

## วงจรถ่ายโอนสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเตอร์ทำงานในโหมดกระแส ด้วยวงจรถ่ายโอนนำถ่ายโอน

### Current-mode Quadrature Sinusoidal Oscillator Using Operational Transconductance Amplifier (OTAs)

สมศักดิ์ สมบูรณ์<sup>1\*</sup> วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล<sup>2</sup> และ เศรษฐ หงษ์ประสิทธิ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษ <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>3</sup>อาจารย์ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดขอนแก่น 40000

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรถ่ายโอนสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเตอร์ที่สามารถให้มุมต่างเฟสของสัญญาณ  $90^\circ$  วงจรที่นำเสนอมีคุณลักษณะที่เด่นคือสามารถควบคุมความถี่ได้โดยการปรับกระแสไบแอสด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยวงจรถ่ายโอนนำถ่ายโอน(โอทีเอ)จำนวนสี่ตัวและตัวเก็บประจุสองตัวต่อลงกราวด์ ซึ่งวงจรสามารถกำหนดเงื่อนไขในการกำเนิดความถี่และเงื่อนไขในการควบคุมความถี่แยกอิสระจากกัน จึงเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE ยืนยันได้ว่าวงจรถ่ายโอนสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีและสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ อีกทั้งยังได้ทำการทดลองการทำงานของวงจรโดยใช้ไอซีเบอร์ LM13700 ซึ่งผลการทดลองพบว่าวงจรถ่ายโอนสามารถกำหนดเงื่อนไขในการกำเนิดความถี่และเงื่อนไขในการควบคุมความถี่ได้ตามที่ออกแบบไว้เป็นอย่างดี วงจรมีอัตราสูญเสียกำลังไฟฟ้าเพียง 33.3mW ที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 2V$

#### Abstract

This paper presents a quadrature sinusoidal oscillator, providing sinusoidal signal, which differs  $90^\circ$  in phase. The features of the proposed circuit can be electronically controlled. The proposed circuit consists of 4 operational transconductance amplifiers(OTAs) and 2 grounded capacitors, which is able to control the oscillation frequency(OF) and condition of oscillation(CO). To confirm the performance and theory of proposed circuit is verified by PSPICE simulations, and the experimental results can be achieved by using the commercial parts(LM13700s). The power consumption is about 33.3mW at  $\pm 2V$  supply voltages

คำสำคัญ : วงจรถ่ายโอนสัญญาณ วงจรถ่ายโอนนำถ่ายโอน

Keywords : Oscillator, OTAs

\*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ [ink\\_101@hotmail.com](mailto:ink_101@hotmail.com) โทร. 08 9845 8479

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยมีแนวโน้มพัฒนาให้มี ความแม่นยำในการทำงานสูงขึ้น มีขนาดเล็กลง ในขณะที่สูญเสียกำลังงานต่ำ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นอีกวงจรหนึ่งที่ได้มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านระบบเครื่องมือวัด การประมวลผลสัญญาณ โดยเฉพาะระบบการสื่อสารทางโทรคมนาคมที่มีความสำคัญอย่างมาก พื้นฐานโดยทั่วไปจะใช้วงจรถอความถี่รูปไซน์เป็นหลัก วงจรกำเนิดความถี่รูปไซน์ชนิดควอเดรเจอร์เป็นวงจรแบบหนึ่งที่มีความนิยมในการนำมาออกแบบ จะมีองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่กำหนดความถี่ และเงื่อนไขในการกำเนิดความถี่ โดยทั่วไปวงจรถอคลื่นรูปไซน์จะถูกประกอบจากอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ

ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวงจรถอกำเนิดสัญญาณไซน์แบบต่างๆหลายรูปแบบ ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่เช่น CCI, CDTA, DVCC, OTA และอุปกรณ์อื่นๆกำลังได้รับความนิยมในการนำมาออกแบบวงจรถอกำเนิดสัญญาณเพื่อสามารถทำงานร่วมกับวงจรอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถควบคุมความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้วงจรมีความแม่นยำในการทำงานสูงขึ้น ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยลง และแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแรงดันต่ำลง ทำให้ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานลดต่ำลงแต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบวงจรให้มีขนาดเล็กลงโดยปราศจากเงื่อนไขในการกำเนิดความถี่ ส่งผลให้การกำเนิดสัญญาณช้าลงและมีการนำเสนอวงจรถอกำเนิดสัญญาณโดยที่เงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณและเงื่อนไขในการกำหนดความถี่ ยังไม่เป็นอิสระจากกันอีกทั้งยังมีการใช้อุปกรณ์พาสซีฟและอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมากส่งผลให้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้นและพื้นที่เมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

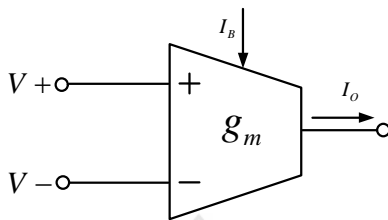
วงจรถอความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier: OTA) เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการนำมาออกแบบวงจรถอกำเนิดความถี่ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส อีกทั้งสามารถควบคุมการทำงานของวงจรถอด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ในปัจจุบันวงจรถอความนำถ่ายโอนยังได้ถูกผลิตมาอยู่ในรูปของวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเบอร์ที่ได้รับความนิยมได้แก่ CA3080, LM13600 และ LM13700 เป็นต้น

ดังนั้นบทความนี้นำเสนอวงจรถอกำเนิดสัญญาณแบบควอเดรเจอร์ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้วงจรถอ OTAs จำนวน 4 ตัวและตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่อลงกราวด์ โดยมีเงื่อนไขในการกำหนดความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณที่แยกอิสระจากกัน อีกทั้งยังสามารถปรับค่าความถี่ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำมาเสนอนี้จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน หรือพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบวงจรรวม เพื่อยืนยันความสามารถในการทำงานของวงจรถอได้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และทำการทดลองโดยใช้ไอซีเบอร์ LM13700 ซึ่งทั้งผลการจำลองและผลการทดลองวงจรถอสามารถกำหนดเงื่อนไขในการกำเนิดความถี่และเงื่อนไขในการควบคุมความถี่ได้ตามที่ออกแบบไว้เป็นอย่างดี

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 หลักการของวงจรถอความนำ

สัญลักษณ์ของวงจรถอความนำถ่ายโอนหรือโอทีเอแสดงดังรูปที่ 1 โดยขั้วไฟฟ้าต่างๆมีความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 1 สัญลักษณ์วงจรรขยายความนำถ่ายไอออน

เครื่องหมาย + และ - ของโอทีเอแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำหนดทิศทางกระแสเอาต์พุตได้ หรือเป็นได้ทั้งบวกและลบในวงจรเดียว พิจารณาได้ดังสมการที่ (1)

$$I_o = g_m [V_{in(+)} - V_{in(-)}] \tag{1}$$

โดย  $g_m$  คือค่าความนำของโอทีเอ ซึ่งสามารถแสดงได้เป็น

$$g_m = \frac{I_b}{2V_T} \tag{2}$$

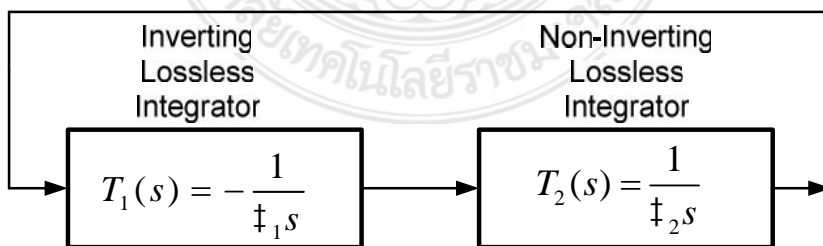
เมื่อ  $V_T$  เป็นศักดาความร้อน(Thermal voltage)

$I_b$  กระแสไบแอสของโอทีเอ

## 2.2 หลักการทำงานของวงจรถ้าเนตความถี่

หลักการของวงจรถ้าเนตสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ถูกสร้างขึ้นด้วยการต่อคาคัดกันระหว่างวงจรถ้าเนตอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟส(inverting integrator) ดังแสดงในรูปที่ 3 กับวงจรถ้าเนตอินทิเกรเตอร์แบบไม่กลับเฟส(non-inverting integrator) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งวงจรถ้าเนตทั้งสองเป็นวงจรถ้าเนตอินทิเกรเตอร์แบบไม่มีการสูญเสีย(lossless integrator)

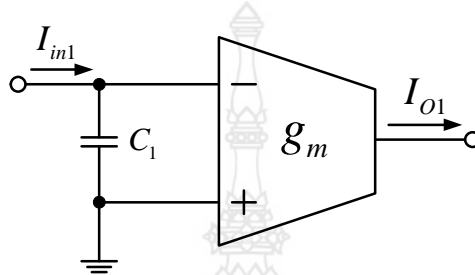
การทำงานของวงจรถ้าเนตสัญญาณนั้น ทำได้โดยบ่อนกลับสัญญาณเอาต์พุตกลับมายังอินพุต โดยกำหนดอัตราขยายวงรอบ(loop gain)ให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หลักการทำงานของวงจรถ้าเนตความถี่

วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบกลับเฟสที่สร้างจาก OTA แสดงดังรูปที่ 3 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

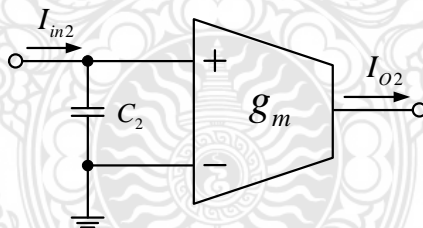
$$\frac{I_{out1}}{I_{in1}} = -\frac{g_{m1}}{SC_1} \quad (3)$$



รูปที่ 3 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบกลับเฟส

วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟสที่สร้างจาก OTA พิจารณาได้ดังรูปที่ 4 โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

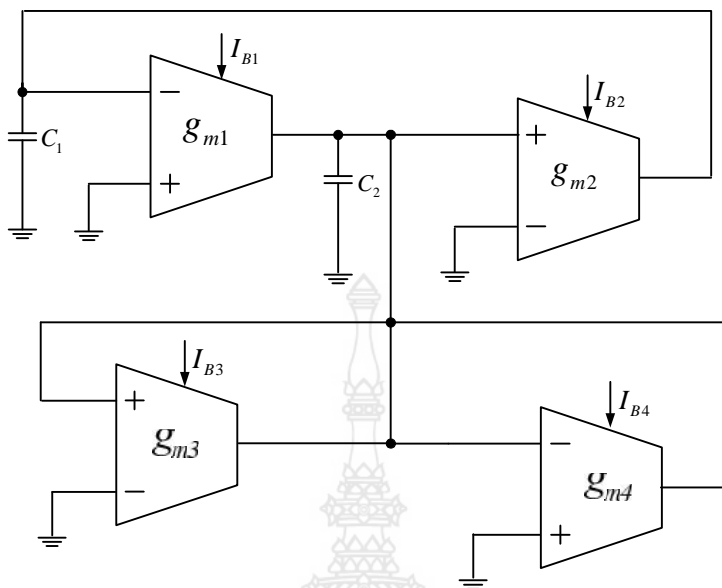
$$\frac{I_{out2}}{I_{in2}} = \frac{g_{m2}}{SC_2} \quad (4)$$



รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียแบบไม่กลับเฟส

### 2.3 การทำงานของวงจรที่นำเสนอ

วงจรถูกกำหนดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกัน ส่วนแรกคือวงจรอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟส ( $g_{m1}$ ) ส่วนที่สองเป็นอินทิเกรเตอร์แบบไม่กลับเฟส ( $g_{m2}$ ) และส่วนที่สามประกอบด้วย  $g_{m3}$  และ  $g_{m4}$  ซึ่งถูกออกแบบให้ทำหน้าที่กำหนดเงื่อนไขในการออสซิลเลต (condition of oscillation)



รูปที่ 5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ที่นำเสนอ

จากวงจรรูปที่ 5 สามารถหาสมการคุณลักษณะ(characteristic equation)ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์สามารถเขียนได้เป็น

$$s^2 + s\left(\frac{g_{m4} - g_{m3}}{C_2}\right) + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} = 0 \tag{5}$$

จากสมการที่ (5) สามารถกำหนดเงื่อนไขในการออสซิลเลตได้โดยการกำหนด

$$g_{m3} = g_{m4} \tag{6}$$

และความถี่ในการออสซิลเลตมีค่าเท่ากับ

$$S_o = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \tag{7}$$

ความถี่ของวงจรที่นำเสนอสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนค่าของ  $C_1$ ,  $C_2$  อีกทั้งยังสามารถปรับความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการควบคุมกระแสไบแอส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  ของ  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  ตามลำดับ

### 2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรที่ไม่เป็นอุดมคติ

จากสมการกระแสเอาต์พุตใน(1) แสดงถึงวงจรขยายความนำถ่ายโอนมีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ แต่ในกรณีที่วงจรขยายความนำถ่ายโอนไม่เป็นไปตามอุดมคติสามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$I_o = S g_m [V_{in(+)} - V_{in(-)}] \tag{8}$$

โดยที่  $S = 1 - v$  เมื่อ  $v \ll 1$  เป็นค่าส่งผ่านที่สามารถเบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรในกรณีที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติสามารถหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีกระแสสูญเสยทั้งแบบไม่กลับเฟสและกลับเฟส พิจารณาได้ดังนี้

$$\frac{I_{out1}}{I_{in1}} = \frac{S g_{m1}}{SC_1} \tag{9}$$

และ

$$\frac{I_{out2}}{I_{in2}} = -\frac{S g_{m2}}{SC_2} \tag{10}$$

และค่าความถี่ในกรณีที่ไม่นับอัตรามาคติ ความถี่ของการออสซิลเลตจะเท่ากับ

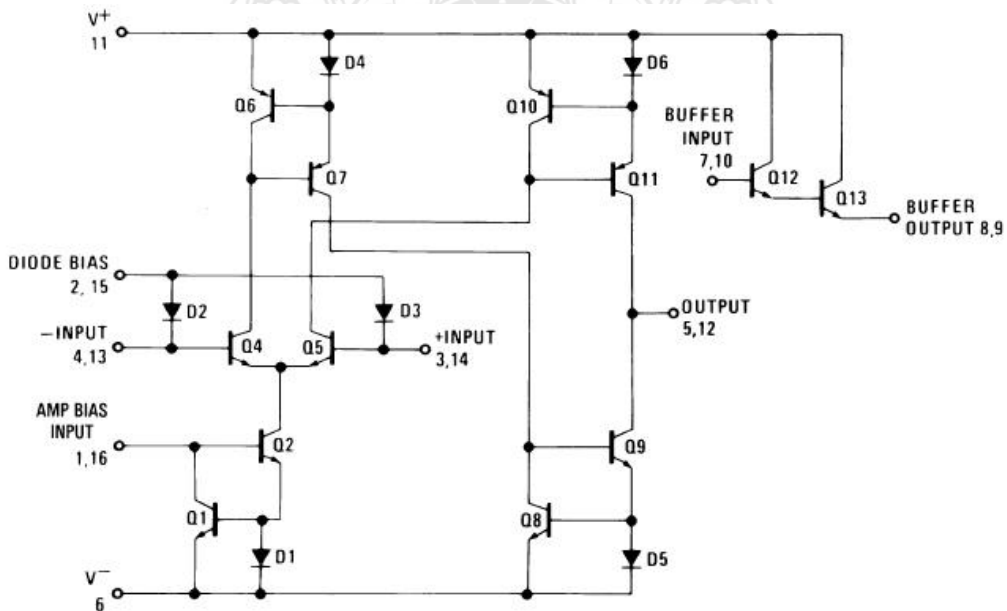
$$\zeta_o = \sqrt{\frac{S_1 g_{m1} S_2 g_{m2}}{C_1 C_2}} \tag{11}$$

จากสมการที่ (11) แสดงให้เห็นว่าค่าส่งผ่านที่เป็ยงเบนไปจาก 1 มีผลกระทบต่อความถี่ของวงจรมีน้อยมาก สำหรับเงื่อนไขในการออสซิลเลตยังคงเดิมพิจารณาได้จากสมการที่(6)

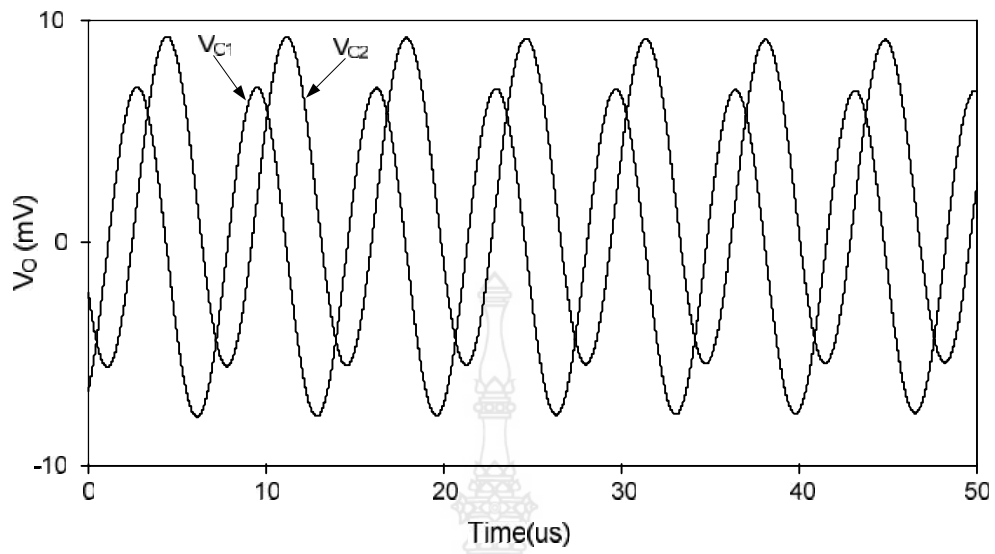
### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรถูกนำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรถูกเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE และทดลองโดยใช้ OTA เบอร์ LM13700 ซึ่งเป็นเบอร์ที่มีขายในท้องตลาดและมีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ OTA ทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 2V$  จากผลการจำลองและทดลองการทำงานของวงจรถูกพบว่าสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้

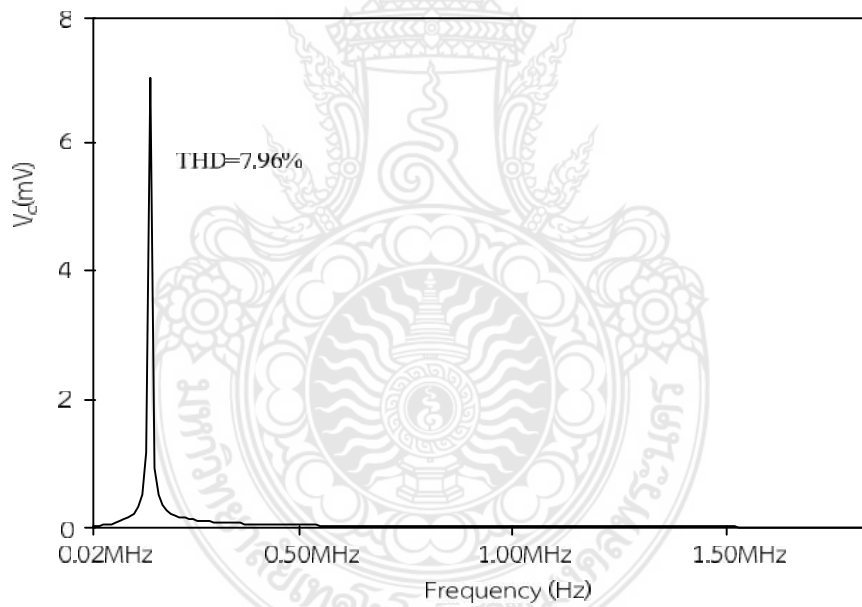
วงจรถูกเสนอกำหนดให้  $C_1 = C_2 = 10nF$  และกระแส  $I_{B1} = I_{B2} = 500\mu A$  ซึ่งผลการจำลองการทำงานของวงจรถูกพบว่าสัญญาณที่เอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดเรเจอร์ดังแสดงในรูปที่ 7 มีความต่างเฟสกัน  $90^\circ$  ในรูปที่ 8 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ความถี่ได้ 150 kHz มีค่าความผิดพลาดทางฮาร์โมนิกส์เท่ากับ 7.96%



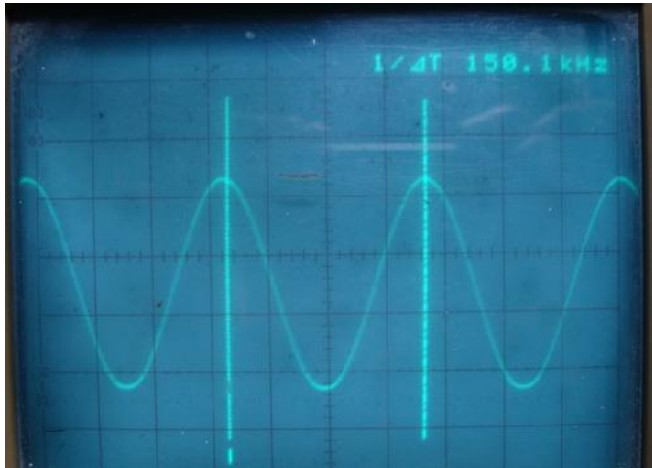
รูปที่ 6 โครงสร้างภายในของ OTA เบอร์ LM13700



รูปที่ 7 ผลการจำลองรูปคลื่นเอาต์พุตแบบควอดเรเจอร์



รูปที่ 8 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 150 KHz



รูปที่ 9 ผลการทดลองที่ได้จากวงจรในรูปที่ 5

#### 4. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ชนิดควอดเรเจอร์ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้ OTAs จำนวน 4 ตัวและตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่อลงกราวด์ โดยมีเงื่อนไขในการกำหนดความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณที่แยกอิสระจากกัน อีกทั้งยังสามารถควบคุมความถี่ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรมีความสามารถในการกำเนิดสัญญาณได้ทันที ซึ่งผลการจำลองการทำงานของวงจรกับผลการทดลองจริงสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่วงจรมีอัตราสูญเสียพลังงานเท่ากับ 33.3mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 2V$  จึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และอาจารย์ ดร.เวช หงษ์ประสิทธิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้ความรู้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัท พี เอส เอ็น เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ ซัพพลาย จำกัด ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- R. F Graf. 1997. *Oscillator Circuits*. Newnes: Boston. MA.
- มนตรี คำเงิน. 2009. วงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์โหมดกระแสโดยใช้วงจรโอทีเอ. *The Journal of KMUTNB*. 2009 Vol. 19 No.3 : 352-357.
- Arif Nacaroglu. 1999. Effect of Parasitic Elements on Oscillation Frequency of OTA-C Sinusoidal Oscillators. *Turk J Elec Engin*. 1999 Vol. 7 No.1-3 : 39-44.
- Saksit SUMMART. Chanchai THONGSOPA. Winai JAIKLA. 2012. OTA Based Current-mode Sinusoidal Quadrature Oscillator with Non-interactive Control. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY(Electrical review)*. 2012 ISSN 0033-2097,R.88, NR 7a : 14-17.
- Sahaj Saxena. Prabhat Kumar Mishra. 2011. A Novell Equip-amplitude Quadrature Oscillator Based on CFOA. *Internal Journal of Advanced Science and Technology*. 2011 Vol.31. : 93-98.



B.P. Das, N. Watson and Y.H. Liu. 2010. **Bipolar OTA Voltage controlled sinusoidal oscillator**. International Conference on Circuits, Systems, Signals. 2010 : 101-105.

J. Galan, R.G. Carvajal, F. Munoz. 2005. **A Low-Power Low-Voltage OTA-C Sinusoidal Oscillator with more than two decades of Linear Tuning Range**. 2005 IEEE : 425-429.

มนตรี คำเงิน, กอบชัย เดชหาญ. 2008. **วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดราเจอร์ทำงานในแบบสัญญาณกระแสด้วยวงจรถ่าย DVCC**. Ladkrabang Engineering Journal. 2008 Vol. 25, No. 2 : 13-18.

ภมร ศิลาพันธ์, ธนันต์ ศรีสกุล, วินัย ใจกล้า และมนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2006. **วงจรถ่ายสัญญาณแบบควอดเรเตอร์และวงจรถ่ายความถี่โหมดกระแสแบบหลานหน้าที่ใช้ CDTA ที่ควบคุมด้วยกระแส**. The Journals of KMITNB. 2006 Vol.16 No.2. : 43-48.

T. Tsukutani, M. Higashimura, Y. Sumi and Y. Fuhui. 2000. **Electronically tunable current-mode Activeonly biquaratic filter**. International Journal of Electronics. 2000 Vol. 87. : 307-314.

