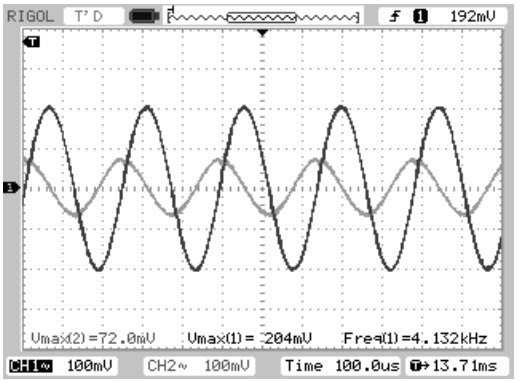
จากรูปที่ 22 แสดงผลของมุมต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบ Lissajous พบว่า ผลที่ได้มีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งแปลว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีมุมต่างเฟสกัน ϕ = –90° แต่จากผลการต่อวงจรทดลอง



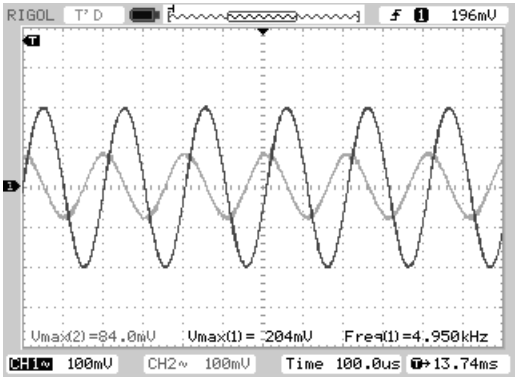
รูปที่ 18 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคป ที่ความถี่ 158.2 Hz



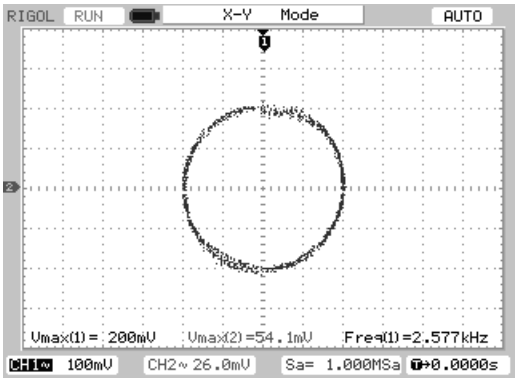
รูปที่ 19 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคป ที่ความถี่ 3.311 kHz



รูปที่ 20 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคป ที่ความถี่ 4.132 kHz



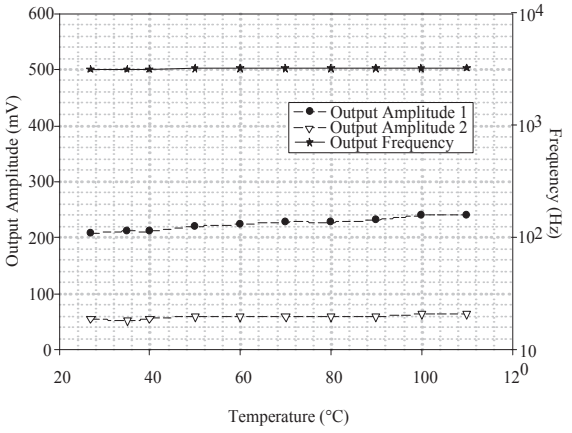
รูปที่ 21 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคป ที่ความถี่ 4.950 kHz



รูปที่ 22 ผลของมุมต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุต ในรูปแบบ Lissajous

จะมีความคลาดเคลื่อนมากพอสมควรเมื่อเทียบกับที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเกิดจากตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับไอซีเบอร์ LM13700 ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันให้เป็นกระแสในส่วนที่เป็นกระแสไบแอส I_B ของอุปกรณ์ DO-CCTA ซึ่งค่าของตัวต้านทานจะไม่มีในส่วนของผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice แต่ในทางปฏิบัติแล้วจำเป็นที่จะต้องมีตัวต้านทานเพื่อให้วงจรทำงานได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้สามารถยืนยันว่าวงจรที่นำเสนอนั้นให้กำเนิดสัญญาณควอดเดรเจอร์ได้

รูปที่ 23 แสดงผลของขนาดและค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีการทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 23 ผลของขนาดและค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

โดยได้กำหนดให้กระแสไบแอส $I_{B1} = 250\ \mu A$, $I_{B2} = 29\ \mu A$, $I_{B3} = 250\ \mu A$, $I_{B4} = 34\ \mu A$, $I_{B5} = 100\ \mu A$, $I_{B6} = 25\ \mu A$ กำหนดค่าตัวต้านทาน $R_{x1} = R_{x2} = 47\ k\Omega$, $R_{x3} = 1\ M\Omega$ และค่าตัวเก็บประจุ C_1=C_2=C_3=1.5 nF ทำการทดสอบวงจรที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงระหว่าง 27°C–110°C พบว่า ค่าความถี่ของวงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.023%/°C โดยที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต 1 และ 2 ของวงจร จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 0.185%/°C และ 0.172%/°C ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบวงจรที่ได้ออกแบบมานั้น จะเห็นว่าสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงได้

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิโดยใช้หลักการแปลงแรงดันเป็นกระแส ที่ใช้อุปกรณ์ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก จำนวน 3 ตัว ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงกราวนด์อีก 6 ตัว จากผลการทดสอบพบว่า วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกัน สัญญาณเอาต์พุตสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระแสไบแอสซึ่งจะทำให้สามารถประยุกต์ระบบเข้ากับการควบคุมแบบอัตโนมัติ หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยง่าย วงจรที่นำเสนอมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าที่ 11.4 mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง ±1.5 V อีกทั้งสัญญาณที่กำเนิดได้ยังเป็นอิสระจากอุณหภูมิภายนอกส่งผลทำให้ระบบวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นมีเสถียรภาพดีต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมจากภายนอก วงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์แบบ 2 เอาต์พุตที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา โดยมีค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} เท่ากับ 5.39% และ 3.59% ตามลำดับ ที่ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 119 kHz ค่าความถี่ของวงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.106%/°C โดยที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต 1 และ 2 ของวงจร จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 16.558%/°C และ 25.168%/°C ตามลำดับ ซึ่งได้ผลสอดคล้องตามทฤษฎีที่คาดไว้

ทั้งนี้ยังได้มีการนำเสนอผลการทดลองด้วยการต่อวงจรจริง เพื่อแสดงถึงความสามารถในการทำงานของวงจรที่นำเสนอ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์มาประกอบเป็นวงจร ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า วงจรที่ออกแบบสามารถให้กำเนิดสัญญาณแบบควอดเดรเจอร์ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งค่าความถี่ของวงจรนั้นจะไม่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิจากภายนอก ซึ่งค่าความถี่ของวงจรมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียง 0.023%/°C โดยที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต 1 และ 2 ของวงจรจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 0.185%/°C และ 0.172%/°C ตามลำดับ และเนื่องจากระบบวงจรที่สร้างขึ้นใช้อุปกรณ์แบบต่อลงกราวนด์ทั้งหมด วงจรที่นำเสนอจึงมีความเหมาะสมกับการนำไปพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวงจรรวมหรือที่เรียกว่าไอซี เพื่อนำไปใช้ในงานที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลัง เช่น ระบบสื่อสารไร้สาย ระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปี พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ FTE-2557-08 และขอขอบคุณนายกังวาล พยัคฆกุล นายประชารัฐ สัตถาผล และนายไพสิฐ พิพัฒน์ฐิติกร ผู้ช่วยวิจัยที่ได้ช่วยเก็บผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] R. F. Graf, *Oscillator Circuits*. Newnes Boston, 1997, pp. 164.

[2] J. Bayard, "Single grounded resistance tuneable sinusoidal oscillator," *IEE Proceeding G Circuits Devices System*, vol. 151, 2004, pp. 74–77.

[3] M.T. Abuelma'atti and M.A. Al-qahtani, "Low component second-generation current conveyor-based multiphase sinusoidal oscillator," *International Journal of Electronics*, vol. 84, pp. 45–52, 1998.

[4] H. Barthelemy, S. Meillere, and E. Kussener, "CMOS sinusoidal oscillator based on current-controlled current conveyors," *Electronics Letters*, vol. 38, pp. 1254–1256, 2002.

[5] I. A. Khan and S. Khawaja, "An integrable gm-C quadrature oscillator," *International Journal of Electronics*, vol. 87, pp. 1353–1357, 2000.

[6] C. Toumazou, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, *Analogue IC Design: the Current-mode Approach*. Peregrinus, London: UK, 1990.

[7] D. R. Bhaskar, V. K. Sharma, M. Monis, and S. M. I. Rizvi, "New current-mode universal biquad filter," *Microelectronics Journal*, vol. 30, pp. 837–839, 1999.

[8] M. Siripruchyanun, "An active-only current-mode quadrature sinusoidal oscillator with electronic controllability," in *Proceeding of EECON-27*, pp. 245–248, 2004 (in Thai).

[9] W. Jaikla, K. Sooksood, and M. Siripruchyanun, "A novel sinusoidal quadrature oscillator with frequency control via electronic method using Current Controlled CDBAs," in *Proceeding of PEC-4*, pp. E6–E10, 2005 (in Thai).

[10] S. Lawanwisut, D. Biolek, and M. Siripruchyanun, "A simple current-mode quadrature oscillator using only single CDTA," in *International Conference on Technical Education (ICTE2009)*, 2009, pp. 119–122.

[11] J. W. Horng, "Current-mode quadrature qscillator with grounded capacitors and resistors using two DVCCs,"in *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics*, *Communications and Computer Sciences*, vol. E86-A, pp. 2152–2154, 2003.

[12] W. Jaikla, and M. Siripruchyanun, "A versatile quadrature oscillator and universal biquad filter using CCCDBAs," in *Proceeding of ECTI-CON*, pp. 501–504, 2006.

[13] J.W. Horng, C.L. Hou, C.M. Chang, H.P. Chou, C.T. Lin, and Y.H. Wen, "Quadrature oscillators with grounded capacitors and resistors using FDCCIIs," *Electronics and Telecommunications Research Institute Journal*, vol.28, pp. 486–494, 2006.

[14] D. Biolek, V. Biolkova, and A. Ümit Keskin, "Current mode quadrature oscillator using two CDTAs and two grounded capacitors," in *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference*, Canary Islands Spain, 2006, pp. 368–370.

[15] J. Koomboon, P. Silapan, M. Siripruchyanun and P. Prommee, "A current-mode quadrature oscillator based on CC-CFAs," in *Proceedings*

of ECTI-CON 2009, pp. 542–545, 2009 (in Thai).

[16] R. Prokop and V. Musil, "New modern circuit building block CCTA and some its applications," in *The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference - Electronics ET'2005*, Book 5. Sofia: TU Sofia, 2005, pp. 93–98.

[17] R. Prokop and V. Musil, "Modular approach to design of modern circuit blocks for current signal processing and new device CCTA,"in *Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Signal and Image Processing*, Anaheim, USA, 2005, pp. 494–499.

[18] R. Prokop and V. Musil, "CCTA–a new modern circuit block and its internal realization," in *Electronic Devices and Systems IMAPS CZ International Conference 2005*, Brno, Czech Republic, 2005, pp. 89–93.

[19] P. Pipatthitikorn, P. Satthaphol, K. Payakkakul, S. Sirsakultiew, and M. Siripruchyanun, "A temperature-insensitive electronically controllable current-mode universal filter using principle of voltage to current converter," in *Proceeding of EECON-36*, pp. 621–624, 2013 (in Thai).

[20] A. Jantakun and M. Siripruchyanan, "A synthesis of grounded capacitance multiplier employing only single DO-CCTA and its application," in *The 3rd UBU-research conference*, 2009, pp. 223–231 (in Thai).

[21] A. Jantakun and M. Siripruchyanun, "A simple current-mode analog multiplier/divider using only single DO-CCTA," in *The Proceedings of 25th International Technical Conference on Circuits/ Systems*, *Computers and Communications (ITC-CSCC 2010)*, 2010, pp. 612–615 (in Thai).

[22] D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," in *IEE Proceedings of Circuit Devices Systems*, vol. 40, 1993, pp. 406–416.