วงจรควบคุมค่าตัวต้านทานแบบลอยชนิดบวก/ลบ ที่เป็นอิสระจากอุณหภูมิและสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ DV-CCTA เพียงตัวเดียว

กังวาล พยัคฆกุล[1]* ธาดา คำแดง[2] และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์[3]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วงจรควบคุมค่าตัวต้านทานแบบลอยชนิดบวก/ลบ โดยใช้ DV-CCTA ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอคือ ค่าความต้านทานที่ได้เป็นอิสระจากอุณหภูมิ โดยปราศจากเงื่อนไขการทำงาน สามารถควบคุมค่าความต้านทานได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่ออกแบบจะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย DV-CCTA หนึ่งตัวต่อร่วมกับตัวต้านทานต่อลงกราวนด์อีกหนึ่งตัว วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นวงจรรวม ผลจำลองด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าเมื่อกำหนดให้วงจรมีค่าความต้านทาน ±1kΩ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวต้านทานแบบบวกและแบบลบ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วง -100°C ถึง 100°C มีค่าเท่ากับ 0.272% และ 0.356% ตามลำดับ วงจรมีอัตราดึงกำลังไฟฟ้าเพียง 1.92mW ที่ไฟเลี้ยง ±1.5V พบว่าการทำงานของวงจรสอดคล้องตามที่คาดการณ์ไว้ในทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำแบบเปรียบเทียบแรงดันผลต่างอินพุต ค่าตัวต้านทานแบบลอยชนิดบวก/ลบ

[1] นักศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] อาจารย์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

[3] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-7250-8831 อีเมล: K9_mad_dog@hotmail.com

รับเมื่อ 21 ธันวาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 11 เมษายน 2556

An Electronically Controllable Temperature-insensitive Floating Positive/ Negative Resistance Control Circuit Using Only Single DV-CCTA

Kangwal Payakkakul[1]* Tada Comdang[2] and Montree Siripruchyanun[3]

Abstract

This article describes the positive and negative resistances control circuit, based on Differential Voltage Current Conveyor Transconductance Amplifier (DV-CCTA). The distinguished features of the proposed circuit are that the obtained resistances are ideally temperature-insensitive without any matching constraint and the resistances can be electronically controlled. The circuit consists of merely 1 DV-CCTA and 1 grounded resistor. By using only a grounded element and a simple circuit design, the proposed circuit is then suitable for IC architecture. The PSpice simulation results are depicted. They show that at the controlled resistance of ±1kΩ, the average deviations of positive/negative resistances are respectively 0.272% and 0.356%, with temperature variation from -100°C to 100°C. The total power consumption is approximately 1.92mW at ±1.5V power supply. The given results agree well with the theoretical hypothesis.

Keyword: Differential Voltage Current Conveyor Transconductance Amplifier, Positive and Negative Resistances Control Circuit

[1] Student, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[2] Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University.

[3] Associate Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 08-7250-8831, E-mail: K9_mad_dog@hotmail.com

Received 21 December 2012; Accepted 11 April 2013

1. บทนำ

ปัจจุบันตัวต้านทานแบบบวก/ลบที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานได้ค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่นิยมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน [1] เช่นระบบเครื่องมือวัด วงจรขยายสัญญาณที่สามารถโปรแกรมได้ วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์เข้ากับการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือการควบคุมแบบอัตโนมัติได้โดยง่าย และไม่เฉพาะค่าความต้านทานค่าบวกเท่านั้น ค่าความต้านทานที่เป็นลบ ก็ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น วงจรสมดุลอิมพีแดนซ์ การปรับปรุงค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ในวงจรเรโซแนนซ์ วงจรกำจัดค่าความต้านทานแฝง [2] เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยด้านวงจรจำลองหรือควบคุมค่าความต้านทานที่มีผู้ได้นำเสนอมานั้น [3]-[7] ยังมีข้อจำกัดเรื่องกระแสเอาต์พุตที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรอบข้างได้ [3],[4] หรือจำเป็นที่จะต้องมีวงจรเข้ามาต่อร่วม เพื่อเป็นการชดเชยอุณหภูมิ [5] รวมไปจนถึงการใช้อุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมากในการออกแบบวงจร [4],[6],[7] ซึ่งจะส่งผลให้วงจรสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า และทำให้พื้นที่ชิปมีขนาดใหญ่ตามมาเมื่อพัฒนาเป็นวงจรรวม

ในปี ค.ศ. 2005 ได้มีผู้นำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่อีกหนึ่งชนิด คือวงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแส (Current Conveyor Transconductance Amplifier, CCTA) [8] ซึ่งถือได้ว่า CCTA เป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์หลายอย่าง ในการออกแบบวงจรที่มีการประมวลผลสัญญาณแอนะลอก นอกเหนือจากนี้แล้วยังสามารถปรับค่าอัตราขยายกระแสที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ได้ อย่างไรก็ตามในการประมวลผลสัญญาณสัญญาณผลต่าง (Differential Signals) มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบวงจรขยายเครื่องมือวัด หรือนำไปใช้รองรับสัญญาณอินพุตแบบลอย เพื่อรองรับการสังเคราะห์อุปกรณ์แบบลอย เป็นต้น [9]-[14] ทำให้อุปกรณ์ CCTA นั้น จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานด้านดังกล่าว ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 ได้มีผู้นำเสนออุปกรณ์ชื่อว่า วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำแบบเปรียบเทียบแรงดันผลต่างอินพุต (DV-CCTA) [15] ซึ่งได้พัฒนาจาก CCTA เพื่อสามารถรองรับสัญญาณผลต่างแรงดันที่อินพุตได้

จากความเป็นมาที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยชนิดบวก/ลบ โดยใช้ DV-CCTA ที่ค่าความต้านทานไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในอุดมคติ และยังปรับค่าความต้านทานได้ด้วยกระแสไบแอส อีกทั้งยังแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในวงจรเรโซแนนซ์ วงจรปรับปรุงค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ และทำการทดสอบวงจรเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนของความต้านทานเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นสมรรถนะของวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยได้เป็นอย่างดี

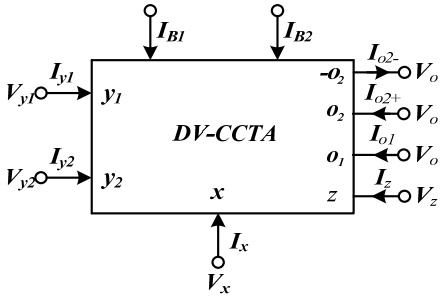
2. หลักการและการทำงานของวงจร

2.1 อุปกรณ์ DV-CCTA

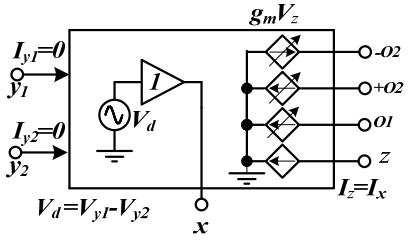
เนื่องจากวงจรที่นำเสนอประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก DV-CCTA จึงขอกล่าวถึงหลักการทำงานพอสังเขป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของ DV-CCTA แสดงในสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} I_{y1} \\ I_{y2} \\ V_x \\ I_z \\ I_{o1} \\ I_{o2+} \\ I_{o2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{m2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g_{m2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{y1} \\ V_{y2} \\ I_x \\ V_z \\ V_{o1} \\ V_{o2} \\ V_{o2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

และวงจรสมมูลได้จากรูปที่ 1



(ก)



(ข)

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

จากสมการที่ (1) $I_{oi} = g_{mi}V_z$ เมื่อ g_{mi} ค่าความนำถ่ายโอนของ DV-CCTA สำหรับ DV-CCTA ที่ออกแบบด้วยไบโพลาร์ ค่าความนำถ่ายโอนจะมีค่า

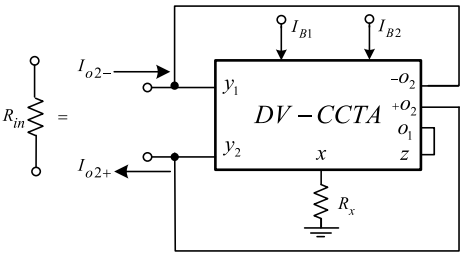
$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \tag{2}$$

เมื่อ I_B และ V_T คือ ค่ากระแสไบแอสและศักดาความร้อนตามลำดับ

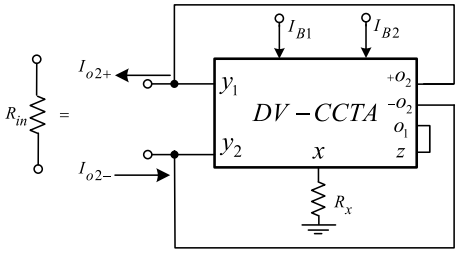
2.2 หลักการทำงานของวงจรควบคุมค่าตัวต้านทานแบบลอยชนิดบวก

รูปที่ 2 แสดงวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยชนิดบวก หากกำหนดให้ $-o_2$ ต่อเข้ากับขา y_1 และ $+o_2$ ต่อเข้ากับขา y_2 ความต้านทานอินพุตแสดงดังสมการที่ (3)

$$R_{in} = \frac{g_{m1}}{g_{m2}} R_x \tag{3}$$



รูปที่ 2 วงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยชนิดบวก



รูปที่ 3 วงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยชนิดลบ

เมื่อแทนค่า $g_{mi} = I_{Bi} / 2V_T$ จากสมการที่ (3) จะได้ค่าความต้านทานแบบลอยที่ปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์หรือทำการปรับจากกระแสไบแอส I_{B1}, I_{B2} ในสมการที่ (4) ดังนี้

$$R_{in} = \frac{I_{B1}(2V_T)}{I_{B2}(2V_T)} R_x = \frac{I_{B1}}{I_{B2}} R_x \tag{4}$$

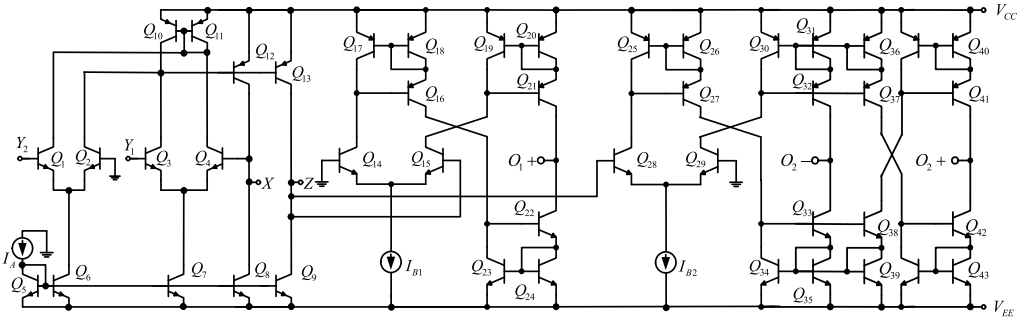
2.3 หลักการทำงานของวงจรควบคุมค่าตัวต้านทานแบบลอยชนิดลบ

รูปที่ 3 แสดงวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลอยชนิดลบ เมื่อกำหนดให้ $+o_2$ ต่อเข้ากับ y_1 และ $-o_2$ ต่อเข้ากับ y_2 สมการของความต้านทานอินพุตแสดงในสมการที่ (5)

$$R_{in} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2}} R_x \tag{5}$$

เมื่อแทนค่า $g_{mi} = I_{Bi} / 2V_T$ จากสมการที่ (2) จะได้ค่าความต้านทานมีค่า

$$R_{in} = -\frac{I_{B1}(2V_T)}{I_{B2}(2V_T)} R_x = -\frac{I_{B1}}{I_{B2}} R_x \tag{6}$$



รูปที่ 4 โครงสร้างภายในของ DV-CCTA

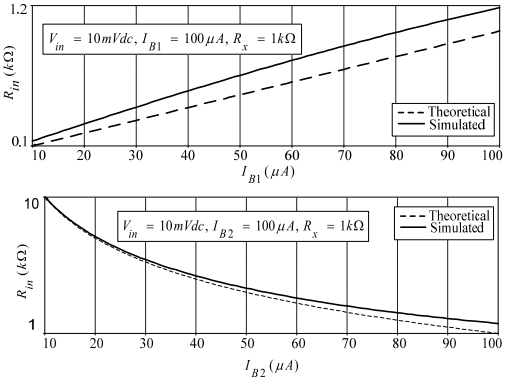
จากสมการที่ (4) และ (6) แสดงให้เห็นว่า วงจรสามารถควบคุมค่าความต้านทานค่าบวกและลบตามลำดับ จากสมการของวงจรควบคุมค่าตัวต้านทานทั้งสองแบบนั้น ค่าความต้านทานที่ได้สามารถปรับได้ด้วยกระแส I_{Bi} และหากพิจารณาว่า ค่า R_x ที่นำมาต่อเป็นอิสระจากอุณหภูมิแล้ว ค่าความต้านทานที่ได้จากวงจรควบคุมก็จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.4 ผลการทดสอบการทำงาน

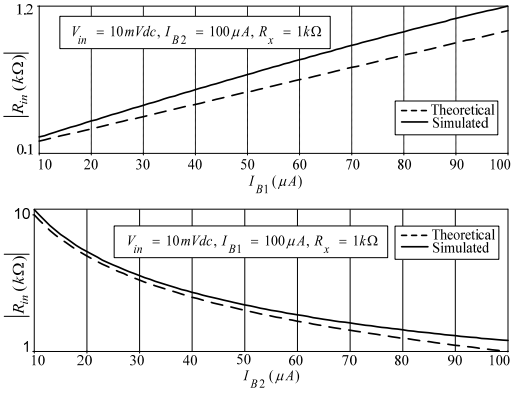
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองควบคุมการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ของ AT&T [16] ในรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างภายในของ DV-CCTA โดยกำหนดให้วงจรทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยง ±1.5V

ในรูปที่ 5 เป็นผลจำลองการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง I_{B1}, I_{B2} ในช่วง 0-100μA เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวงจร เห็นได้ว่าวงจรสามารถควบคุมความต้านทานได้จากกระแส I_{B1}, I_{B2} ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ได้การวิเคราะห์ไว้แล้ว

ผลรูปที่ 6 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวต้านทานแบบบวกและแบบลบ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วง -100°C ถึง 100°C มีค่าเท่ากับ 0.272% และ 0.356% ตามลำดับ ในรูปที่ 7 เป็นผลตอบสนองความถี่ของวงจร พบว่าวงจรที่ได้ออกแบบสามารถตอบสนอง

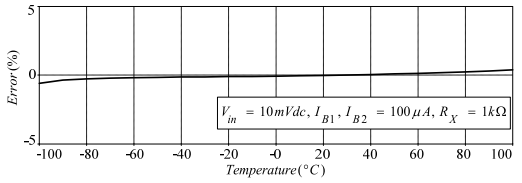


(ก) แบบบวก

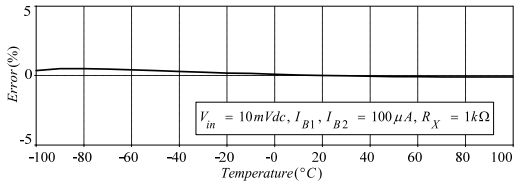


(ข) แบบลบ

รูปที่ 5 ความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแส I_{B1}, I_{B2}

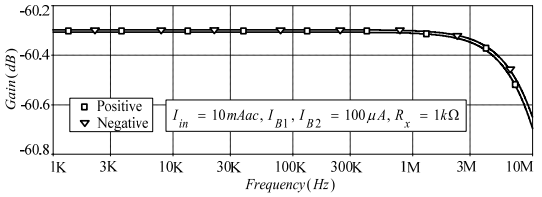


(ก) แบบบวก



(ข) แบบลบ

รูปที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

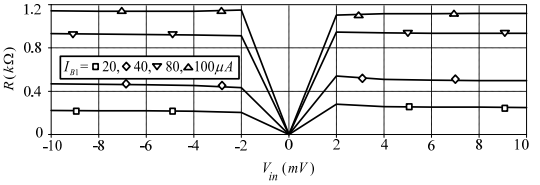


รูปที่ 7 ความถี่ตอบสนองของวงจรควบคุมค่าตัวต้านทาน

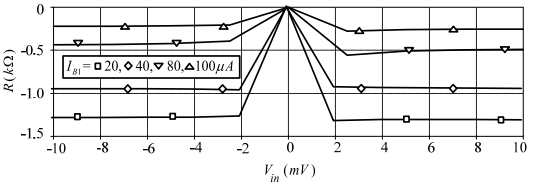
ความถี่ได้ตั้งแต่ 1kHz-2MHz รูปที่ 8 แสดงลักษณะสมบัติทางไฟตรงของวงจรเมื่อกำหนดให้ $I_{B2} = 100\mu A$, $R_x = 1k\Omega$ เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุตมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงกว้าง และยังสามารถควบคุมค่าได้ด้วยกระแสไบแอส อย่างแปรผันตรงดังสมการที่ (4) และ (6)

3. การประยุกต์ใช้งาน

เพื่อให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งานจึงได้นำวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบบวกมาใช้งานในวงจรเรโซแนนซ์ และนำวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลบเพื่อกำจัดค่าความต้านทานแฝงที่อยู่ภายในวงจรอนุกรม RLC ในรูปที่ 9 เป็นการต่อใช้งานวงจรตัวต้านทานแบบบวกในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC ซึ่งผลในรูปที่ 10 จะเห็นว่าสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้จาก

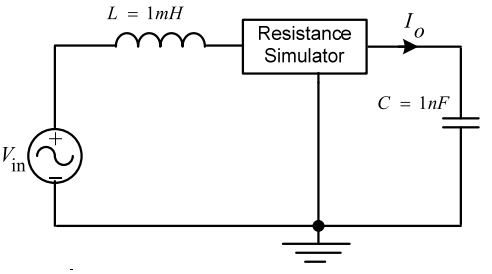


(ก) แบบบวก

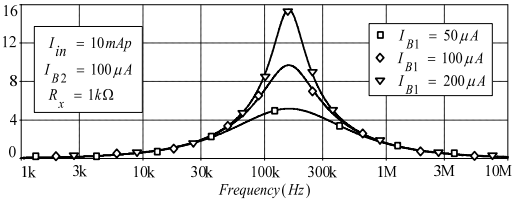


(ข) แบบลบ

รูปที่ 8 คุณลักษณะทางไฟตรงของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนค่ากระแส I_{B1}

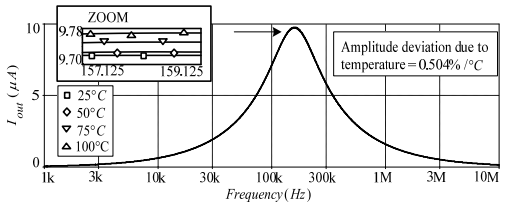


รูปที่ 9 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC

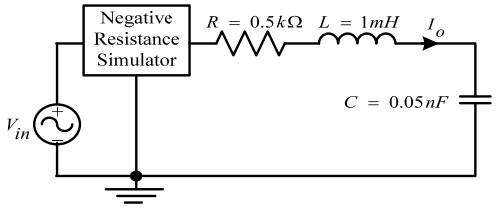


รูปที่ 10 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อปรับกระแส I_{B1} ของวงจรรูปที่ 9

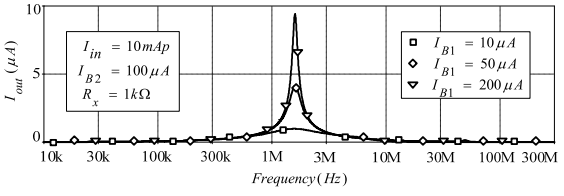
กระแส และในรูปที่ 11 เป็นผลการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตเนื่องจากอุณหภูมิที่ 25, 50, 75 และ 100°C พบว่าจะมีค่าเพียง 0.504%/ °C ในรูปที่ 12 เป็นการต่อใช้งานวงจรควบคุมค่าความต้านทานแบบลบในวงจรปรับปรุงค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ รูปที่ 13 เป็นผลการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรรูปที่ 9



รูปที่ 12 วงจรปรับปรุงค่าควอลิตี้แฟกเตอร์

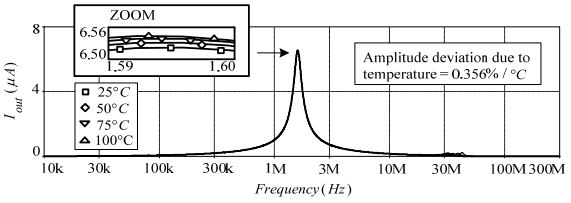


รูปที่ 13 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อปรับ I_{B1} ของวงจรรูปที่ 12

กระแสเอาต์พุตเมื่อปรับกระแส I_{B1} ของวงจรแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถใช้งานได้ และในรูปที่ 14 เป็นผลการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตเนื่องจากอุณหภูมิที่ 25, 50, 75 และ 100°C พบว่ามีค่าเพียง 0.356%/ °C ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า วงจรที่ได้นำเสนอมีผลกระทบเนื่องมาจากอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเช่นกัน

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอ วงจรควบคุมค่าตัวต้านทานแบบบวก/ลบ โดยใช้ DV-CCTA ซึ่งสามารถควบคุมค่าความต้านทานได้ด้วยกระแสไบแอสได้ในช่วง 1μA-100μA และมีย่านความถี่ใช้งานในระดับ 1kHz-2MHz



รูปที่ 14 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรรูปที่ 12

วงจรดึงกำลังไฟฟ้า 1.92mW ที่ไฟเลี้ยง ±1.5V โดยในการใช้งานจริง สามารถแทนตัวต้านทาน R_x เป็นตัวต้านทานอิเล็กทรอนิกส์ [17] เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างเป็นวงจรรวมได้ นอกจากนี้ยังนำเสนอการประยุกต์ใช้งานในวงจรเรโซแนนซ์ และวงจรปรับปรุงค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ ผลที่ได้พบว่าสามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ และยังขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย วงจรที่นำเสนอนี้จึงเหมาะในการสร้างเป็นวงจรรวมเพื่อใช้ในงานที่จำเป็นที่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ 2556

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Tadic and D. Gobavic, “A Voltage controlled resistor in CMOS technology using bisection of the Voltage range,” *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement Technology,* pp.1704-1710, 2001.

[2] M. Lapinoja and T. Rahkonen, “An active tuning and impedance matching element,” *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol.1, pp.559-562, 1998.

[3] W. Petchmaneelumka, P. Julsereewong, and V.

Riewruja, "Positive/Negative floating resistor using OTAs," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.1565-1568, 2008.

[4] V. Springl, W. Jaikla, and M. Siripruchyanan, "Floating positive/negative resistance simulators employing single dual-output OTA," *International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp.352-355, 2006.

[5] P. Silapan, K. Chantafong, and M. Siripruchyanan, "Design and Applications of Electronically Controllable, Temperature Compensated Positive/ Negative Floating Resistance Simulators," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok* vol.18, no.1, pp.24-33, 2008 (in Thai).

[6] K. Kaewdang, K. Kumwachara, and W. Surakampontom, "Electronically tunable floating CMOS resistor using OTA," *Proceedings of ISCIT*, pp.705-708, 2005.

[7] W. Petchmaneelumka, T. Kamsri, C. Wang-wiwatthana1, and V. Riewruja, "OTA-based electronically adjustable floating positive/ negative resistor," *SICE Annual Conference*, pp. 597-600, 2008.

[8] R. Prokop and V. Musil, "New modern circuit block CCTA and some its applications," *The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference-Electronics ET'2005*, pp. 93-98, 2005.

[9] H. O. Elwan and A. M. Soliman, "Novel CMOS differential Voltage current conveyor and its applications," *IEEE Proceedings of Circuits Devices and Systems*, vol.144, no.3, pp.195-200, 1997.

[10] S. J. Azhari and H. Fazlalipoor, "A novel current mode instrumentation amplifier (CMIA) topology," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.49, no.6, pp.1272-1277, 2000.

[11] T. M. Hassan and A. M. Soliman, "New CMOS DVCC realization and applications to instrumentation amplifier and active-RC filters," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol.64, no.1, pp.47-55, 2008.

[12] E. Yuce and S. Minaei, "Novel floating simulated inductors with wider operating frequency ranges," *Microelectronics Journal*, vol.40, no.6, pp.928-938, 2009.

[13] M. Incekaraoglu and U. Cam, "Realization of series and parallel R-L and C-D impedances using single differential voltage current conveyor," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol.43, no.1, pp.101-104, 2005.

[14] M. A. Ibrahim, S. Minaei, and H. Kuntman, "A 22.5 MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and grounded passive elements," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol.59, no.5, pp.311-318, 2005.

[15] W. Jaikla, M. Siripruchyanun, and A. Lahiri, "Resistorless dual-mode quadrature sinusoidal oscillator using a single active building block," *Microelectronics Journal*, vol.42, no.1, pp. 135-140, 2011.

[16] D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," *IEEE Proceedings of Circuit Devices Systems*, vol.140, no.6, pp. 406-416, 1993.

[17] N. Herencssar, J. Koton, J. Jerabek, K.Vbra, and O.Cicekoglu, "Voltage-mode all-pass filters using universal voltage conveyor and MOSFET-based electronic resistors," *Radioengineering*, vol.20, no.1, pp.10-18, 2011.