

วงจรถอดรากโหมดกระแสที่สามารถควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ VDTA An Electronically Controllable Current-mode Square-rooting Circuit Employing VDTA

ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ¹ และภมร ศิลาพนธ์²

Supawat Lawanwisut¹ and Phamorn Silapan²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

E-Mail: s.lawanwisut@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรถอดรากสัญญาณโหมดกระแสโดยใช้ VDTA (Voltage Differencing Transconductance Amplifier) ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ สามารถควบคุมขนาดของกระแสเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นเชิงเส้น กระแสเอาต์พุตเป็นอิสระต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และสามารถรองรับสัญญาณกระแสอินพุตได้ในย่านกว้าง โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย VDTA เพียงตัวเดียว โดยปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟภายนอก วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรถอดรากสัญญาณโหมดกระแส VDTA

Abstract

This article presents a current-mode square rooting circuit employing VDTA (Voltage Differencing Transconductance Amplifier). The features of the proposed circuit are that; the magnitude of the output current can be linearly/electronically tuned with wide input dynamic range; the output current is temperatureinsensitive, the circuit description is very simple, consisting of merely one VDTA. Without external passive elements, the proposed circuit is very appropriate to further develop into an integrated circuit. The PSpice simulation results

are depicted. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords: Current-mode square rooting circuit, VDTA

1. บทนำ

วงจรถอดรากสัญญาณเป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญ และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันในระบบเครื่องมือวัดอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจร RMS [1] จากศึกษาพบว่ามีการนำเสนอวงจรถอดรากที่สองด้วยอุปกรณ์สำเร็จรูป ออปแอมป์ต่อร่วมกับ CCII และ CMOS [2] วงจรนี้มีลักษณะเด่นที่โครงสร้างวงจรที่ไม่ซับซ้อนประกอบด้วยออปแอมป์หนึ่งตัวต่อร่วมกับ CCII และ CMOS อีกอย่างละหนึ่งตัว แต่อย่างไรก็ตามวงจรนี้ยังใช้ตัวต้านทานแบบลอย ซึ่งไม่เหมาะกับการนำมาสร้างเป็นวงจรรวมเพราะทำให้ใช้พื้นที่ในการสร้างชิปมาก อีกทั้งไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัตโนมัติต้องมีการปรับแต่งวงจรหรือเพิ่มเติมวงจร ยิ่งไปกว่านั้นด้วยโครงสร้างที่มีออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักจึงทำให้มีแบนด์วิธไม่กว้าง

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยง ในวงจรและระบบอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากความต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย ที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการทำงานในโหมดกระแส (Current-mode) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับเทคนิคการทำงานในโหมดแรงดัน ได้แก่ มีช่วงพิสัยพลวัตที่กว้าง (Larger dynamic range) มีแบนด์วิธกว้าง และ

บริเวณกำลังงานต่ำ [3-4] ด้วยข้อดีของวงจรในโหมดกระแสตรงที่ได้กล่าวมาจึงมีผู้ออกแบบวงจรอตรรกสัญญาณในโหมดกระแสโดยใช้ CMOS คลาสเอบี [5] ทำให้วงจรตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้นและเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมแตร่วงจรต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสภายนอกจำนวนหลายตัวและมีเงื่อนไขในการต่อสมพหุกันของแหล่งจ่ายกระแส และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีผู้นำเสนอวงจรอตรรกสัญญาณทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแสโดยใช้วงจรสายพานกระแสยุคที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (CCCI) จำนวน 2 ตัว ร่วมกับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ด้วยกระแสอีกหนึ่งตัว [6] จุดด้อยของวงจรในโหมดแรงดันคือ ไม่สามารถปรับขนาดของแรงดันเอาต์พุตได้ และแรงดันเอาต์พุตยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง อีกทั้งต้องการความสมพหุกันของกระแสไบแอส นอกจากนี้ได้มีผู้นำเสนอวงจรอตรรกสัญญาณโดยใช้วงจรขยายความนำถ่ายโอน [7] ข้อดีของวงจรนี้คือ สามารถปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้แบบอิเล็กทรอนิกส์และกระแสเอาต์พุตไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามวงจรนี้ตอบสนองต่อความถี่ที่ต่ำ เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีผู้นำเสนอวงจรอตรรกสัญญาณโหมดกระแสโดยใช้อุปกรณ์ CCCDTA เพียงตัวเดียว [8] แต่อย่างไรก็ตาม วงจรนี้ยังสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ในย่านแคบๆ และไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งส่งผลให้เมื่อนำไปใช้งานจริงจะให้ความซับซ้อนขึ้นและมีขีดจำกัดในการควบคุม

วงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดัน (Voltage Differencing Transconductance Amplifier: VDTA) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีการนำเสนอมานาน [9] มีลักษณะเด่นของตัวอุปกรณ์คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ขาอินพุต (V_p , V_n) จะส่งผ่านกระแสที่ขา Z โดยอัตราการส่งผ่านความนำกระแสด้วยค่าความนำกระแสตัวแรก และแรงดันตกคร่อมที่ Z ยังทำให้ส่งผ่านกระแสไปยังขา $X+$ และ $X-$ ด้วยค่าความนำกระแสตัวที่สอง อีกทั้งค่าความนำกระแสยังสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบแอสจากภายนอก จึงทำให้มีการนำเอาอุปกรณ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ มากมายเช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น บทความวิจัยนี้จึงมุ่งหมายเพื่อนำเสนอ โครงสร้างวงจรอตรรกสัญญาณโหมดกระแส ซึ่งวงจรที่นำเสนอมีข้อดีคือ สามารถควบคุม

ขนาดของกระแสเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ได้โนย่านกว้างขึ้นและอย่างเป็นเชิงเส้นมากขึ้น กระแสเอาต์พุตเป็นอิสระต่ออุณหภูมิ โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย VDTA จำนวน 1 ตัว โดยปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟภายนอก วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 หลักการทำงานของวงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดัน

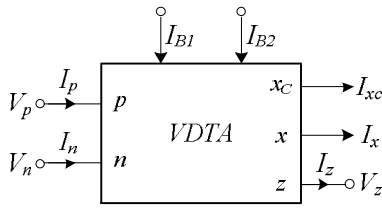
เพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจรที่นำเสนอ ส่วนนี้จึงอธิบายหลักการทำงานของ VDTA ที่เป็นอุปกรณ์หลักของวงจร โดยมีสัญลักษณ์และโครงสร้างภายในดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ VDTA เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำเร็จรูปที่แปลงผันจากผลต่างแรงดันเป็นกระแส โดยมีสัญลักษณ์และวงจรเทียบเคียงดังแสดงในรูปที่ 1 ขา p และ n เป็นอินพุตที่ขา z สามารถเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต ขา x และ xc เป็นเอาต์พุต ในงานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงให้มีสองขา ซึ่ง xc มีผลเหมือนขา x กันทุกประการ ส่วน I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบแอส ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแต่ละขาในกรณีที่มีโครงสร้างเป็น BJT สามารถแสดงได้ดังสมการเมทริกซ์นี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_z \\ I_x \\ I_{xc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{m1} & -g_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

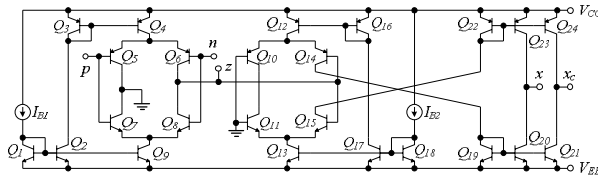
โดย g_{m1} และ g_{m2} คือค่าความนำถ่ายโอนที่ขา z และ x ตามลำดับ

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

เมื่อ V_T คือศักดาความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าโดยประมาณ $26mV$ ที่อุณหภูมิ $300K$ หรือ $27^\circ C$



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของ VDTA



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของ VDTA

2.2 วงจรถอดรหัสดูสองโหมดกระแส

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของ VDTA ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1 และจากรูปที่ 3 เพื่อหาค่าของ I_z พบว่า

$$I_z = I_m = g_{m1} V_n \quad (3)$$

จากรูปที่ 3 ยังพบอีกว่า $V_n = V_z$ เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (3) และหาค่า V_z ได้จาก

$$V_z = \frac{I_m}{g_{m1}} \quad (4)$$

พิจารณาหาค่า I_x ซึ่งหาค่าได้จาก

$$I_x = I_{out} = g_{m2} V_z \quad (5)$$

เมื่อนำค่า V_z จากสมการที่ (4) แทนค่าลงในสมการที่ (5) ค่าของ I_{out} มีค่าดังนี้

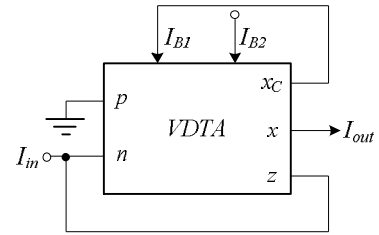
$$I_{out} = \frac{g_{m2} I_m}{g_{m1}} \quad (6)$$

จากค่า $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ และ $g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T}$ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 พบว่า $I_{B1} = I_{out}$ ดังนั้นสมการที่ (6) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_{out} = \sqrt{I_{B2} I_m} = \sqrt{I_{B2}} \sqrt{I_m} \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) พบว่าวงจรสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรถอดรหัสดูสองได้โดยมีอัตราขยายที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย I_{B2} อีกทั้งในสมการนี้ไม่มี

พจน์ของ V_T จึงกล่าวได้ว่าวงจรถอดรหัสดูสองที่นำเสนอมีผลกระทบอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพดี



รูปที่ 3 วงจรถอดรหัสดูสองโหมดกระแส

2.3 การวิเคราะห์กรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีไม่เป็นไปตามอุดมคติ ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแต่ละขั้วสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_z \\ I_x \\ I_{xc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_+ g_{m1} & -\beta_- g_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta g_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

โดยค่า β_+ , β_- , β และ α เป็นค่าส่งผ่านของแรงดันหรือกระแสที่มีการเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งเกิดจากความต้านทานแฝงและตัวเก็บประจุแฝงของ VDTA ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ในกรณีไม่เป็นอุดมคติ กระแสเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสดูสองหาค่าได้จาก

$$I_{out} = \sqrt{\frac{\beta I_{B2} I_m}{\alpha \beta_-}} = \sqrt{\frac{\beta I_{B2}}{\alpha \beta_-}} \sqrt{I_m} \quad (9)$$

ในทางปฏิบัติค่าความผิดพลาดที่เกิดจาก β_+ , β_- , β และ α มีความไวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและในความถี่สูงด้วย

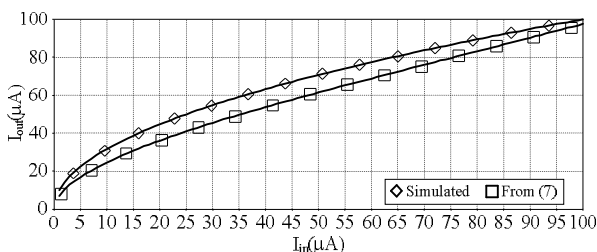
3. ผลการจำลองการทำงาน

การยืนยันประสิทธิภาพของวงจรถอดรหัสดูสองที่นำเสนอได้ใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลองการทำงาน โดยโครงสร้างภายในของ VDTA ใช้พารามิเตอร์ของ BJT ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN และ PNP เบอร์ NR200N และ PR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดอาร์เลย์ ALA400 ของ AT&T โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 4 แสดงคุณลักษณะสมบัติทางไฟตรงของวงจรถอดรหัสดูสองที่นำเสนอ ซึ่งพบว่าวงจรที่นำเสนอสามารถรองรับ

อินพุตได้กว้างถึง $100\mu A$ สอดคล้องกับที่วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (7) รูปที่ 5 และ 6 แสดง สัญญาณเอาต์พุตเทียบอินพุตเมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์และสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 10kHz เห็นได้ว่าแม้ป้อนสัญญาณไซน์หรือสามเหลี่ยมวงจรก็ยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรถอดรากที่สองได้

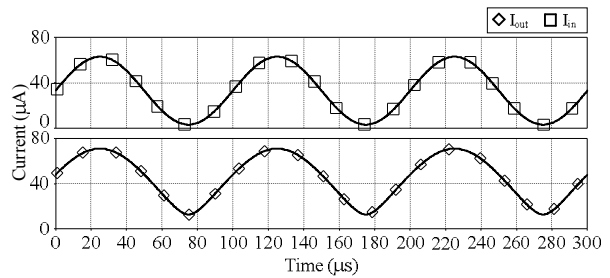
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ BJT ทรานซิสเตอร์

NPN
.MODEL NR200N NPN(RB=262.5 IRB=0 RBM=12.5 RC=25 RE=0.5 +IS=242E-18 EG=1.206 XTI=2 XTB=1.538 BF=137.5 +IKF=13.94E-3 NF=1 VAF=159.4 ISE=72E-16 NE=1.713 +BR=0.7258 IKR=4.396E-3 NR=1 VAR=10.73 ISC=0 NC=2 +TF=0.425E-9 TR=0.425E-8 CJE=0.428E-12 VJE=0.5 +MJE=0.28 CJC=1.97E-13 VJC=0.5 MJC=0.3 XCJC=0.065 +CJS=1.17E-12 VJS=0.64 MJS=0.4 FC=0.5)
PNP
.MODEL PR200N PNP(RB=163.5 IRB=0 RBM=12.27 RC=25 RE=1.5 +IS=147E-18 EG=1.206 XTI=1.7 XTB=1.866 BF=110 +IKF=4.718E-3 NF=1 VAF=51.8 ISE=50.2E-16 NE=1.650 +BR=0.4745 IKR=12.96E-3 NR=1 VAR=9.96 ISC=0 NC=2 +TF=0.610E-9 TR=0.610E-8 CJE=0.36E-12 VJE=0.5 +MJE=0.28 CJC=0.328E-12 VJC=0.8 MJC=0.4 XCJC=0.074 +CJS=1.39E-12 VJS=0.55 MJS=0.35 FC=0.5)

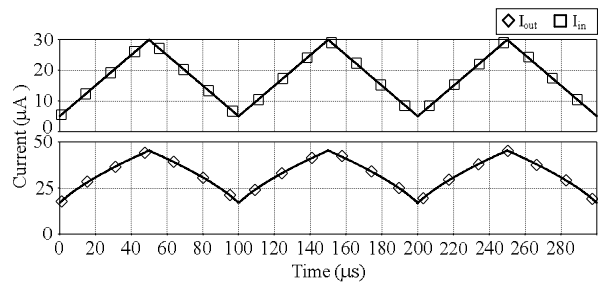


รูปที่ 4 คุณลักษณะทางไฟตรงของวงจรถอดรากที่สองที่นำเสนอ

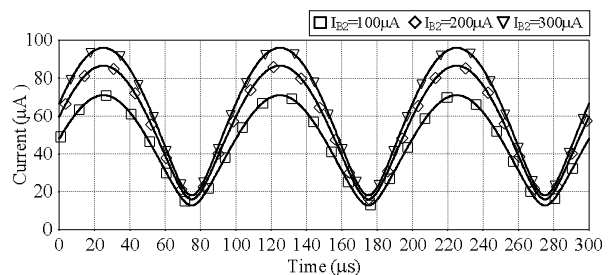
ผลการจำลองในรูปที่ 7 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยน I_{B2} เป็น $100\mu A$, $200\mu A$ และ $300\mu A$ พบว่าขนาดสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของ I_{B2} เป็นการยืนยันได้ว่าอัตราขยายของ I_{out} สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสะดวกที่นำไปประยุกต์ใช้ในระบบอัตโนมัติที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุม



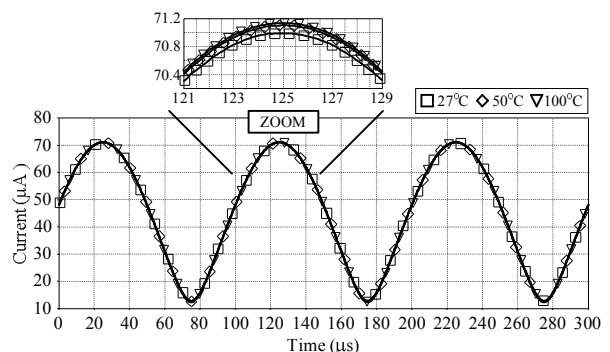
รูปที่ 5 สัญญาณเอาต์พุตเทียบอินพุตเมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 10kHz



รูปที่ 6 สัญญาณเอาต์พุตเทียบอินพุตเมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 10kHz



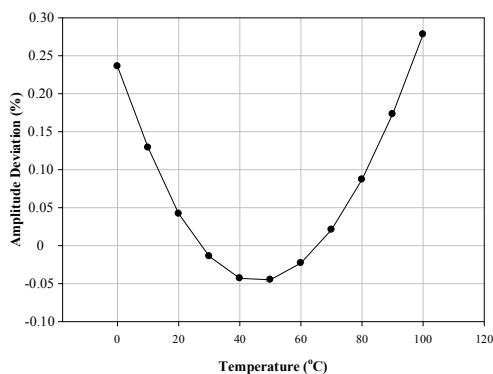
รูปที่ 7 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง I_{B2}



รูปที่ 8 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สัญญาณเอาต์พุตที่แสดงในรูปที่ 8 เป็นผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการจำลองนี้สามารถยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าวงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก $27^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ แต่สัญญาณเอาต์พุตไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการขยายก็พบว่าวงจรยังมีผลกระทบอยู่บ้าง อันเนื่องมาจากความไม่เป็นอุดมคติของตัวอุปกรณ์ VDTA ที่ยัง

มีตัวต้านทานและความจุแฝงอยู่ และจะส่งผลเมื่อมีความถี่อินพุตที่สูงและอุณหภูมิสูง กราฟในรูปที่ 9 แสดงความเบี่ยงเบนของขนาดสัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจาก $0-100^{\circ}\text{C}$ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อสัญญาณเอาต์พุตน้อยมาก โดยมีอัตราเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.278% เท่านั้น



รูปที่ 9 อัตราการเบี่ยงเบนของขนาดสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก $0-100^{\circ}\text{C}$

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรอกรากสัญญาณในโหมดกระแส โดยใช้ *VDTA* เพียงตัวเดียว กระแสเอาต์พุตเบี่ยงเบนไปตามการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเพียงเล็กน้อย และสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณอย่างเป็นเชิงเส้นในย่านกว้างได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกเหนือจากนี้แล้วด้วยโครงสร้างที่ประกอบด้วยอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนน้อย และไม่ต้องการความสมพียงกันของอุปกรณ์จึงมีความสะดวกในการพัฒนาเป็นวงจรรวม เนื่องจากจะใช้พื้นที่ในชิปน้อยกว่าเพื่อใช้ในงานประมวลผลสัญญาณของอุปกรณ์ และผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พกพาได้ (Portable electronic equipments)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. O. E. Doebelin, Measurement Systems: Application and Design, New York: McGraw Hill, 2004.
- [2] S.-I. Liu, "Square-rooting and vector summation circuits using current conveyors," IEE Proc. Circuit., Dev. Syst., vol.142, pp. 223–226. 1995.
- [3] Bhaskar D. R., Sharma V. K., Monis M and Rizvi S. M. I., "New current-mode universal biquad filter," Microelectronics Journal, vol. 30, pp. 837-839, 1999.
- [4] C. Toumazou, F. J. Lidgey and D. G. Haigh. Analogue IC design: the current-mode approach, London: Peter Peregrinus, 1990.
- [5] V. Riewruja, K. Anuntahirunrat and W. Surakamponorn, "A class AB CMOS squarerooting circuit," Int. J. Elec., vol. 85, pp. 55–60, 1998.
- [6] K. Dejhan, and C. Netbut, "New simple square-rooting circuits based on translinear current conveyors," Int. J. Elec., vol. 94, pp. 707–723, 2007.
- [7] ดนุชา ประเสริฐสม ทศยา ปุคคละนันท์ และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ "วงจรถอดรากที่สองโหมดกระแสที่ปราศจากผลกระทบต่ออุณหภูมิโดยใช้โอทีเอ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 885-888, 2550
- [8] นครินทร์ ศรีปัญญา, วินัย ใจกล้า และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์ "วงจรถอดรากสัญญาณโหมดกระแสอย่างง่ายโดยใช้ CDTA ที่ควบคุมด้วยกระแสเพียงตัวเดียว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, นครนายก, หน้า 895-898, ตุลาคม 2551
- [9] V. Biolkova, Z. Kolka, D. Biolk, "Fully balanced voltage differencing buffered amplifier and its applications," In 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS'09. Cancun (Mexico), p.45 – 48, 2009.