

วงจรปรับสภาพสัญญาณโหมดกระแสสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว

ทิพย์รัตน์ จันทร์สิงห์^{1*} และ ณรงค์ ธรรมภูติ²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรปรับสภาพสัญญาณโหมดกระแส สำหรับเซนเซอร์ความต้านทานชนิดเชิงเดี่ยวที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับออปแอมป์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวงจรปรับสภาพสัญญาณแบบดั้งเดิมในแง่ของความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุต วงจรที่นำเสนอนี้ให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความแม่นยำสูงโดยมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 1 % และเป็นเชิงเส้นสัมพันธ์กับความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอโดยโปรแกรม PSpice เมื่อทดสอบกับเซนเซอร์อาร์ทีดี แสดงให้เห็นผลการเลียนแบบการทำงานมีความสอดคล้องกับผลวิเคราะห์วงจร

คำสำคัญ : เซนเซอร์ความต้านทานชนิดเชิงเดี่ยว, วงจรปรับสภาพสัญญาณ, ความเป็นเชิงเส้น, วงจรสายพานกระแส, ออปแอมป์

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: tipparat.r@cit.kmutnb.ac.th รับเมื่อ 5 พฤษภาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 24 สิงหาคม 2560

Current-Mode Signal Conditioning Circuit for Single Type Resistive Sensor

Tipparat Junsing^{1*} and Narong Thumputi²

Abstract

This paper presents the current-mode signal conditioning circuit for single active resistive sensor which composed of op-amp in conjunction with current conveyors. The research found that the proposed circuit proves better quality in term of linearity when comparing to the traditional signal conditioning circuit. This circuit provides high accuracy with error less than 1% and linear output related to resistance changes. The results of PSpice simulation when emulate with RTDs sensors have shown a good compliance with circuit analysis.

Keyword : Single Active Resistive Sensor, Signal Conditioning Circuit, Linearization, Current Conveyor, Op-amp

¹ Department of Electronics Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

² Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

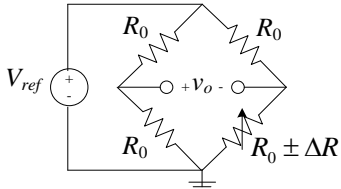
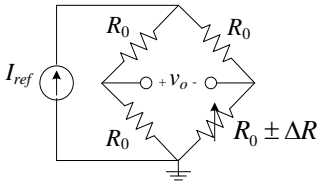
* Corresponding author, E-mail: tipparat.r@cit.kmutnb.ac.th Received 5 May 2017, Accepted 24 August 2017

1. บทนำ

เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น แสง อุณหภูมิ ความเค้น ความดัน เป็นต้น เซนเซอร์ความต้านทาน (Resistive Sensor) เป็นเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการตรวจจับและประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เซนเซอร์ความต้านทานชนิดเชิงเดี่ยว (Single Type) จะมีค่าความต้านทานเอาต์พุตเท่ากับ R_0 เมื่อไม่มีการตรวจจับ และขณะตรวจจับจะเกิดความต้านทานเบี่ยงเบน ($\pm \Delta R$) ขึ้น ตัวอย่างของเซนเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ อาร์ทีดี (RTDs : Resistive Temperature Detector) และ สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นต้น [1-3] การใช้งานเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวในงานบางอย่าง มีความจำเป็นต้องต่อเซนเซอร์ร่วมกับวงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning Circuit) เพื่อความสะดวกในการนำสัญญาณที่ได้ไปจัดการต่อ วงจรที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายตั้งแต่ในอดีต คือ วงจรบริดจ์แบบวีทสโตน (Wheatstone Bridge) [4-6] แม้ว่าวงจรนี้จะมีโครงสร้าง

ที่ไม่ซับซ้อน สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดกระแสและโหมดแรงดัน แต่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรนี้ขาดคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น คือไม่อยู่ในฟังก์ชันของ $\pm(\Delta R / R_0)$ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการนำสัญญาณไปประมวลผลต่อ โดยในตารางที่ 1 แสดงรูปแบบการต่อและสมการเอาต์พุตของวงจรบริดจ์แบบวีทสโตน อย่างไรก็ตาม วงจรปรับสภาพสัญญาณโหมดกระแสสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยว [7-14] ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2000 Azhari และ Kaab ได้นำเสนอวงจรที่สร้างจากวงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) [9] แต่นำเสียดายที่ความแม่นยำของวงจรถูกลดทอนลงจากความต้านทานแฝง R_x ที่ขั้ว X ของวงจรสายพานกระแส ต่อมาวงจรนี้ได้ถูกสร้างด้วยอุปกรณ์ OFCC (Operational Floating Current Conveyor) [10] แม้ว่าจะไม่มีผลกระทบเรื่องความต้านทานแฝงที่ขั้วอินพุต แต่อุปกรณ์ชนิดนี้มีวงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror) เป็นวงจรภายในจึงเกิดความผิดพลาดจากอัตราการส่งผ่านกระแสได้

ตารางที่ 1 รูปแบบการต่อและสมการเอาต์พุตของวงจรบริดจ์แบบวีทสโตน โหมดกระแสและแรงดัน

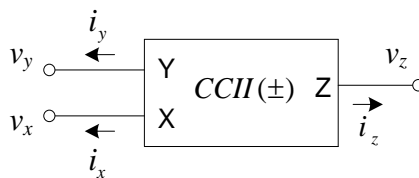
Configuration	Output
Voltage mode 	$v_o = \frac{V_{ref}}{4} \left(\frac{\mp \Delta R}{R_0 \pm \frac{\Delta R}{2}} \right)$
Current mode 	$v_o = \frac{I_{ref} R_0}{4} \left(\frac{\mp \Delta R}{R_0 \pm \frac{\Delta R}{4}} \right)$

นอกจากนั้น อุปกรณ์ OFCC ไม่สามารถหาซื้อได้จากร้านจำหน่ายอุปกรณ์ที่มีในท้องตลาด จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งานจริง ต่อมาในปี 2014 อุปกรณ์พื้นฐานอย่างออปแอมป์ได้ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรนี้ [14] แต่วงจรดังกล่าวไม่ได้มีคุณสมบัติเชิงเส้นอย่างแท้จริง ต้องอาศัยการกำหนดค่าของตัวต้านทานของวงจร จึงทำให้มีคุณสมบัติเชิงเส้นเพียงบางช่วงเท่านั้น ดังนั้นจุดมุ่งหมายของบทความนี้จึงต้องการนำเสนอวงจรปรับสภาพสัญญาณโหมดกระแสสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวที่มีคุณสมบัติเชิงเส้น มีความแม่นยำ และสามารถสร้างได้จริงอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยเนื้อหาของบทความนี้ประกอบไปด้วยวงจรที่นำเสนอแบบพื้นฐาน การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นไปตามอุดมคติ วิธีการลดผลกระทบดังกล่าว และนำเสนอวงจรปรับสภาพสัญญาณที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้านความแม่นยำของสัญญาณเอาต์พุต พร้อมทั้งผลการเขียนแบบการทำงานและบทสรุป

2. รายละเอียดวงจร

2.1 วงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสเป็นอุปกรณ์ที่มีขั้วจำนวน 3 ขั้ว ประกอบด้วยขั้ว Y, X และ Z ขั้ว Y เป็นขั้วแรงดันอินพุต ขั้ว Z เป็นขั้วกระแสเอาต์พุต ขั้ว X เป็นได้ทั้งขั้วกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสแสดงในรูปที่ 1 โดยเมื่อป้อนแรงดันที่ขั้ว Y แรงดันนี้จะถูกส่งผ่านไปขั้ว X และถ้าป้อนกระแสที่ขั้ว X กระแสนี้จะไปปรากฏที่ขั้ว Z โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรสายพานกระแส ได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส

$$i_y = 0, v_x = v_y, i_z = \pm \alpha_i i_x \tag{1}$$

เมื่อเครื่องหมายบวกและลบแสดงถึงชนิดของวงจรสายพานกระแสว่าเป็นชนิดบวก CCII(+) หรือชนิดลบ CCII(-) และ α_i คือ อัตราส่วนในการส่งผ่านกระแสคือ มีค่าเท่ากับ $1 - \epsilon_i$ โดย ϵ_i คือค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z

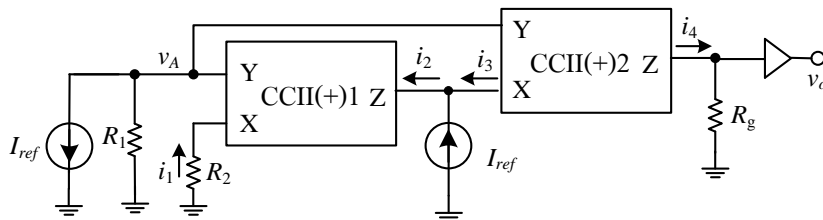
2.2 วงจรปรับสภาพสัญญาณที่นำเสนอแบบพื้นฐาน

วงจรปรับสภาพสัญญาณสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวแบบพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2 วงจรนี้สร้างจากวงจรสายพานกระแสแบบบวกจำนวน 2 ตัว และตัวต้านทาน เมื่อวิเคราะห์ห้วงจรในทางอุดมคติสามารถเขียนสมการ $i_1, i_2, i_3,$ และ i_4 ได้ดังต่อไปนี้

$$i_2 = i_1 = \frac{-v_A}{R_2} = \frac{I_{ref} R_1}{R_2} \tag{2}$$

เมื่อ I_{ref} คือแหล่งจ่ายกระแสอ้างอิง และ $i_4 = i_3 = i_2 - I_{ref}$ จะได้

$$v_o = R_g i_4 = I_{ref} \left(\frac{R_1 - R_2}{R_2} \right) R_g \tag{3}$$



รูปที่ 2 วงจรปรับสภาพสัญญาณที่สร้างจากวงจรสายพานกระแส

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_0 \pm \Delta R$ และ $R_2 = R_0$ แล้วสามารถเขียนสมการที่ (3) ได้ใหม่คือ

$$v_o = I_{ref} \left(\frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) R_g \quad (4)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่าวงจรในรูปที่ 2 สามารถจัดการสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวได้

2.3 การวิเคราะห์ความไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจร

เมื่อวิเคราะห์วงจรโดยพิจารณาคูณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรสายพานกระแสแล้วสามารถเขียนสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 2 ได้ใหม่คือ

$$v_o = I_{ref} (1 - \varepsilon_i) R_g \left[\frac{\pm \Delta R - R_x}{R_0 + R_x} - \frac{(R_0 \pm \Delta R) \varepsilon_i}{R_0 + R_x} \right] \quad (5)$$

เมื่อ R_x คือ ค่าความต้านทานแฝงที่ขั้ว X และจากสมการที่ (5) พบว่าความต้านทาน R_x เป็นปัจจัยหนึ่งที่

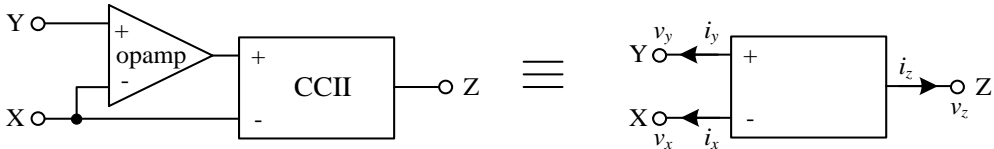
ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของวงจรในรูปที่ 2 ถ้ากำหนดให้ $\pm \Delta R = 200 \Omega$, $R_0 = 1000 \Omega$, $\varepsilon_i = 0.01$, และ $R_g = 1 \text{ k}\Omega$, $I_{ref} = 1 \text{ mA}$ แล้วใช้ไอซีสำเร็จรูป AD844 ซึ่งมีค่า R_x เท่ากับ 50Ω มาสร้างเป็นวงจรสายพานกระแส เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (5) จะได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ -34.94%

2.4 ออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์ (Operational Conveyor)

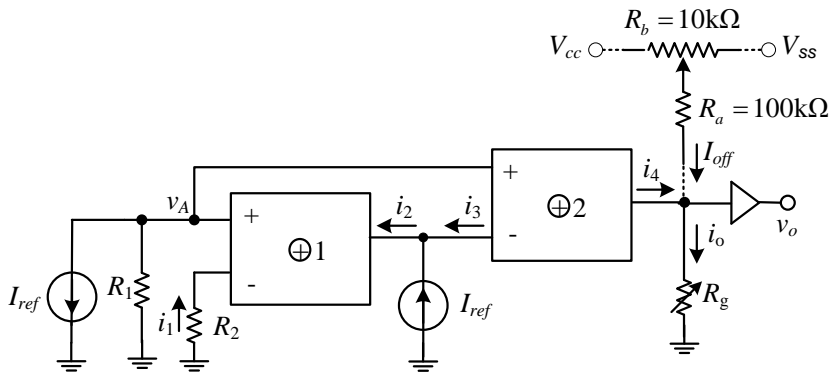
ในรูปที่ 3 แสดงสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์ซึ่งถูกนำเสนอไว้ใน [15] โดยพอร์ตอินพุตทั้งสองของวงจรสายพานกระแสถูกต่อป้อนกลับแบบลบกับออปโปแอมป์ คุณสมบัติของอุปกรณ์ออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์อธิบายได้ตามสมการที่ (6)

$$i_y = 0, v_x = v_y, i_z = \pm \alpha_c i_x \quad (6)$$

เครื่องหมายบวกและลบของกระแส i_z แสดงถึงชนิดของออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์ว่าเป็นชนิดบวกหรือชนิดลบ และ α_c คือ อัตราส่วนในการส่งผ่านกระแสคือมีค่าเท่ากับ $1 - \varepsilon_c$ โดย ε_c คือค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z



รูปที่ 3 สัญลักษณ์ของออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์



รูปที่ 4 วงจรที่นำเสนอ

2.5 วงจรปรับสภาพสัญญาณที่นำเสนอ

วงจรปรับสภาพสัญญาณที่นำเสนอเป็นการนำวงจรในรูปที่ 2 มาปรับปรุง เพื่อลดผลกระทบจากความต้านทานแฝง R_x โดยใช้อุปกรณ์ออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์แทนวงจรสายพานกระแส อุปกรณ์ที่ใช้สร้างวงจรที่นำเสนอมีดังนี้คือ ออปโปเรชันเนลคอนเวเยอร์ชนิดบวกจำนวน 2 ตัว, ตัวต้านทานปรับค่าเกณฑ์ R_g ตัวต้านทานตรวจจับ R_1, R_2 และมีตัวต้านทาน R_a, R_b เป็นตัวควบคุมกระแส I_{off} เพื่อใช้ในการชดเชยออฟเซตของวงจร เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจรในรูปที่ 4 จะได้ว่า

$$v_o = I_{ref} R_g (1 - \epsilon_c) \left\{ \frac{(1 - \epsilon_c) k R_1 - (R_x (1 + k) R_2)}{(R_x (1 + k) R_2)} \right\} + (I_{off} R_g) \quad (7)$$

เมื่อ k คือ อัตราขยายสัญญาณสำหรับความถี่ต่ำของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ 10^5 และ $R_x = 50 \Omega$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (7) ได้ใหม่เป็น

$$v_o \cong I_{ref} R_g (1 - \epsilon_c) \left\{ \frac{R_1 - \epsilon_c R_1 - R_2}{R_2} \right\} + I_{off} R_g \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะเห็นได้ว่าผลกระทบจากความต้านทานแฝง R_x ได้ถูกกำจัดออกไป และเมื่อแทนค่า $R_1 = R_0 \pm \Delta R$ และ $R_2 = R_0$ จะได้

$$v_o \cong \left(I_{ref} R_g \frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) (1 - \varepsilon_c) - \left(1 \pm \frac{\Delta R}{R_0} \right) I_{ref} R_g (1 - \varepsilon_c) \varepsilon_c + I_{off} R_g \quad (9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (9) จะพบว่าสมการเอาต์พุตมีส่วนประกอบของค่าออฟเซตและค่าความผิดพลาดของเกนซ์ขยาย แต่สามารถชดเชยออฟเซตดังกล่าวได้ด้วย การป้อนค่ากระแสจากภายนอก I_{off} และชดเชยค่าเกนซ์ด้วยการปรับตัวต้านทาน R_g ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ภายหลังการชดเชย คือ

$$v_o \cong I_{ref} \left(\frac{\pm \Delta R}{R_0} \right) R_g \cong x A_V I_{ref} \quad (10)$$

เมื่อ A_V คืออัตราขยายแรงดันและ x คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีค่าเท่ากับ $\pm \Delta R / R_0$ ดังนั้นจากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่า วงจรปรับสภาพสัญญาณที่นำเสนอสามารถจัดการสัญญาณที่มาจกเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวได้และให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรด้านความแม่นยำอีกด้วย

3. ผลการเลียนแบบการทำงาน

การยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรที่นำเสนอ แสดงให้เห็นผ่านผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSpice โดยวงจรที่ใช้ไอซี

สำเร็จรูปเบอร์ AD844 และ LM358 สำหรับสร้างวงจรถ่ายพจนกระแสและออปแอมป์ ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงอุปกรณ์ขนาด $\pm 10V$ กำหนดให้ความต้านทาน R_0 มีค่าเท่ากับ 100 Ω และ 1000 Ω เพื่อเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอเมื่อใช้กับตัวอาร์ทีดีชนิดแพลทินัม PT100 และ PT1000 ตามลำดับ และให้ $I_{ref} = 1 \text{ mA}$ และ $R_g = 1 \text{ k}\Omega$ เพื่อให้ค่าเกนซ์มีค่าเท่ากับ 1 ทำการเลียนแบบการทำงานในช่วงที่เซนเซอร์ความต้านทานมีค่า 50 Ω ถึง 150 Ω สำหรับ PT100 และ 500 Ω ถึง 1500 Ω สำหรับ PT1000 โดยผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอ แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรเมื่อใช้กับ PT100 ระหว่างวงจรที่นำเสนอและวงจรในรูปที่ 2 จากข้อมูลพบว่า วงจรที่นำเสนอเมื่อไม่มีการชดเชยค่าออฟเซตและค่าเกนซ์ มีค่าความผิดพลาดสูงสุดน้อยกว่า -1.8% แต่เมื่อชดเชยแล้ววงจรที่นำเสนอสามารถทำงานได้โดยไม่มีค่าผิดพลาด ส่วนวงจรในรูปที่ 2 มีค่าความผิดพลาดในการทำงานมากกว่า 30%

ในตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลการเลียนแบบการทำงานระหว่างวงจรปรับสภาพสัญญาณที่นำเสนอกับวงจรใน [9, 14] โดยใช้เซนเซอร์ PT1000 ในการทดสอบ ผลการเลียนแบบการทำงานพบว่า วงจรที่นำเสนอแม้ไม่มีการชดเชยค่าความผิดพลาดก็ให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความแม่นยำกว่าวงจรใน [9, 14] คือมีค่าความผิดพลาดสูงสุดน้อยกว่า -0.5% ในขณะที่วงจรใน [9] มีค่าผิดพลาดสูงสุดมากกว่า 50% และมากกว่า 40% สำหรับวงจรใน [14]

เมื่อนำผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอและวงจรในรูปที่ 2 สำหรับเซนเซอร์ PT100 ใน

ตารางที่ 2 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต v_o กับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน x จะพบว่า ถึงแม้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรทั้งสองจะมีความเป็นเชิงเส้นแต่เอาต์พุตของวงจรที่สร้างจากวงจรสายพานกระแสในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยออฟเซตขนาดใหญ่และมีค่าความผิดพลาดของเกนซ์ทำให้สัญญาณเอาต์พุตขาดความแม่นยำ แต่วงจรที่นำเสนอมี

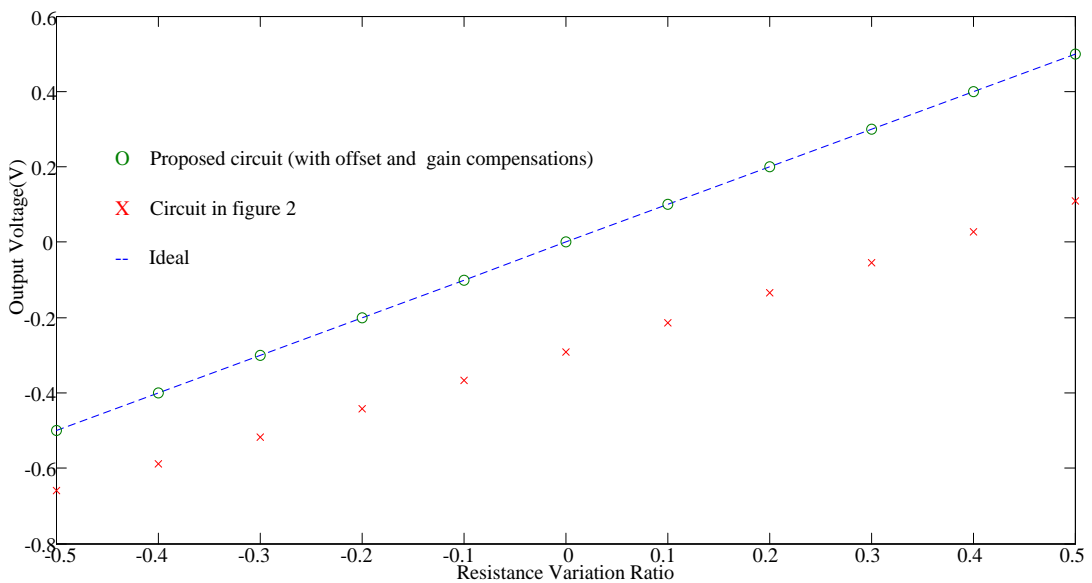
ค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ และสามารถชดเชยค่าออฟเซตโดยการป้อนกระแสค่า ๆ และชดเชยความผิดพลาดของเกนซ์โดยการปรับตัวต้านทาน R_g จากผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรปรับสภาพสัญญาณสำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวข้างต้น จะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอให้สัญญาณเอาต์พุตที่แม่นยำและมี

ตารางที่ 2 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอและวงจรในรูปที่ 2 เมื่อจำลองการต่อเชื่อมกับเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีซีชนิด PT100

R_I (Ω)	Ideal (V)	Proposed circuit				Circuit in figure 2	
		(with no compensations)		(with compensations)		v_o (V)	Error (%)
		v_o (V)	Error (%)	v_o (V)	Error (%)		
50	-0.5	-0.4981	-0.38	-0.5000	0.00	-0.6603	32.1
60	-0.4	-0.3981	-0.48	-0.4000	0.00	-0.5891	47.3
70	-0.3	-0.2982	-0.60	-0.3000	0.00	-0.5167	72.2
80	-0.2	-0.1983	-0.85	-0.2000	0.00	-0.4428	121.4
90	-0.1	-0.0983	-1.70	-0.1000	0.00	-0.3676	267.6
100	0	0.0015	0.15	0.0000	0.00	-0.2911	-29.1
110	0.1	0.1014	1.40	0.1000	0.00	-0.2133	-313.3
120	0.2	0.2013	0.65	0.2000	0.00	-0.1343	-167.2
130	0.3	0.3013	0.43	0.3000	0.00	-0.0542	-118.1
140	0.4	0.4012	0.30	0.4000	0.00	0.0268	-93.3
150	0.5	0.5011	0.22	0.5000	0.00	0.1088	-78.2

ตารางที่ 3 ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่นำเสนอและวงจรใน [9, 14] เมื่อจำลองการต่อเชื่อมกับเซนเซอร์ความต้านทานอาร์ทีคิชนิด PT1000

R_I (Ω)	Proposed Circuit						
	Ideal (V)	(with no compensations)		Circuit in [9]		Circuit in [14]	
		v_o (V)	Error (%)	v_o (V)	Error (%)	$-v_o$ (V)	Error (%)
500	-0.5	-0.4998	-0.04	-0.2303	-53.9	-0.4515	-9.7
600	-0.4	-0.3999	-0.03	-0.1837	-54.1	-0.3517	-12.1
700	-0.3	-0.3000	0.00	-0.1373	-54.2	-0.2520	-16.0
800	-0.2	-0.2001	0.05	-0.0913	-54.4	-0.1523	-23.9
900	-0.1	-0.1001	0.10	-0.0455	-54.5	-0.0526	-47.4
1000	0	-0.0002	-0.20	0.0004	0.0	0.0470	4.7
1100	0.1	0.0996	-0.40	0.0453	-54.7	0.1467	46.7
1200	0.2	0.1995	-0.25	0.0905	-54.8	0.2465	23.3
1300	0.3	0.2994	-0.20	0.1356	-54.8	0.3462	15.4
1400	0.4	0.3994	-0.15	0.1805	-54.9	0.4459	11.5
1500	0.5	0.4993	-0.14	0.2254	-54.9	0.5456	9.1



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง v_o และ x เมื่อทดสอบกับ PT100

4. สรุปผล

วงจรปรับสภาพสัญญาณที่สร้างจากวงจรสายพาน กระแสและออปแอมป์สำหรับเซนเซอร์ความต้านทานเชิงเดี่ยวได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ จากผลการเขียนแบบการทำงานแสดงให้เห็นว่า วงจรที่นำเสนอให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีความแม่นยำสูง สามารถชดเชยค่าออฟเซตและความผิดพลาดของเกนซ์โดยใช้เพียงตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ต่อภายนอกเท่านั้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Vetelino and A. Reghu, "Introduction to Sensors", CRC Press, Boca Raton, 2011.
- [2] P. Regtien, "Sensors for Mechatronics", Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [3] D.V.S. Murty, "Transducers and Instrumentation", Prentice-Hall of India Limited, New Delhi, 2008.
- [4] B. Bower, "The Genesis of the Wheatstone Bridge", Engineering Science and Education Journal 10(1), 1970, pp.253-256.
- [5] J.M. Michael, "Industrial Control Electronics Application and Design", Prentice-Hall International, New Jersey, 1989.
- [6] V.J. Petrucelly, "Resistance Wire Strain Gauges as Elements of Wheatstone Bridge", Transactions of the America Institute of Electrical Engineering 69(2), 1950, pp.742-744.
- [7] J. Samiter, M. Puig-Vidal, S.A. Bota, S.K. Siskos and T. Laopoulos, "A Current-Mode Interface Circuit for a Piezoresistive Sensor", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 47(3), 1998, pp.708-710.
- [8] S. Valssis, S. Siskos and T. Laopoulos, "A Piezoresistive Pressure Sensor Interfacing Circuit" Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999, pp. 303-308.
- [9] S.J. Azhari and H. Kaabi, "AZKA Cell, the Current-mode Alternative of Wheatstone Bridge", IEEE Transactions on Circuit Systems I, Fundamental Theory and Applications 47(9), 2000, pp.1277-1284.
- [10] Y.G. Ghallab and W. Badawy, "A New Design of Current-Mode Wheatstone Bridge Using Operational Floating Current Conveyor", International Conference On MEMS, NANO and smart Systems, 2006, pp.41-44.
- [11] S. Gift and B. Maundy, "New Configurations for the Measurement of Small Resistance Changes," IEEE Transactions on Circuits and Systems II 53(3), 2006, pp. 178-182.
- [12] A. Julsereewong, P. Julsereewong, T. Rungkhum, H. Sasaki and H. Isoguchi, "Interface Circuit for Single Active Element Resistive Sensors", ICIC Express Letters 4(5B), 2010, pp.1985-1990.

- [13] E. Farshidi, “Simple Realization of CMOS Current-Mode Wheatstone Bridge”, IEEE International Conference on Signals and Systems, 2008, pp.1-4.
- [14] A. Jain, M.A. Maktoomi and M.S. Hashmi, “A New Circuit to Measure Resistance Variation Suitable for Strain Gauge” International Conference on SPIN, 2014, pp. 641-644.
- [15] S.J.G. Gift, “An Enhance Current - mode Instrumentation Amplifier”, IEEE Transactions Instrumentation and Measurement 50(1), 2001, pp. 85-88.