



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โหมดกระแส 4 เฟส โดยใช้ CCCII

Four phase current-mode sinusoidal quadrature oscillator based on CCCIIs

ศักดิ์สิทธิ์ สุ่มมาตย์* และ ชานชัย ทองโสภณ

Saksit Summart* and Chanchai Thongsopa

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

Received May 2012

Accepted October 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์โหมดกระแสที่มีเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมอิสระต่อกันโดยใช้ CCCII เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ วงจรที่นำเสนอประกอบด้วย CCCII จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 2 ตัว ซึ่งสามารถให้สัญญาณไซน์ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา จำนวน 4 สัญญาณ วงจรมีอิมพีแดนซ์ทางเอาต์พุตสูงสามารถต่อเข้ากับโหลดโดยตรงไม่จำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์กระแสเพิ่มเติม โดยที่เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรประกอบด้วยเพียงตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์โดยไม่มีการต่อตัวต้านทานภายนอกจึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลการทดสอบวงจรที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice สอดคล้องตามที่วิเคราะห์ไว้ในทางทฤษฎี

คำสำคัญ : โหมดกระแส วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ CCCII

Abstract

This article presents a current-mode four phase quadrature oscillator with orthogonal control for condition of oscillation (CO) and frequency of oscillation (FO) based on CCCII. The proposed circuit consists of 3 CCCIIs and 2 grounded capacitors. The proposed circuit can generate four sinusoidal output current terminals with 90° phase difference. It also provides high output impedances that make the circuit can drive load without additional current buffers. The CO and FO can be controlled electronically by adjusting the bias current. The proposed circuit uses only grounded capacitors without any external resistor which is beneficial from the point of view of integrated circuit fabrication. The simulation results by PSpice program are shown corresponding with the theoretical analysis.

Keywords : Current-mode, Quadrature oscillator, CCCII

*Corresponding author. Tel.: +66 8806 34811

Email address: ton_3555@hotmail.com.

1. บทนำ

วงจรที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์เป็นวงจรที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ในระบบสื่อสาร การประมวลผลสัญญาณ และระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ที่สามารถให้สัญญาณทางด้านเออร์ตพุตที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งเรียกว่าสัญญาณควอดเรเจอร์ (Quadrature Signal) ก็มีการนำไปใช้งานในหลายๆ ส่วน เช่น การมอดูเลตสัญญาณแบบไซด์แบนด์เดี่ยว (single side band; SSB) และการผสมสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ [1] เป็นต้น

ในปัจจุบันนั้นจะพบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก ดังนั้นวงจรที่อยู่ข้างในจะต้องสามารถใช้งานที่แรงดันต่ำๆ และบริโภคกำลังงานต่ำๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน หนึ่งในเทคนิคที่นิยมนำมาออกแบบวงจรในอุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ เทคนิควงจรในโหมดกระแส โดยเทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น มีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเป็นเชิงเส้นสูง มีค่าพิสัยพลวัตกว้าง และวงจรไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน [2-3] ดังนั้นจึงมีการนำเสนอมวงจรประมวลผลสัญญาณที่ทำงานในโหมดกระแสไว้มากมาย

จากการสำรวจผลงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ด้วยอุปกรณ์แอคทีฟ (Active building block) ชนิดต่างๆ พบว่าจากการออกแบบวงจรยังมีข้อด้อยในการนำไปใช้งานหลายประการดังนี้ ภายในวงจรที่ออกแบบมีการต่อตัวต้านทานภายนอก [4-11, 13-14, 16, 18-21] วงจรมีการต่อตัวเก็บประจุแบบลอย [9-11, 13-14] ซึ่งทำให้วงจรที่ออกแบบไม่เหมาะในการนำมาสร้างเป็นวงจรรวมเพราะจะทำให้ชิปมีขนาดใหญ่ บางวงจรที่นำเสนอมีอิมพีแดนซ์ทางด้านเออร์ตพุตต่ำ [12, 14-15] วงจรที่ออกแบบมีเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณที่ไม่สามารถควบคุมด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ [5, 7, 10, 14-15, 21] วงจรมีเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณไม่สามารถควบคุมได้โดยอิสระต่อกัน [9, 14-15, 20, 22] และสัญญาณทางด้านเออร์ตพุตของวงจรไม่ใช่โหมดกระแส [4, 12, 17]

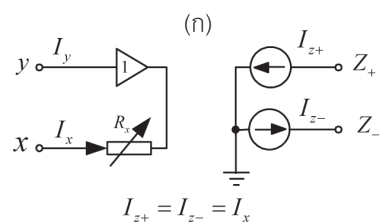
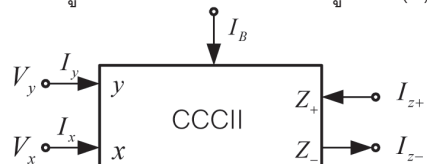
วงจรสายพานกระแสยุคที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (Current controlled current conveyor: CCCII) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟอีกตัวหนึ่งที่มีผู้นิยมนำมาออกแบบเป็นวงจรถ่ายสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โหมดกระแส [23-25, 27] เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่วงจรที่เหล่านั้นต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟ และแอคทีฟจำนวนมาก และมีบางวงจรใช้กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปต่อใช้งานจริง [26]

จากที่กล่าวมาข้างต้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอมวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โหมดกระแสสี่เฟส วงจรที่นำเสนอประกอบด้วย CCCII จำนวน 3 ตัว และ ตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีกจำนวน 2 ตัว อิมพีแดนซ์ทางด้านเออร์ตพุตมีค่าสูงซึ่งสามารถนำไปต่อคาสเคดหรือขับโหลดได้โดยตรง วงจรที่นำเสนอปราศจากการต่อตัวต้านทานภายนอกมีเพียงตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์เท่านั้นจึงมีความเหมาะสมในการพัฒนาไปสู่วงจรรวม อีกทั้งเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างอิสระต่อกัน วงจรที่นำเสนอได้ทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ซึ่งพบว่าได้ผลสอดคล้องกับที่ได้วิเคราะห์ไว้ทฤษฎี

2. หลักการทำงานของวงจร

2.1 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCII)

คุณสมบัติทางด้านอุดมคติของ CCCII สามารถแสดงด้วยสมการในเชิงเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (1) ส่วนสัญลักษณ์และวงจรสมมูลของ CCCII แสดงได้ดังรูปที่ 1(ก) และ (ข)



(ข)

รูปที่ 1 CCCII (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

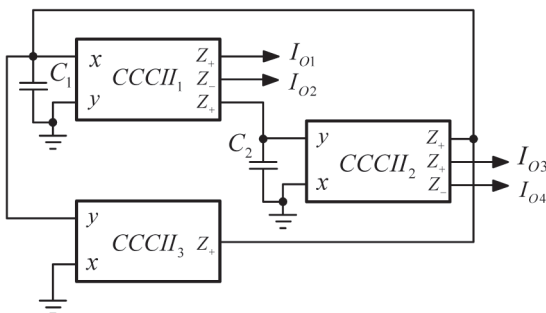
เมื่อ CCCII ที่สร้างมาจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (BJT) ค่าความต้านทานแฝง (Parasitic Resistance) ทางด้านอินพุตที่ขั้ว x (R_x)

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

เมื่อ I_B คือ กระแสไบแอสและ V_T คือ ศักดาความร้อน โครงสร้างภายในของ CCCII แสดงได้ดังรูปที่ 3

2.2 วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ

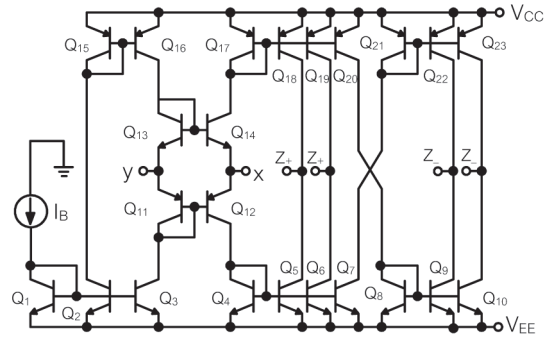
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์โหมดกระแสสี่เฟสที่ได้นำเสนอประกอบด้วย CCCII จำนวน 3 ตัว และ ตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีกจำนวน 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งวงจรที่ออกแบบสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ 4 เอาต์พุต ซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา วงจรที่ออกแบบมีอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตสูงสามารถต่อเพื่อขับโหลดได้โดยตรงเนื่องจากใช้เอาต์พุตของ CCCII โดยตรง และมีความเหมาะสมที่จะนำไปต่อแบบคาสเคดเพื่อใช้งานในโหมดกระแส รวมทั้งวงจรที่ออกแบบไม่ใช่ตัวต้านทานต่อภายนอกมีเพียงตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์เท่านั้นทำให้วงจรนำเสนอมีความเหมาะสมในการพัฒนาไปสู่วงจรรวม



รูปที่ 2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ควอดเรเจอร์โหมดกระแสที่นำเสนอ

จากวงจรในรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการคุณลักษณะสมบัติ (Characteristic Equation) ของวงจรได้ดังสมการ

$$s^2 + s \left(\frac{R_{x3} - R_{x1}}{R_{x1} R_{x3} C_1} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}} = 0 \quad (3)$$



รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ CCCII

จากสมการที่ (3) จะสามารถเขียนสมการเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ได้ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$R_{x3} = R_{x1} \quad (4)$$

และ

$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}}} \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า $R_{x1} = V_T / 2I_{B1}$, $R_{x2} = V_T / 2I_{B2}$ และ $R_{x3} = V_T / 2I_{B3}$ ดังนั้นสมการเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_{B3} = I_{B1} \quad (6)$$

และ

$$\omega_{osc} = \frac{2}{V_T} \sqrt{\frac{I_{B1} I_{B2}}{C_1 C_2}} \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถอธิบายได้ว่าเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถปรับได้อย่างอิสระต่อกัน โดยกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B3} จะเป็นตัวปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ ส่วนกระแสไบแอส I_{B2} จะเป็นตัวปรับค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ ความไวของอุปกรณ์แอคทีฟ และพาสซีฟ (Active and Passive Sensitivities) ของวงจรที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8) และความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกระแสทางด้านเอาต์พุตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$S_{R_{x1}, R_{x2}, C_1, C_2}^{\omega_{osc}} = -\frac{1}{2} \quad (8)$$

$$\frac{I_{O4}(s)}{I_{O1}(s)} = \frac{I_{O3}(s)}{I_{O2}(s)} = -\frac{1}{R_{x2} s C_2} \quad (9)$$

และ

$$\frac{I_{o4}(s)}{I_{o2}(s)} = \frac{I_{o3}(s)}{I_{o1}(s)} = \frac{1}{R_{x2}sC_2} \quad (10)$$

ในสภาวะคงตัวของสัญญาณไซน์สมการที่ (9) และ (10) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{I_{o4}(j\omega)}{I_{o1}(j\omega)} = \frac{I_{o3}(j\omega)}{I_{o2}(j\omega)} = \frac{j}{R_{x2}\omega_{osc}C_2} = \frac{e^{j90^\circ}}{R_{x2}\omega_{osc}C_2} \quad (11)$$

และ

$$\frac{I_{o4}(j\omega)}{I_{o2}(j\omega)} = \frac{I_{o3}(j\omega)}{I_{o1}(j\omega)} = -\frac{j}{R_{x2}\omega_{osc}C_2} = \frac{e^{-j90^\circ}}{R_{x2}\omega_{osc}C_2} \quad (12)$$

จากสมการที่ (11) และ (12) จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอสัญญาณทางด้านเอาต์พุตทั้ง 4 เฟส จะมีเฟสของสัญญาณแตกต่างกัน 90 องศา ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โหมดกระแสทางด้านเอาต์พุตได้ 4 เฟส

2.3 การวิเคราะห์กรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ที่นำมาสร้าง CCCII เกิดความไม่เป็นอุดมคติ จะทำให้คุณสมบัติของ CCCII เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการที่ (1) จึงสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \beta & R_x & 0 \\ 0 & \pm\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

ดังนั้นกรณี CCCII เกิดความไม่เป็นอุดมคติจะทำให้ β และ α มีค่าเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งในทางปฏิบัติจะเกิดจากค่าความจุและค่าความต้านทานแฝงในตัวทรานซิสเตอร์ที่ใช้งาน ดังนั้นในกรณี CCCII ไม่เป็นอุดมคติจะทำให้เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้สมการคุณลักษณะสมบัติ เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ และความถี่ในการกำเนิดสัญญาณมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากอุดมคติ และสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$s^2 + s \left(\frac{R_{x3} - \alpha_3\beta_3R_{x1}}{R_{x1}R_{x3}C_{eq1}} \right) + \frac{\alpha_1\alpha_2\beta_2}{C_{eq1}C_{eq2}R_{x1}R_{x2}} = 0 \quad (14)$$

$$R_{x3} = \alpha_3\beta_3R_{x1} \quad (15)$$

และ

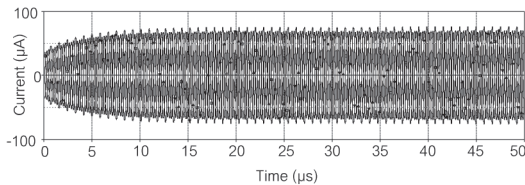
$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{\alpha_1\alpha_2\beta_2}{C_{eq1}C_{eq2}R_{x1}R_{x2}}} \quad (16)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า $C_{eq1} = C_1 + C_{y3} + C_{z2} + C_{z3}$ และ $C_{eq2} = C_2 + C_{z1} + C_{y2}$ ดังนั้นจากสมการที่ (16) จึงสามารถอธิบายได้ว่าในกรณีที่คิดค่าความจุแฝงจะทำให้ความถี่ทางเอาต์พุตมีเปลี่ยนแปลงไปจากค่าทางอุดมคติ

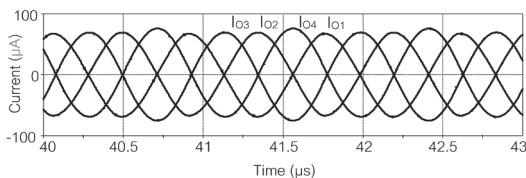
3. ผลจำลองการทำงาน

เพื่อพิสูจน์การทำงานของวงจรที่ออกแบบไว้ในรูปที่ 2 จึงได้จำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยการต่อโครงสร้างภายในของ CCCII แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T (28) วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอจะใช้แหล่งจ่าย ± 1.5 V ในที่นี้จะใช้ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากันคือ $1nF$ (ซึ่งในการจำลองไม่ได้คำนึงถึงความถี่ที่ได้ทางเอาต์พุตจึงเลือกค่าความจุค่าใช้งานทั่วไป) ส่วนค่ากระแสไบอัส I_{B1} , I_{B2} และ I_{B3} มีค่าเท่ากับ $100\mu A$, $120\mu A$ และ $120\mu A$ ตามลำดับ ในรูปที่ 4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้นำเสนอ รูปที่ 5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว และ ในรูปที่ 6 จะแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมจะเห็นได้ว่าสัญญาณทางด้านเอาต์พุตทั้ง 4 จะมีเฟสของสัญญาณต่างกัน 90 องศา ความถี่ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 1.1824 MHz ส่วนค่าความถี่ทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 7 จะมีค่าเท่ากับ 1.3411 MHz และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จะพบว่าค่าจากการจำลองจะคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการคำนวณไปประมาณ 11.833% ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากทรานซิสเตอร์ที่นำมาต่อใช้งานเป็นโครงสร้างภายในของ CCCII เกิดความไม่เป็นอุดมคติดังที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (16) ค่าผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณ (Total Harmonic Distortion; THD) ทางด้านเอาต์พุต I_{O1} , I_{O2} , I_{O3} และ I_{O4} มีค่าเท่ากับ 2.114%, 2.106%, 1.226% และ 1.251% (ค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากอุปกรณ์เกิดความไม่เป็นอุดมคติ) ตามลำดับ ในรูปที่ 7 จะเป็นกราฟที่แสดงค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบออส

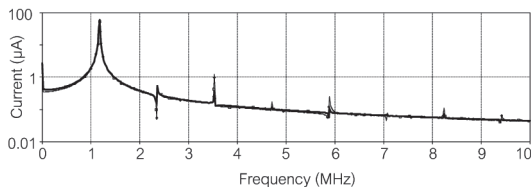
I_{B2} และค่าความจุของตัวเก็บประจุ โดยกำหนดให้ C_1 เท่ากับ C_2 มีค่า 0.1nF, 1nF และ 10nF ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ทางด้านเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับสมการที่ (7)



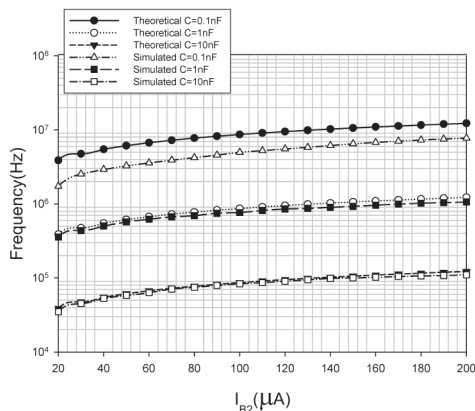
รูปที่ 4 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอ



รูปที่ 5 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว



รูปที่ 6 สเปกตรัมของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต



รูปที่ 7 ค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณเมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบแอส I_{B2} และค่าความจุ

4. บทสรุป

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์โหมดกระแสที่ได้นำเสนอในResearch Articleสามารถกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ทางด้านเอาต์พุตจำนวน 4 เฟส โดยมีเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณที่สามารถควบคุมได้อิสระจากค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ และสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรทำงานที่แรงดัน ± 1.5 V มีอัตราการใช้พลังงาน 7.23 mW วงจรที่นำเสนอประกอบด้วย CCCII จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีกจำนวน 2 ตัว ซึ่งเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม และผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khan IA, Khawaja S. An integrable gm-C quadrature oscillator. International Journal of Electronics. 2000; 87(1): 1353-1357.
- [2] Toumazou C, Lidgey FJ, Haigh DG. Analogue IC design: the current-mode approach. Peter Peregrinus: London; 1990.
- [3] Cam U, Toker A, Cicekoglu O, Kuntmam H. Current-mode high output-impedance sinusoidal oscillator configuration employing single FTFN. Analog Integrated Circuits and Signal Proc. 2000; 24: 231-238.
- [4] Abuelma'atti MT. A new minimum component active-C OTA-based linear voltage (current)-controlled sinusoidal oscillator. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1990; 39: 795-797.

- [5] Prommee P, Angkeaw K, Chanwutitum J, Dejhan K. Dual input all-pass networks using MO-OTAs and its application. The 2007 ECTI International Conference. 2007; 129 -132.
- [6] Lahiri A. Current-mode variable frequency quadrature sinusoidal oscillators using two CCs and four passive components including grounded capacitors: a supplement. Analog Integrated Circuits and Signal Proc. 1990; 68: 129 – 131.
- [7] Minhaj N. CCII-based single-element controlled quadrature oscillators employing grounded passive components. International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009; 1: 294-296.
- [8] Prasad D, Bhaskar DR, Singh AK. Electronically controllable grounded capacitor current-mode quadrature oscillator using single MO-CCCDTA. Radioengineering. 2011; 20(1): 354-359.
- [9] Jaikla W, Siripruchyanun M, Bajer J, Biolek D. A simple current-mode quadrature oscillator using single CDTA. Radioengineering. 2008; 17(4): 33-40.
- [10] Prasad D, Bhaskar DR, Singh AK. Realisation of single-resistance-controlled sinusoidal oscillator: A new application of the CDTA. WSEAS Transactions on Electronics. 2008; 5(6): 257-9.
- [11] Keskin AU, Biolek D. Current mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifier (CDTA). IEE Proc.-Circuits Devices Syst. 2006; 153: 214-218.
- [12] Jaikla W, Siripruchyanun M. CCCDTAs-based versatile quadrature oscillator and universal biquad filter. Proceeding of ECTI 2007 conference. 2007; 1065-1068.
- [13] Li Y. A new single MCCCDTA based Wien-bridge oscillator with AGC. International Journal of Electronics and Communications (AEU). 2012; 66: 153-156.
- [14] Chen JJ, Chen CC, Tsao HW, Liu SI. Current-mode oscillators using single current follower. Electronics Letters. 1991; 27(22): 2056-2059.
- [15] Abuelma'atti MT. Grounded capacitor current-mode oscillator using single current follower. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1992; 39(12): 1018-1020.
- [16] Songkla SN, Jaikla W, Sreewirote B. A new resistor-less current-mode sinusoidal quadrature oscillator using CCCIIs. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2011 Proceedings of the 18th International Conference. 2011; 212-215.
- [17] Ghosh M. Bhattacharya S, Ranjan A, Paul SK. CMOS sinusoidal oscillator using current conveyor. Proc. of Int. Colloquiums on Computer Electronics Electrical Mechanical and Civil . 2011; 142-144.
- [18] Minhaj N. MOCCCI - Based Function Generator With Grounded passive Components. XXXII National Systems Conference, NSC 2008. 2008; 335-338.
- [19] Kumngern M, Knobnob B, Dejhan K. Single-resistance-controlled current-mode quadrature sinusoidal oscillator. ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. 2009; 1: 534-537.
- [20] Pandey N, Paul SK. Differential difference current conveyor transconductance amplifier: a new analog building block for signal processing. Journal of Electrical and Computer Engineering. 2011; 2011: 1-10.

- [21] Jaikla W, Silapan P, Chanapromma C, Siripruchyanun M. Practical implementation of CCTA based on commercial CCII and OTA. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems. 2008; 1-4.
- [22] Keawon R, Jaikla W. A resistor-less current-mode quadrature sinusoidal oscillator employing single CCCDTA and grounded capacitors. Przegląd Elektrotechniczny. 2011; 138-141.
- [23] Jaikla W, Siripruchyanun M. Cascadable current-mode biquad filter and quadrature oscillator using DO-CCCIIs and OTA. Circuits, systems, and signal processing. 2009; 28: 99-110.
- [24] Hasan S, Khan IA. Translinear-C function generator using MOCCCIIs. The Arabian Journal for Science and Engineering. 2007; 32: 127-132.
- [25] Minhaj N. Multioutput current-controlled current conveyor-based function generator. International Conference on Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies. 2009; 424-472.
- [26] Maheshwari S. Electronically tunable quadrature oscillator using translinear conveyors and grounded capacitors. Active and Passive Electronic Components. 2003; 26: 193-196.
- [27] Maheshwari S, Khan IA. Current controlled third order quadrature oscillator. IEE Proc., Circuits Devices Syst. 2005; 152(6): 605-607.
- [28] Frey DR. Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering, IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems. 1993; 140: 406-416.