

วิธีการวัดความต้านทานของเซ็นเซอร์แบบหลายช่องสัญญาณด้วยวงจรป้อนกลับกลับซ้ำร่วมกับเทคนิคการสอบเทียบ

A Multi-Channel Resistive Sensor Measurement Technique Using Inverting Amplifier with Calibration-Based Compensation

จิรพงษ์ จิตตะโคตร¹ อภินันท์ อรุณโณ^{2*} สายชล ชุตติเจจัน³ คณิศพันธ์ บุญสมเชื้อ¹ ดำรงค์ อมรเดชาพล⁴ และสัญญา วรรคิต⁵

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม apinan.a@msu.ac.th*

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

⁴คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ⁵คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แบบหลายช่องสัญญาณ โดยใช้วงจรขยายสัญญาณกลับซ้ำ (Inverting Amplifier) ที่มีตัวต้านทานป้อนกลับแทนค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ ร่วมกับสวิตช์อนาล็อกสำหรับเลือกเซ็นเซอร์แต่ละตัว ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดผลกระทบจากแรงดันออฟเซตของออปแอมป์และความต้านทานของสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการสอบเทียบแรงดันเอาต์พุตร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า ผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560 ซึ่งมีมอดูลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital converter, ADC) ความละเอียด 10 บิต แสดงให้เห็นว่าวงจรที่เสนอสามารถวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ในช่วง 1–10 kΩ ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำกว่า 0.15%

คำสำคัญ: การวัดความต้านทาน วงจรขยายสัญญาณกลับซ้ำ สวิตช์อนาล็อก การสอบเทียบ และเซ็นเซอร์แบบหลายช่องสัญญาณ

Abstract

This paper presents a multi-channel resistive sensor measurement technique based on an inverting amplifier configuration, where the sensor resistance is placed in the feedback path. An analog switch is employed to select each sensor channel, enabling the system to support multiple sensors with a shared analog front-end. The proposed approach effectively mitigates the effects of op-amp input offset voltage and the resistance of analog switches (R_{on}) by utilizing a calibration procedure with a known reference resistor. Experimental results using an Arduino Mega 2560 microcontroller with a 10-bit ADC demonstrate that the system can accurately measure sensor resistances in the range of 1–10 kΩ, achieving a relative error of less than 0.15% throughout the range.

Keywords: Resistive measurement Inverting amplifier Analog switch Calibration and Multi-channel sensor

1. บทนำ

เซ็นเซอร์แบบรีซิสทีฟ (Resistive Sensors) ทำงานโดยอาศัยหลักการที่ค่าความต้านทานภายในของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลงตามปริมาณทางกายภาพที่ตรวจวัด เช่น เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (RTD และเทอร์มิสเตอร์), เซ็นเซอร์ความชื้น, เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแบบโพติโอมิเตอร์ และเซ็นเซอร์ก๊าซตระกูล MQ [1]–[3] ด้วยโครงสร้างที่เรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และความสามารถในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เซ็นเซอร์ประเภทนี้จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานระบบสมองกลฝังตัวและระบบวัดทางอุตสาหกรรม

การตรวจวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถทำได้หลากหลายเทคนิค โดยทั่วไปนิยมแปลงค่าความต้านทานให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น สัญญาณดิจิทัล คาบเวลา [4]–[7] หรือแรงดัน [8]–[10] และนำสัญญาณเหล่านี้ประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เทคนิคที่พบได้บ่อย ได้แก่ 1) เทคนิคแปลงความต้านทานเป็นความถี่ (Resistance-to-Frequency หรือ R-to-F) เป็นเทคนิคที่อาศัยวงจรออสซิลเลเตอร์ในการแปลงค่าความต้านทานให้เป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยความถี่ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ R_x ที่เชื่อมต่อ ตัวอย่างเช่น วงจร Relaxation Oscillator หรือ 555 Timer จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำสัญญาณที่ได้มาวัดเป็นคาบเวลา หรือจำนวนพัลส์ต่อหน่วยเวลา เพื่อแปลงกลับเป็นค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ 2) เทคนิคแปลงความต้านทานเป็นเวลา (Resistance-to-Time หรือ R-to-T) โดยใช้วงจร RC ชาร์จหรือคายประจุร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แล้ววัดช่วงเวลาที่แรงดันเปลี่ยนผ่านค่าที่กำหนด เทคนิคนี้สามารถใช้งานร่วมกับพอร์ตดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยไม่ต้องใช้ ADC และ 3) เทคนิคการแปลงความต้านทานเป็นแรงดัน (Resistance-to-Voltage หรือ R-to-V) ซึ่งทำได้โดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ร่วมกับแรงดันอ้างอิงที่รู้ค่าชัดเจน แล้วอ่านแรงดันที่ได้ด้วย ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ วิธีนี้ให้ความแม่นยำสูง หากได้รับการออกแบบวงจรและเลือกค่าตัวต้านทานอ้างอิง (Resistance reference, R_{ref}) อย่างเหมาะสม [9] อย่างไรก็ตาม วงจรแบ่งแรงดันยังคงมีข้อจำกัดด้านความ

แม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง และ ADC มีจำนวนบิตจำกัด [10]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างของเทคนิคเหล่านี้ [4]–[7] โดยทั่วไปถูกออกแบบมาสำหรับการวัดเซ็นเซอร์เพียงตัวเดียว จึงยากต่อการประยุกต์ใช้งานกับระบบที่ต้องวัดค่าจากเซ็นเซอร์หลายตัวพร้อมกัน เช่น ระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบตรวจจับหลายพารามิเตอร์พร้อมกัน ในกรณีของวงจรแบ่งแรงดัน หากต้องการวัดเซ็นเซอร์หลายตัว ก็จำเป็นต้องออกแบบวงจรแบ่งแรงดันแยกให้แต่ละเซ็นเซอร์ ซึ่งต้องใช้ตัวต้านทานอ้างอิงหลายชุดร่วมด้วย ทำให้วงจรมีความซับซ้อนและสิ้นเปลืองพื้นที่บนแผงวงจรมากขึ้น [10] เทคนิคการต่อเซ็นเซอร์เป็นอะเรย์หรือแมทริกซ์ (Sensor Array or Matrix) สามารถลดจำนวนพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์และสายสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการสแกนแถว-คอลัมน์ร่วมกับสวิตช์หรือมัลติเพล็กซ์เซอร์ [11]–[12] อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความแม่นยำลดลงเนื่องจากการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ (Cross-talk) ความแตกต่างของความต้านทานภายในสวิตช์ (R_{on}) แต่ละช่อง ความซับซ้อนในการควบคุมลำดับการสแกน และข้อจำกัดในการใช้งานกับเซ็นเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูงหรือมีช่วงความต้านทานกว้าง เช่น เซ็นเซอร์ก๊าซตระกูล MQ

ด้วยข้อจำกัดข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางใหม่ในการวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์หลายตัว โดยใช้วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วร่วมกับสวิตช์ชอนาล็อก พร้อมเทคนิคการสอบเทียบที่สามารถลดผลกระทบจากแรงดันออฟเซต (Offset) ของออปแอมป์ (Op-amp) และความต้านทานของสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังรองรับการวัดเซ็นเซอร์ได้หลายตัวโดยใช้วงจรขยายเพียงชุดเดียว ช่วยลดความซับซ้อนของวงจรและขยายขอบเขตการใช้งานให้ครอบคลุมระบบตรวจวัดแบบหลายช่องสัญญาณ ภายใต้โครงสร้างวงจรที่กะทัดรัดและเหมาะสมกับระบบสมองกลฝังตัว

2. วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วกับการประยุกต์ใช้วัดความต้านทานเซ็นเซอร์

2.1 วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วกับเซ็นเซอร์ต่อเข้าที่อินพุต

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของวงจรขยายสัญญาณกลับขั้วที่สามารถปรับอัตราขยายได้ (Programmable Gain Control) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ โดยมีการต่อเซ็นเซอร์ R_x ไว้ที่ขาอินพุตของออปแอมป์ และใช้แรงดันกระตุ้น v_{ect} เพื่อสร้างกระแสอ้างอิงผ่านเซ็นเซอร์ อัตราขยายของวงจรถูกควบคุมด้วยตัวต้านทานป้อนกลับ R_n เพื่อให้แรงดันเอาต์พุต v_o อยู่ในช่วงการทำงานของ ADC ได้อย่างเหมาะสม ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

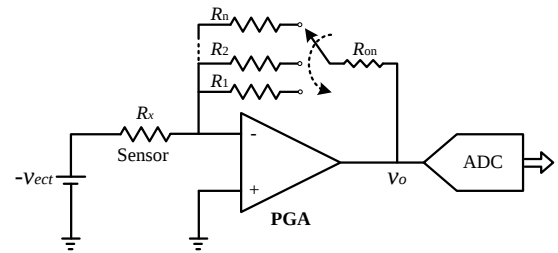
$$v_o = \frac{v_{ect}}{R_x} (R_n + R_{on}) \quad (1)$$

เมื่อ R_{on} คือความต้านทานภายในของสวิตช์ชอนาล็อก และ R_n คือตัวต้านทานป้อนกลับ จากสมการที่ (1) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อคำนวณค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ R_x ได้ดังนี้:

$$R_x = \frac{v_{ect}}{v_o} (R_n + R_{on}) \quad (2)$$

แม้ว่าวงจรขยายสัญญาณกลับขั้วตามรูปที่ 1 จะสามารถวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ได้อย่างแม่นยำ และยืดหยุ่นในด้านอัตราขยาย แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัด กล่าวคือ การเบี่ยงเบนของแรงดันกระตุ้น v_{ect} ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทานอ้างอิง R_{ref} และแรงดันออฟเซตของออปแอมป์ v_{offset} อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแรงดันเอาต์พุต v_o

นอกจากนี้ วงจรในลักษณะนี้ยังไม่เหมาะสมต่อการใช้งานร่วมกับเซ็นเซอร์หลายตัวพร้อมกัน เนื่องจากจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนหรือสลับค่าตัวต้านทานป้อนกลับทุกครั้งที่ต้องการวัดเซ็นเซอร์แต่ละตัว ซึ่งเพิ่มความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์และภาระของระบบควบคุม หากไม่มีการออกแบบระบบเลือกเซ็นเซอร์และกลไกการสอบเทียบที่เหมาะสม วงจรดังกล่าวอาจไม่สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพในระบบแบบหลายช่องสัญญาณ



รูปที่ 1 วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วกับเซ็นเซอร์ต่อเข้าที่อินพุต

2.2 วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วกับเซ็นเซอร์ป้อนกลับ

วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วที่มีเซ็นเซอร์ต่อเป็นความต้านทานป้อนกลับนั้น เคยถูกนำไปประยุกต์ใช้งานกับเซ็นเซอร์เพียงตัวเดียวมาก่อน [13] ในงานวิจัยนี้ วงจรถูกขยายความสามารถเพื่อรองรับการใช้งานกับเซ็นเซอร์หลายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแรงดันกระตุ้น v_{ect} ถูกจ่ายให้กับตัวต้านทานอ้างอิง R_{ref} ที่ต่ออยู่ที่ขาอินพุตของออปแอมป์ ขณะที่ตัวต้านทานป้อนกลับของออปแอมป์สามารถเลือกค่าความต้านทานได้จากเซ็นเซอร์แต่ละตัว R_{xn} ผ่านสวิตช์ชอนาล็อก ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเลือกเซ็นเซอร์ที่ต้องการวัดในแต่ละช่วงเวลา

โครงสร้างนี้ช่วยให้สามารถเลือกวัดเซ็นเซอร์ได้อย่างยืดหยุ่นโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวงจรหลัก อีกทั้งยังสามารถกำหนดกระแสที่ไหลผ่านเซ็นเซอร์ได้อย่างคงที่ผ่านค่าของ v_{ect} และ R_{ref} นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังเสนอแนวทางการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากออฟเซตของออปแอมป์ และความต้านทานภายในของสวิตช์ โดยใช้ตัวต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า R_{cal} เป็นตัวอ้างอิงในขั้นตอนสอบเทียบ การทำงานของวงจรแบ่งออกเป็นสองโหมด ได้แก่

• ในโหมดสอบเทียบ วงจรเลือกใช้ R_{cal} เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ ทำให้สามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากตัวต้านทานที่ทราบค่า โดยแรงดันเอาต์พุตในกรณีนี้กำหนดโดยสมการที่ (3):

$$v_{o_cal} = \frac{v_{ect}}{R_{ref}}(R_{cal} + R_{on}) + v_{offset} \quad (3)$$

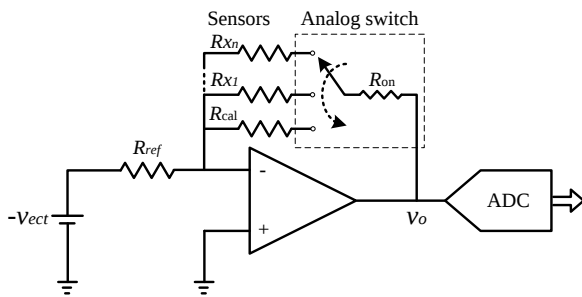
• ในโหมดวัดเซ็นเซอร์จริง วงจรเลือกใช้ R_{xn} เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามสมการที่ (4):

$$v_{oxn} = \frac{v_{ect}}{R_{ref}}(R_{xn} + R_{on}) + v_{offset} \quad (4)$$

นำสมการที่ (4) หักล้างกับสมการที่ (3) หาค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ R_{xn} ได้ดังนี้:

$$R_{xn} = \frac{R_{ref}}{v_{ect}}(v_{oxn} - v_{o_cal}) + R_{cal} \quad (5)$$

จากผลลัพธ์ในสมการที่ (5) จะเห็นว่าความต้านทานสวิตช์ R_{on} และแรงดันออฟเซต v_{offset} ถูกกลบไล่ออก ทำให้วิธีการที่เสนอสามารถวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ได้อย่างแม่นยำภายใต้เทคนิคการปรับเทียบที่เสนอ



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วกับเซ็นเซอร์ป้อนกลับที่เสนอ

2.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

แม้ว่าระบบที่นำเสนอจะสามารถลดผลกระทบจากออฟเซตของออปแอมป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเทคนิคการสอบเทียบตามสมการที่ (3)–(5) แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนบางประการที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของค่าความต้านทานที่วัดได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสองแหล่งหลัก ได้แก่ ความต้านทานของสวิตช์ชอนาล็อก R_{on} และความผิดพลาดจากกระบวนการแปลงสัญญาณของ ADC

1) ความคลาดเคลื่อนจาก R_{on}

ในสมการที่ (3) และ (4) ได้มีการสมมติว่า ความต้านทานของสวิตช์ชอนาล็อก R_{on} ในแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเท่ากัน เพื่อให้การวิเคราะห์วงจรเป็นไปอย่างง่ายและต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทาน R_{on} ของแต่ละช่องอาจมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากลักษณะการทำงานของสวิตช์ชอนาล็อกมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ แรงดันควมคุม และกระแสที่ไหลผ่าน [14]

ความแตกต่างของ R_{on} ระหว่างช่องสัญญาณอาจส่งผลโดยตรงต่อแรงดันเอาต์พุต v_o ที่วัดได้ และทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในค่าความ

ต้านทานของเซ็นเซอร์ R_{xn} ที่คำนวณได้จากสมการที่ (5) โดยเฉพาะในกรณีที่เซ็นเซอร์มีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งความต้านทานของสวิตช์จะมีอิทธิพลต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรอย่างชัดเจน

2) ความคลาดเคลื่อนจาก ADC

ความผิดพลาดภายในที่เกิดจากตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ได้แก่ ออฟเซต (Offset Error), อัตราขยาย (Gain Error), อินทิกรัลนอนลิเนียริตี (Integral Nonlinearity: INL) และ ดิฟเฟอเรนเชียลนอนลิเนียริตี (Differential Nonlinearity: DNL) ซึ่งความผิดพลาดเหล่านี้อาจทำให้ค่าแรงดันที่แปลงได้เบี่ยงเบนจากค่าจริง แม้ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก โดย:

- Offset Error ทำให้ผลการแปลงทุกค่าเบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกัน
- Gain Error ส่งผลให้สัดส่วนระหว่างแรงดันอินพุตกับค่าดิจิทัลผิดเพี้ยน
- INL ทำให้ลักษณะการแปลงไม่เป็นเส้นตรงเทียบกับเส้นอุดมคติ
- DNL ทำให้เกิดสเตปไม่สม่ำเสมอ หรืออาจมีโค้ดบางค่าหายไป (Missing Code)

ความผิดพลาดเหล่านี้มีผลต่อความแม่นยำในการคำนวณค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์จากแรงดัน v_o ที่วัดได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้ ADC ที่มีความละเอียดต่ำ การลดความคลาดเคลื่อนจาก ADC สามารถทำได้โดยการเพิ่มการเฉลี่ยผลการวัดหลายครั้ง (oversampling) หรือ การใช้ external ADC ที่มีความละเอียดสูงขึ้น (เช่น 12 บิต หรือ 16 บิต)

3. ผลการทดลอง

3.1 ตั้งค่าการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ซึ่งมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต โดยมีแรงดันอ้างอิง V_{ref} เท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงระบบ V_{cc} ที่วัดได้อยู่ที่ 5.01 V สำหรับพอร์ตเอนด์แบบแอนะล็อก ซึ่งประกอบด้วย ออปแอมป์ (LM741) และสวิตช์ชอนาล็อก (CD4051B) ได้รับแรงดันเลี้ยงจากแหล่งจ่ายไฟคู่ ± 6 V กำหนดแรงดันกระตุ้น $v_{ect} = -6$ V โดยมีตัวต้านทานอ้างอิง $R_{ref} = 12,198 \Omega$ ซึ่งทำหน้าที่กำหนดกระแสผ่านวงจรเท่ากับประมาณ $\frac{6}{12,198} \approx 4.9$ mA ระบบถูกออกแบบให้เหมาะสำหรับการวัดความต้านทานของเซ็นเซอร์ในช่วง 1–10 k Ω สำหรับขั้นตอนสอบเทียบ ใช้ตัวต้านทานมาตรฐาน $R_{cal} = 981 \Omega$ เพื่อใช้ในสมการที่ (3)–(5) ในการชดเชยข้อผิดพลาดของระบบ ผลลัพธ์ 100 ค่าถูกนำมาทำการเฉลี่ยหาค่า R_x ค่าความต้านทานทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ R_x , R_{cal} และ R_{ref} ถูกวัดด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ TECPEL DMM8050 ซึ่งมีความแม่นยำสูง เพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลการวัดของระบบที่พัฒนาขึ้น

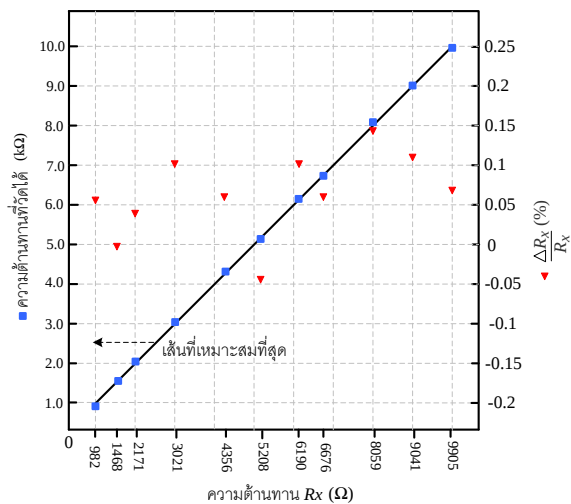
3.2 วัดความไม่แน่นอนของความต้านทาน

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่วัดได้ (Measured resistance) กับค่าจริงของ R_x ที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์มาตรฐาน โดยมีการวางแผนเส้นประมาณค่าที่ดีที่สุด (Best-fit line) เพื่อใช้เปรียบเทียบแนวโน้มของข้อมูล วงกลมสีน้ำเงินแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่าง ขณะที่สามเหลี่ยมสีม่วงแสดง ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) ซึ่งคำนวณจากสมการ:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_{\text{measured}} - R_{\text{actual}}}{R_{\text{actual}}} \times 100\% \quad (6)$$

จากกราฟจะเห็นได้ว่า:

- ค่าความต้านทานที่วัดได้มีแนวโน้มอยู่ใกล้กับเส้นตรงอ้างอิง (Best-fit line) ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องโดยรวมของระบบวัดที่พัฒนา
- ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ($\Delta R_x/R_x$) ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $\pm 0.15\%$ โดยไม่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนอย่างชัดเจนในช่วงใดช่วงหนึ่งของค่าความต้านทาน



รูปที่ 3 ผลการวัดความไม่แน่นอนของความต้านทานเซ็นเซอร์

ผลการวัดนี้แสดงให้เห็นว่า วงจรที่เสนอสามารถวัดค่าความต้านทานในช่วง 1–10 kΩ ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำกว่า $\pm 0.15\%$ ตลอดช่วงการวัด ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไปกับเซ็นเซอร์แบบรีซิสทีฟหลายตัว โดยไม่ต้องใช้วงจรแยกสำหรับแต่ละเซ็นเซอร์ แม้จะใช้ออปแอมป์ LM741 ซึ่งเป็นออปแอมป์ทั่วไปที่มีแรงดันออฟเซตอินพุตสูง (1-5 mV) เมื่อเทียบกับออปแอมป์ชนิด precision แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่เสนอ ซึ่งใช้การสอบเทียบร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐาน R_{cal} และนำแรงดันของโหมดวัดเซ็นเซอร์มาหักลบกับแรงดันจากโหมดสอบเทียบ ตามสมการที่ (5) สามารถลดผลกระทบจากแรงดันออฟเซตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่เสนอ ซึ่งใช้การสอบเทียบร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐาน R_{cal} และนำแรงดันของโหมดวัดเซ็นเซอร์มาหักลบกับแรงดันจากโหมดสอบเทียบ ตามสมการที่ (5) สามารถลดผลกระทบจากแรงดันออฟเซตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่เสนอ ซึ่งใช้การสอบเทียบร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐาน R_{cal} และนำแรงดันของโหมดวัดเซ็นเซอร์มาหักลบกับแรงดันจากโหมดสอบเทียบ ตามสมการที่ (5) สามารถลดผลกระทบจากแรงดันออฟเซตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวัดแบบหลายช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพผลการวัดนี้แสดงให้เห็นว่า วงจรที่เสนอสามารถวัดค่าความต้านทานในช่วง 1–10 kΩ ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำกว่า $\pm 0.15\%$ ตลอดช่วงการวัด ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไปกับเซ็นเซอร์แบบรีซิสทีฟหลายตัว โดยไม่ต้องใช้วงจรแยกสำหรับแต่ละเซ็นเซอร์

4. อภิปราย

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3 สามารถสังเกตได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ในช่วง 1–10 kΩ ได้อย่างมีความแม่นยำและเสถียร ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดวัดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $\pm 0.15\%$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะในระบบที่ต้องวัดเซ็นเซอร์หลายตัว เช่น ระบบจุ่มกิโลอิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อมแบบหลายพารามิเตอร์

แม้ว่าการทดลองในครั้งนี้จะดำเนินการเฉพาะกับเซ็นเซอร์เพียงตัวเดียวเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรและวิธีการสอบเทียบ แต่โครงสร้างวงจรที่เสนอสามารถรองรับการวัดเซ็นเซอร์หลายตัวได้โดยตรงด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการเลือกสวิตช์ช่องสัญญาณการวัด ซึ่งจากหลักการและสมการที่ใช้ในการคำนวณ คาดว่าผลการวัดของเซ็นเซอร์ช่องอื่นๆ จะมีความแม่นยำในระดับใกล้เคียงกัน ตราบเท่าที่สถานะแวดล้อม เช่น ค่า R_{on} และแรงดันกระตุ้นคงที่ และการสอบเทียบถูกดำเนินการในลักษณะเดียวกัน แม้ว่าจะมีการสมมติให้ค่าความต้านทานของสวิตช์ช่องสัญญาณ R_{on} เท่ากันในทุกช่องสัญญาณ แต่จากผลการวัดจริง พบว่าแนวโน้มความคลาดเคลื่อนไม่ได้เบี่ยงเบนอย่างเป็นระบบ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากความแตกต่างของ R_{on} แต่ละช่องยังอยู่ในระดับที่ไม่รบกวนการวัดอย่างมีนัยสำคัญ การใช้เทคนิคสอบเทียบร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐาน R_{cal} สามารถลดผลกระทบจากออฟเซตของออปแอมป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำโดยรวมยังคงถูกจำกัดด้วยข้อผิดพลาดภายในของ ADC เช่น Offset Error, Gain Error, INL และ DNL ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ ADC ความละเอียด 10 บิตของ Arduino Mega2560 ที่มี LSB ประมาณ 4.88 mV และมีความไม่เชิงเส้นอย่างช่วง หากต้องการยกระดับความแม่นยำเพิ่มเติม อาจพิจารณาใช้ ADC ภายนอกที่มีความละเอียดสูงกว่า หรือใช้วิธีการเฉลี่ยผลการวัดหลายรอบ (Oversampling) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและควอนไทเซชัน (Quantization noise)

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แบบหลายช่องสัญญาณ โดยใช้วงจรขยายสัญญาณกลับขั้วที่มีการควบคุมการเลือกเซ็นเซอร์ผ่านสวิตช์ช่องสัญญาณ และใช้เทคนิคสอบเทียบร่วมกับตัวต้านทานมาตรฐาน เพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากแรงดันออฟเซตของออปแอมป์ ผลการทดลองที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560 กับ ADC

ความละเอียด 10 บิต แสดงให้เห็นว่าวงจรที่เสนอสามารถวัดค่าความต้านทานในช่วง 1–10 k Ω ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ไม่เกิน $\pm 0.15\%$

วงจรที่เสนอมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องการวัดเซ็นเซอร์หลายตัวด้วยทรัพยากรฮาร์ดแวร์จำกัด และสามารถต่อยอดไปสู่การประยุกต์ใช้งานกับเซ็นเซอร์ประเภทต่าง ๆ ที่มีลักษณะความต้านทานเปลี่ยนแปลง เช่น เซ็นเซอร์ก๊าซ เซ็นเซอร์ความชื้น หรือเซ็นเซอร์อุณหภูมิในงานเกษตรอัจฉริยะและอุปกรณ์พกพา

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Application Notes for RTD, TE Connectivity. Accessed: Nov. 5, 2023. [Online]. Available: Datasheet: <https://www.te.com/content/dam/te.com/documents/sensors/global/how-rt-d-sensors-work.pdf>
- [2] F. Reverter, "A tutorial on thermal sensors in the 200th anniversary of the Seebeck effect," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 22122–22132, Oct. 2021.
- [3] S. Kaunkid, A. Aurasopon, W. Khamsen, C. Takeang, N. Piladaeng and J. Lloret, "Resistive Measurement Method for MQ Sensors Based on ADCs of Microcontrollers," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 144364–144376, Oct. 2024.
- [4] Z. Kokolanski, C. Gavrovski, V. Dimcev, and M. Makraduli, "Simple interface for resistive sensors based on pulse width modulation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 11, pp. 2983–2992, Nov. 2013.
- [5] K. Elangovan and C. S. Anoop, "Simple and efficient relaxation oscillator-based digital techniques for resistive sensors—Design and performance evaluation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 9, pp. 6070–6079, Sep. 2020.
- [6] F. Reverter, "A microcontroller-based interface circuit for non-linear resistive sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 2, Feb. 2021, Art. no. 027001.
- [7] F. Reverter, "A microcontroller-based interface circuit for three-wire connected resistive sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–4, 2022.
- [8] G. Makan, R. Mingesz, and Z. Gingl, "How accurate is an Arduino Ohmmeter?" *Phys. Educ.*, vol. 54, no. 3, May 2019, Art. no. 033001.

- [9] A. Aurasopon, W. Khamsen, C. Takeang, T. Thongsan and J. Lloret, "Adaptive Reference Resistance for Accurate Measurement of Resistive Sensors With Microcontroller," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 5, pp. 8446–8457, March, 2025,
- [10] S. Lakshminarayana, Y. Park, H. Park, and S. Jung, "A readout system for high speed interface of wide range chemiresistive sensor array," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45726–45735, May 2022.
- [11] J. S. Kim, D.-Y. Kwon and B. D. Choi, "High-Accuracy, Compact Scanning Method and Circuit for Resistive Sensor Arrays," *Sensors*, vol. 16, 2016, Art. no. 155
- [12] W. Zhang, L. Qin, R. Chen, J. Wang, W. Zheng and W. Zhou, "The Influence Mechanism and Improvement Strategy of Multiplexer on Measurement Error of the 2-D Resistive Sensor Array Data Acquisition Circuit," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 17, pp. 20086–20096, Sept., 2023.
- [13] F. Reverter, "A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive with a Wire-Resistance Compensation," *Sensors*, vol. 23, 2023, Art. no. 8228.
- [14] CD4051B: May. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/>



จิรพงษ์ จิตตะโคตร เกิดที่จังหวัดศรีสะเกษ ประเทศไทย ในปี 2517 เขาได้รับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย ในปี 2539 และปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในปี 2548 และ 2561 ตามลำดับ ปัจจุบันเขาทำงานเป็นรองศาสตราจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย ความสนใจในการวิจัยปัจจุบันของเขา ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ความถี่สูง การควบคุมแบบดิจิทัลของตัวแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และพลังงานหมุนเวียน



อภินันท์ อูโสภณ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย ในปี 2538 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในปี 2546 และ 2550 ตามลำดับ เขาเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ในปี 2550 จากนั้นเขาย้ายไปที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประเทศไทย ในปี 2551 โดยปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ความสนใจทางด้านงานวิจัยปัจจุบัน ได้แก่ การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในเครื่องมือวัด และอิเล็กทรอนิกส์-คอมพิวเตอร์ในเกษตรกรรม



สายชล ขุดเจือจิน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2543 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2547 และปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต (ปร.ค.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ 2554 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ความสนใจใน การวิจัยปัจจุบันของเขารวมถึงอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ความถี่สูงสำหรับ การเหนี่ยวนำความร้อน อินเวอร์เตอร์แบบต้นทางกระแสและแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



คณิตพันธ์ บุญสมเชื้อ เป็นอาจารย์ประจำภาควิชา เทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา คณะครุศาสตร์ อุดสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (RMUTT) จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีอุตสาหกรรมศึกษบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎี บัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าโดยมีประสบการณ์และความ เชี่ยวชาญในด้านเทคโนโลยีการศึกษา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อินเทอร์เน็ต ของสรรพสิ่ง (IoT) และปัญญาประดิษฐ์ (AI)



ดำรงค์ อมรเดชาพล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา- ตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี- พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี 2539 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี 2543 และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี 2554 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา โดยดำรง ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ มีความถนัดและสนใจในงานวิจัย ได้แก่ การ

ประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุตสาหกรรม พลังงานทดแทน ยาน- ยนต์ไฟฟ้า ระบบขนส่งทางราง



สัญญา คอกริด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าลาดกระบัง พ.ศ. 2542 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม- กเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2547 และระดับปริญญาเอก สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2558 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม งานวิจัยที่ สนใจมุ่งเน้นในด้านระบบฝังตัวอัจฉริยะ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพ- สิ่ง และพลังงานหมุนเวียนที่นำมาใช้ในระบบการเกษตรอัจฉริยะ