

การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์เท่านั้น Design of a Quadrature Oscillator Using Only Commercially Available Integrated Circuits

นันทน์ รุ่งเหมือนฟ้า¹

ธีรศิลป์ ทุมวิภาต²

วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์^{3*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไอทีและสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง natchanai.ro@kmitl.ac.th

²สาขาวิชาสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีดิจิทัล สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา teerasilapa.dum@cdti.ac.th

³ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง drworapong@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเท่านั้น ปราศจากการใช้งานอุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 และออปแอมป์เบอร์ LM741 อย่างละสองตัว โดยค่าความถี่ในการออสซิลเลตสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านอัตราขยายค่าความนำ (g_m) ของไอซีเบอร์ LT1228 จากการแปรค่ากระแสไบอัส (I_B) จากภายนอกวงจร คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอถูกตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้เทคโนโลยีไอซีจากบริษัทผู้ผลิตผ่านโปรแกรม PSPICE เพื่อแสดงให้เห็นถึงการทำงานของวงจรที่มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ ไอซีสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ วงจรแอนะล็อกแบบใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นหลัก การปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This paper proposes the design and synthesis of a quadrature oscillator circuit using only commercially available integrated circuits (ICs), without the use of any external passive components. The proposed circuit consists of two LT1228s along with two LM741s as an op-amp. The oscillation frequency can be adjusted electronically through the transconductance gain (g_m) of the LT1228 by varying the external biasing current (I_B). The performance of the proposed circuit was verified through simulation results using IC technology from the manufacturer via PSPICE software in order to demonstrate that the circuit is consistent with theoretical results.

Keywords: quadrature oscillator circuit, commercially available IC, only active analog circuit, electronically tunable

1. บทนำ

วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ (quadrature oscillator) หรือวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์สองชุดที่ขนาดสัญญาณเท่ากัน แต่มีมุมต่างเฟสกัน 90° เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายสำหรับงานออกแบบระบบสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ และการประมวลผลสัญญาณต่างๆ เนื่องจากมีสัญญาณเอาต์พุตสองชุดที่มีมุมต่างเฟสกัน 90° จึงสามารถนำไปใช้ในวงจรผสมสัญญาณ (quadrature mixers) ระบบสร้างคลื่นไซน์แบนด์เดียว (single-sideband generators) ตลอดจนระบบทดสอบ และวัดค่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแม่นยำสูง ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอการออกแบบวงจร

ออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟหลากหลายชนิด ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีความเสถียร หนาแน่นตัว และเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมหรือไอซี (integrated circuits, IC) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา [1]-[6] พบว่าวงจรใน [2], [3], [6] ไม่สามารถปรับความถี่ในการออสซิลเลต (oscillation frequency) ได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการคือ ต้องอาศัยอุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก [1]-[6] เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาในระดับวงจรรวม ดังนั้นจึงมีแนวทางการวิจัยที่มุ่งเน้นการออกแบบวงจรโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยใน [7]-[9] จึงได้นำเสนอวงจรที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการด้านการพัฒนาอุปกรณ์ในระดับวงจรรวม

ไอซีเบอร์ LT1228 ซึ่งเป็นไอซีเชิงพาณิชย์จากบริษัท Linear Technology Corporation [13] ได้รับความนิยมอย่างมากในการออกแบบวงจร เนื่องจากโครงสร้างภายในประกอบด้วยวงจรร้อยยสองส่วน ได้แก่ วงจร OTA (operational transconductance amplifier) และวงจร CFOA (current feedback operational amplifier) ส่งผลให้ไอซีเบอร์ LT1228 มีประสิทธิภาพในการทำงานที่หลากหลาย ครอบคลุมทั้งการควบคุมคุณสมบัติด้วยกระแสจากภายนอก และการประมวลผลสัญญาณที่ความถี่สูง อีกทั้งยังมีขนาดเล็ก จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในเชิงปฏิบัติ ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น ไอซีเบอร์ LT1228 จึงถูกนำไปพัฒนาเป็นวงจรต่างๆ เช่น วงจรกรองสัญญาณ [10] วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ [11] และวงจรควบคุมค่าความจุไฟฟ้า [12] เป็นต้น

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ขึ้นโดยอาศัยเพียงอุปกรณ์แอคทีฟเพียงเท่านั้น วงจรที่นำเสนอสังเคราะห์ขึ้นจากไอซีเบอร์ LT1228 และออปแอมป์เบอร์ LM741 จากบริษัท Intersil Corporation [14] จำนวนอย่างละสองตัว โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก ความถี่ในการออสซิลเลตสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านการแปรค่ากระแสไบอัสจากภายนอก คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอถูกแสดงให้เห็นจริงด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยีของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลลัพธ์ในทางทฤษฎี

2. ไอซีสำเร็จรูป

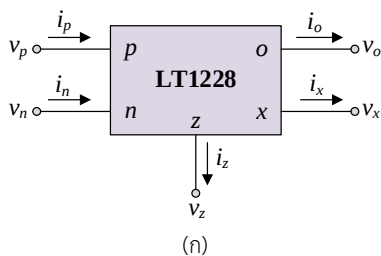
2.1 ไอซีเบอร์ LT1228

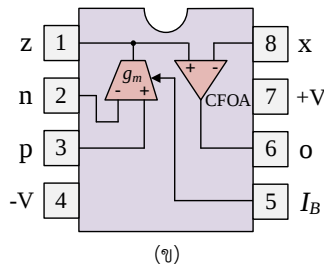
รูปที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไอซีเบอร์ LT1228 และโครงสร้างวงจรภายในของวงจรซึ่งประกอบด้วย วงจร OTA และวงจร CFOA โดยที่คุณสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสของไอซีเบอร์ LT1228 อธิบายได้ดังนี้

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_n \\ i_z \\ v_x \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha g_m & -\alpha g_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{OL} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_z \\ i_x \\ i_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ α และ β คือ ค่าความเบี่ยงเบนในการส่งผ่านอัตราขยายค่าความนำ (transconductance tracking error) และค่าผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดัน (non-ideal voltage gain) ตามลำดับ ในทางอุดมคติ α และ β มีค่าเท่ากับ 1 R_{OL} คือค่าส่งผ่านความต้านทานกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transresistance) ซึ่งในทางอุดมคติมีค่าเป็นอนันต์ และ g_m คือ อัตราขยายค่าความนำกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transconductance gain) ของไอซีเบอร์ LT1228 โดยสามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการควบคุมกระแสไบอัส (I_B) จากภายนอก ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$g_m = 10I_B \quad (2)$$




รูปที่ 1 ไอซีเบอร์ LT1228

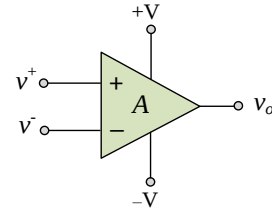
(ก) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า (ข) โครงสร้างภายในไอซี

2.2 ออปแอมป์

รูปที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของออปแอมป์ โดย v^+ คือแรงดันอินพุตไม่กลับเฟส (non-inverting input voltage) และ v^- คือแรงดันอินพุตกลับเฟส (inverting input voltage) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต (v_{in}) และแรงดันเอาต์พุต (v_o) จะเท่ากับ

$$v_o = A(v^+ - v^-) = A v_{in} \quad (3)$$

เมื่อ A คือ อัตราขยายแรงดันลูปเปิด (open-loop voltage gain) ซึ่งมีค่าขึ้นกับความถี่ในการใช้งาน หากออปแอมป์ไม่มีการต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ จากภายนอก ขนาดอัตราขยายแรงดันของออปแอมป์ที่ความถี่ต่ำหรือ $A_0 = |A(j\omega)|$ จะมีค่าสูงมาก หรือมีค่าอยู่ระหว่าง $10^8 > A_0 > 10^5$ สำหรับออปแอมป์ที่มีเทคโนโลยีแบบไบโพลาร์



รูปที่ 2 ออปแอมป์

การออกแบบออปแอมป์ในทางปฏิบัตินั้นจะมีตำแหน่งโพลเด่น (dominant pole) อยู่บนแกนจริงซีกซ้ายของระนาบเชิงซ้อน s (s -plane) หรือ มีตำแหน่งอยู่ที่ $s = -\omega_a$ ส่งผลให้อัตราขยายแรงดันลูปเปิด $A(s)$ ที่ขึ้นกับความถี่จะเท่ากับ

$$A(s) = \frac{A_0 \omega_a}{s + \omega_a} = \frac{\omega_t}{s + \omega_a} = \frac{B}{s + \omega_a} \quad (4)$$

เมื่อ A_0 คือ อัตราขยายแรงดันลูปเปิดที่ความถี่ต่ำ (open-loop dc gain) ω_a คือ ความถี่ -3dB ของออปแอมป์ และ ω_t คือ ผลคูณระหว่างอัตราขยายแรงดันลูปเปิดที่ความถี่ต่ำกับความถี่ -3dB (gain-bandwidth product, B) โดยทั่วไป ω_a จะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นหากช่วงปฏิบัติการของออปแอมป์มีค่าความถี่ $\omega \gg \omega_a$ ส่งผลให้ ω_a ในสมการ (4) สามารถละทิ้งได้ หรือค่า $A(s)$ จะถูกประมาณเป็น

$$A(s) \cong \frac{B}{s} \quad (5)$$

สมการ (5) แสดงให้เห็นว่าออปแอมป์ที่ทำงานในลักษณะลูปเปิดมีคุณสมบัติเสมือนเป็นวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless integrator)

หากมีการใช้งานออปแอมป์ในช่วงความถี่สูง จะมีผลกระทบอันเนื่องจากโพลเด่นตัวที่สอง (second dominant pole, ω_b) ของออปแอมป์ ดังนั้นอัตราขยายแรงดันลูปเปิด $A(s)$ ในกรณีนี้จึงเขียนได้ใหม่เท่ากับ

$$A(s) = \frac{B}{s} \frac{\omega_b}{s + \omega_b} = \frac{B}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_b}\right)} \cong \frac{B}{s} \left(1 - \frac{s}{\omega_b}\right) \quad (6)$$

3. วงจรรอสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ที่นำเสนอ

3.1 คุณสมบัติในทางอุดมคติ

รูปที่ 3 แสดงวงจรรอสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ที่นำเสนอ โดยออกแบบและสังเคราะห์ขึ้นจากไอซีเบอร์ LT1228 และออปแอมป์ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟทั้งหมด ปราศจากการใช้งานอุปกรณ์พาสซีฟ เมื่อวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3 โดยอาศัยคุณสมบัติของไอซีเบอร์ LT1228 ดังสมการ (1) และออปแอมป์ดังสมการ (5) จะได้สมการคุณลักษณะของวงจรเท่ากับ

$$s^2 + \frac{g_{m1} B_1 B_2}{g_{m2}} = 0 \quad (7)$$

จากสมการ (7) พบว่าความถี่ในการออสซิลเลต (oscillation frequency, OF) ของวงจรเท่ากับ

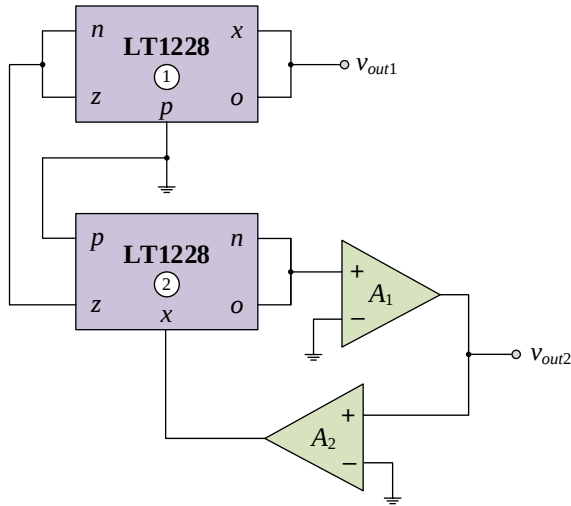
$$\omega_{osc} = 2\pi f_{osc} = \sqrt{\frac{g_{m1}B_1B_2}{g_{m2}}} \quad (8)$$

สมการ (8) แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ในการออสซิลเลตที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านการแปรค่า g_{m1} และ/หรือ g_{m2} โดยค่า g_m ของไอซีเบอร์ LT1228 สามารถปรับค่าได้ระหว่าง $10 \mu A/V$ ถึง $10 mA/V$ ($I_B = 1 \mu A$ ถึง $1 mA$) [13]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้ว V_{out1} และ V_{out2} ของวงจรที่นำเสนอแสดงดังต่อไปนี้

$$V_{out2} = \left(\frac{s}{B_2}\right) V_{out1} \quad (9)$$

สมการ (9) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ หรือมีมุมต่างเฟสเท่ากับ 90°



รูปที่ 3 วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ที่นำเสนอ

3.2 คุณสมบัติในทางปฏิบัติ

เมื่อวิเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ในรูปที่ 3 โดยคำนึงถึงคุณสมบัติของไอซีเบอร์ LT1228 ในทางปฏิบัติ และโพลเด่นตัวที่สองของออปแอมป์ ทำให้สมการคุณลักษณะของวงจรดังสมการ (7) กลายเป็น

$$s^2 + \left(\frac{\alpha_1 g_{m1} B_1 B_2}{\alpha_2 g_{m2}}\right) \left(\frac{1 - \frac{s}{\omega_{b2}}}{1 - \frac{s}{\omega_{b1}}}\right) = 0 \quad (10)$$

จากสมการข้างต้น แสดงให้เห็นว่าหากต้องการหลีกเลี่ยงผลกระทบจาก ω_{bi} โดยที่ $i = 1, 2$ ความถี่ปฏิบัติงานต้องมีค่าในช่วง $\omega \ll \omega_{bi}$ ดังนั้นจึงส่งผลให้สมการ (10) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$s^2 + \left(\frac{\alpha_1 g_{m1} B_1 B_2}{\alpha_2 g_{m2}}\right) = 0 \quad (11)$$

และจะได้ความถี่ในการออสซิลเลตของวงจรในกรณีนี้ เท่ากับ

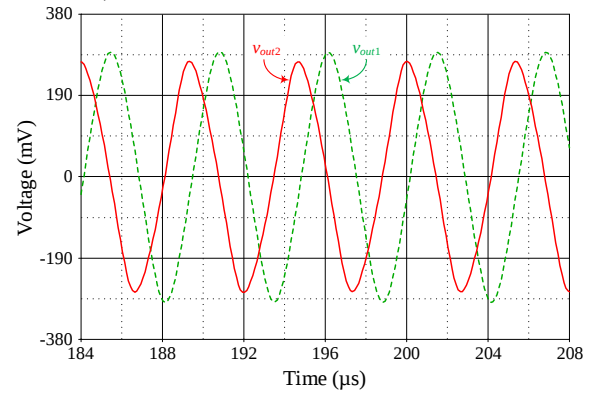
$$\omega_{osc} = 2\pi f_{osc} = \sqrt{\frac{\alpha_1 g_{m1} B_1 B_2}{\alpha_2 g_{m2}}} \quad (12)$$

สมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ ω_{osc} มีค่าเป็นแบบไปจากค่าในทางอุดมคติ อย่างไรก็ตามค่าความถี่สามารถปรับชดเชยได้ด้วยการแปรค่า g_{m1} และ/หรือ g_{m2} ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

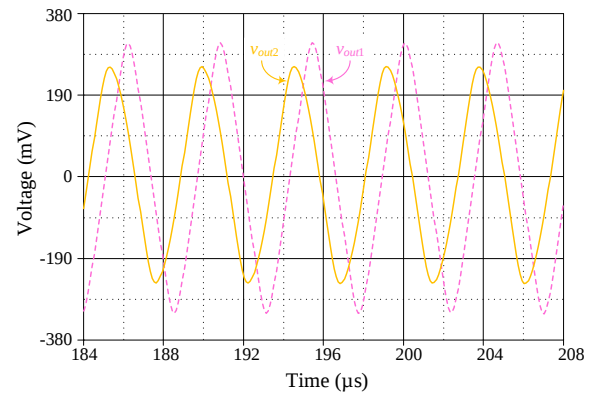
4. ผลการจำลองการทำงานของวงจร

วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์ที่นำเสนอได้ถูกตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยอาศัยเทคโนโลยีไอซีเบอร์ LT1228 [13] ร่วมกับออปแอมป์เบอร์ LM741 [14] จากบริษัทผู้ผลิตผ่านโปรแกรม PSPICE เมื่อกำหนดให้ไฟเลี้ยงให้กับวงจรเท่ากับ $\pm 5 V$ ผลการจำลองการทำงานพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (total power consumption) เท่ากับ $0.143 W$

ในการจำลองการทำงานของวงจรได้กำหนดให้ $g_{m1} = 0.2 mA/V$ ($I_{B1} = 20 \mu A$) และ $g_{m2} = 5.5 mA/V$ ($I_{B2} = 550 \mu A$) และ $B = 5.65 Mrad/s$ จะได้ $f_{osc} = 171.48 kHz$ โดยหากกำหนดให้ $g_{m1} = 0.2 mA/V$ ($I_{B1} = 20 \mu A$) และ $g_{m2} = 3.5 mA/V$ ($I_{B2} = 350 \mu A$) จะได้ $f_{osc} = 214.96 kHz$ ซึ่งรูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของแรงดันเอาต์พุต V_{out1} และ V_{out2} ซึ่งพบว่าแรงดันเอาต์พุตทั้งสองมีมุมต่างเฟสประมาณ 91.51° คิดเป็นค่าความผิดพลาด (error) เท่ากับ 1.68% ในขณะที่รูปที่ 5 ผลตอบสนองสเปกตรัมความถี่ของแรงดันเอาต์พุต V_{out1} และ V_{out2} จากผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรมีค่า THD (total harmonic distortion) ของแรงดันเอาต์พุต V_{out1} และ V_{out2} เท่ากับ 3.18% และ 5.12% ตามลำดับ รูปที่ 6 แสดงแผนภาพ Lissajous ระหว่าง V_{out1} กับ V_{out2} ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ควอดราเจอร์ของแรงดันเอาต์พุตทั้งสองที่มีความต่างเฟสใกล้เคียง 90°



(น)



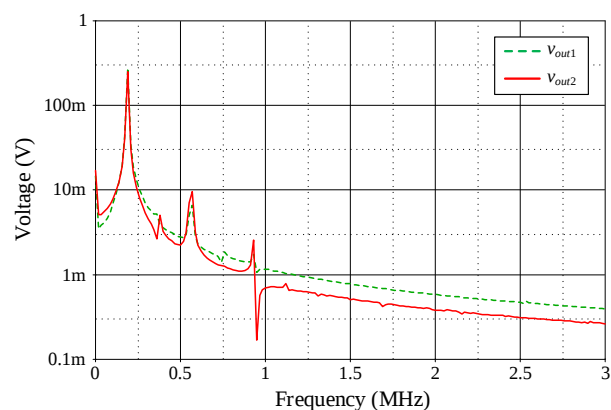
(ข)

รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางเวลาของแรงดันเอาต์พุต V_{out1} และ V_{out2}

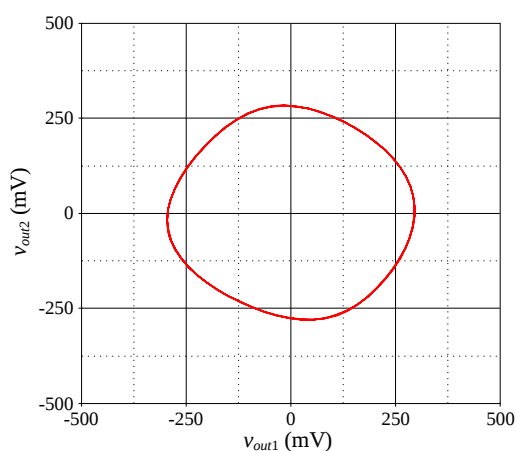
(น) $f_{osc} = 171.48 kHz$ (ข) $f_{osc} = 214.96 kHz$

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 จำนวนสองตัวต่อร่วมกับออปแอมป์จำนวนสองตัว ปรากฏจากการใช้งานอุปกรณ์พาสซีฟ โดยวงจรที่นำเสนอสามารถสร้างสัญญาณไซน์ได้สองเอาต์พุต ซึ่งมีมุมต่างเฟส 90° ความถี่ในการออสซิลเลตสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากการแปรค่ากระแสไบอัสจากภายนอกวงจร ผลการจำลองการทำงานของวงจรได้ถูกตรวจสอบผ่านโปรแกรม PSPICE โดยใช้เทคโนโลยีจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งพบว่ามีการทำงานของวงจรที่ถูกต้องสอดคล้องกับผลในทางทฤษฎี



รูปที่ 5 ผลตอบสนองแอมพลิจูดความถี่
ของ V_{out1} และ V_{out2} ที่ $f_{osc} = 171.48$ kHz



รูปที่ 6 แผนภาพ Lissajous
ระหว่าง V_{out1} และ V_{out2} ที่ $f_{osc} = 171.48$ kHz

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Tuntrakool, M. Kumngern, R. Sotner, N. Herencsar, P. Suwanjan, W. Jaikla, "High input impedance voltage-mode universal filter and its modification as quadrature oscillator using VDDAs," *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 55, pp. 324–332, 2017.
- [2] F. Yucel, E. Yuce, "Supplementary CII based second-order universal filter and quadrature oscillators," *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol. 118, no. 153138, 2020.
- [3] S. F. Wang, H. P. Chen, Y. Ku, M. X. Zhong, "Voltage-mode multifunction biquad filter and its application as fully-uncoupled quadrature oscillator based on current-feedback operational amplifiers," *Sensors*, vol. 20, no. 6681, 2020.
- [4] M. Kumngern, F. Khateb, T. Kulej, C. Psychalinos, "Multiple-input universal filter and quadrature oscillator using multiple-input operational transconductance amplifiers," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56253–56263, 2021.
- [5] W. Jaikla, S. Siripongdee, F. Khateb, R. Sotner, P. Silapan, P. Suwanjan, A. Chaichana, "Synthesis of biquad filters using two VD-DIBAs with independent control of quality factor and natural frequency," *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol. 132, no. 153601, 2021.
- [6] H.P. Chen, S.F. Wang, Y. Ku, Y.C. Yi, Y.H. Chen, "Experimental verification of on-chip biquadratic filter and oscillator," *IEEE Sens. J.*, vol. 23, pp. 3736–3746, 2023.
- [7] N. Roongmuanpha, S. Unhavanich, T. Pukkalanun, and W. Tangsirat, "Practical realization of only active floating lossless inductance simulator," *2024 10th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, Luang Prabang, Laos, 2024, pp. 5–8.
- [8] นันทน์ รุ่งเหมือนฟ้า และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, "วงจรคูณค่าความจุไฟฟ้าแบบลอยตัวโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นหลัก," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47, 13-15 พฤศจิกายน 2567
- [9] นันทน์ รุ่งเหมือนฟ้า และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, "วงจรรวมค่าความต้านทานค่าลบขึ้นกับความถี่แบบใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นหลัก," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, 28-30 พฤษภาคม 2568, หน้า 145-148
- [10] M. P. P. Wai, W. Jaikla, A. Chaichana, C. Chanapromma, P. Suwanjan, W. Sunthonkanokpong, "Voltage-mode biquad filter using three LT1228s with independent and electronic control of center frequency and quality factor," *Engineering Lett.*, vol. 31, no. 2, 2023.
- [11] P. Srisuchart, W. Jaikla, M. Siripruchyanun, "Electronically controllable grounded inductance simulators using LT1228," *Microelectron. J.*, vol. 66, pp. 123–129, 2017.
- [12] N. Roongmuanpha and W. Tangsirat, "Practical floating capacitance multiplier implementation with commercially available IC LT1228s," *Inform. MIDEM*, vol. 51, no. 1, pp. 85–94, 2021.
- [13] Linear Technology, "100 MHz current feedback amplifier with DC gain control," *LT1228 datasheet*, 1994.
- [14] Intersil Corporation, "0.9 MHz single and dual, high gain operational amplifiers for military, industrial and commercial applications," *LM741 datasheet*, 1998.