

วงจรเชื่อมต่อสัญญาณราคาถูกลำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า
อนุชา แก้วพูลสุข* และ เกรกกีต ปูนารต

A Low-Cost Interfacing Circuit for Capacitance Measurement

Anucha Kaewpoonsuk* and Krerkkrit Poonart

กลุ่มวิจัยฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
จังหวัดพิษณุโลก 65000

*Corresponding author. E-mail: anuchak@nu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาวงจรเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลต่อรวม ซึ่งทำให้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนต่ำ เทคนิคที่ใช้เป็นการอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวจับเวลาค่าคงตัวของวงจร RC โดยตรง ย่านการวัดค่าความจุไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วง 1 nF ถึง 1000 nF และช่วง 1 μ F ถึง 1000 μ F ผลจากการทดสอบการทำงานพบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้เป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ โดยมีค่าผิดพลาดแบบเทียบค่าเต็มสเกลทั้งสองช่วงเท่ากับ $\pm 0.42\%$ และ $\pm 0.82\%$ ตามลำดับ

คำสำคัญ: วงจรเชื่อมต่อสัญญาณ การตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า ค่าคงตัวเวลา-RC ระบบเฝ้าตรวจวัด เซนเซอร์แบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า

Abstract

Implementation of an interfacing circuit for capacitance measurement is presented in this paper. The design circuit is implemented without using analog-to-digital converter hence low cost equipment can be achieved. The proposed technique uses microcontroller to directly measure time-constant of RC-circuit. Capacitance measurement is divided into 2 ranges: 1 nF to 1000 nF -range, and 1 μ F to 1000 μ F -range. Experimental results verifying the proposed circuit performance are closely agreed with the expected values. Maximum errors are approximately equal to $\pm 0.42\%$ of full-scale and $\pm 0.82\%$ of full-scale, respectively.

Keyword: Interface circuit, capacitive sensing, RC-time constant, data acquisition, capacitive sensors

บทนำ

การตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าเป็นหัวข้อหนึ่งที่สำคัญสำหรับพัฒนาระบบเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม รวมถึงในงานวิจัยใหม่ๆ ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์หรือวัสดุที่ต้องการทดสอบ หลักการที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้ามีด้วยกัน 4 แบบ ดังนี้คือ แบบแรกใช้วิธีจ่ายสัญญาณรูปไซน์ให้กับตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัด จากนั้นทำการตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ หรือใช้วิธีตรวจสอบการเลื่อนเฟสสำหรับสอบเทียบเป็นค่าความจุไฟฟ้า (Majid *et al.*, 2009; Preethichandra and Shida, 2001; Rerkratn *et al.*, 2010) แบบที่สองเป็นการอาศัยหลักการสวิตซ์คาปาซิเตอร์ (switch capacitor principle) (Chiang and Huang, 2006; George and Kumar, 2010; Heidary and Meijer, 2007; Liu *et al.*, 2008; Lu *et al.*, 2008; Yazdi *et al.*, 2000) ซึ่งนำมาสังเคราะห์เป็นความต้านทานชนิดปรับค่าได้ ที่แปรผันกับค่าความจุไฟฟ้าและความถี่ของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสวิตซ์ แบบที่สามใช้วิธีนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต้องการตรวจวัดไปต่อรวมเป็นส่วนหนึ่งของวงจรถ่ายสัญญาณ จากนั้นทำการวัดคาบของสัญญาณดังกล่าวที่ได้ ซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้า (Cheng *et al.*, 2009; Hruškovic and Hribik, 2008; Li *et al.*, 1997; Reverter *et al.*, 2007; Reverter *et al.*, 2008) แบบที่สี่เป็นการอาศัยหลักการค่าคงตัวของวงจรรวม RC (Jordana and Pallàs-Areny, 2006; Reverter and Casas, 2008) โดยจะใช้วิธีการจับเวลาขณะชาร์จประจุ หรือขณะคายประจุของตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัด สำหรับวิธีการในแบบสุดท้ายนี้จะมีข้อดีที่ความเรียบง่ายของวงจร ประกอบกับความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบัน ซึ่งจะมีความเร็วในการทำงานที่สูงขึ้น การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมและการตัดแปลงแก้ไขสามารถทำได้สะดวกขึ้น ภายในโครงงานนี้จึงได้ทำการสร้างเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบต้นทุนต่ำ โดยอาศัยความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวจับเวลาในช่วงขณะคายประจุของตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัด สำหรับรายละเอียดการออกแบบจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

หลักการ และเทคนิคการออกแบบ

ส่วนฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ภายในงานนี้อาศัยความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S52 เป็นตัวจับเวลาค่าคงตัวของวงจรรวมที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัด (C_x) และตัวต้านทานที่ทราบค่า (R_{k1} , R_{k2}) ที่เหมาะสมในแต่ละขบวนการวัดดังแสดงในรูป 1 โดยในการออกแบบวงจรได้ใช้ออปแอมป์ (Operational Amplifiers; Op-Amps) A_1 และ A_2 สำหรับทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) และเป็นตัวเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage Comparator) ตามลำดับ ใช้สวิตซ์ SW1 และ SW2 สำหรับให้ผู้ใช้เลือก

ย่านการวัด ใช้สวิตช์ sw3 สำหรับเป็นปุ่มกดเริ่มขั้นตอนการตรวจวัด ใช้สวิตช์ sw4 สำหรับกรณีต้องการรีเซตระบบ และใช้จอแอลซีดี (LCD) สำหรับแสดงผลการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า การทำงานของระบบที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ สมมุติให้สวิตช์ sw1 ต่ออยู่กับตัวต้านทาน R_{k1} สวิตช์ sw2 อยู่ในสถานะปิดวงจร (Closed) หลังจากผู้ใช้งานกดสวิตช์ sw3 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณลอจิก Q_o ที่มีสถานะลอจิกเป็น “1” ให้กับออปแอมป์ A_1 โดยออปแอมป์ A_1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์จะส่งผ่านความต่างศักย์กระแสตรงผ่านตัวต้านทาน R_{k1} เพื่อไปชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ C_x ที่ต้องการตรวจวัด หลังจากการหน่วงเวลาของไมโครคอนโทรลเลอร์จนแน่ใจว่าได้รับการชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณลอจิก Q_o ที่มีสถานะลอจิกเป็น “0” ให้กับออปแอมป์ A_1 และจะทำการเริ่มนับสัญญาณนาฬิกาภายในของตัวเอง ตัวเก็บประจุ C_x จะคายประจุไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน R_{k1} โดยค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_x จะมีค่าลดลงตามสมการ

$$V_{Cx} = V_{C0} \exp(-t/R_{k1}C_x) = V_{C0} \exp(-t/\tau) \tag{1}$$

เมื่อ τ คือค่าคงตัวของวงจร, V_{C0} และ V_{Cx} คือค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_x ในสถานะเริ่มต้นก่อนการคายประจุและในขณะเวลา (t) ใด ๆ ตามลำดับ โดย V_{C0} จะมีค่าประมาณเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณลอจิก Q_o ที่มีสถานะลอจิกเป็น “1” และในงานนี้ได้กำหนดค่าความต่างศักย์อ้างอิง (V_{ref}) สำหรับเป็นตัวเปรียบเทียบกับ V_{Cx} โดยได้ออกแบบไว้ดังนี้คือ

$$V_{ref} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC} = \frac{2}{5} V_{CC} \tag{2}$$

เมื่อ V_{CC} คือค่าความต่างศักย์ไฟเลี้ยงวงจร

ความต่างศักย์ V_{Cx} จะมีค่าลดลงจนกระทั่งเริ่มต่ำกว่าความต่างศักย์อ้างอิง (V_{ref}) สัญญาณเอาต์พุต (Q_i) ของออปแอมป์ A_2 จะเปลี่ยนสถานะลอจิกจาก “1” เป็น “0” ไมโครคอนโทรลเลอร์หยุดการนับสัญญาณนาฬิกาภายใน โดยในที่นี้จะใช้เวลา (t_c) ตั้งแต่เริ่มนับจนหยุดนับทั้งหมดเท่ากับ

$$t_c = -\tau \ln(2V_{CC} / 5V_{C0}) \tag{3}$$

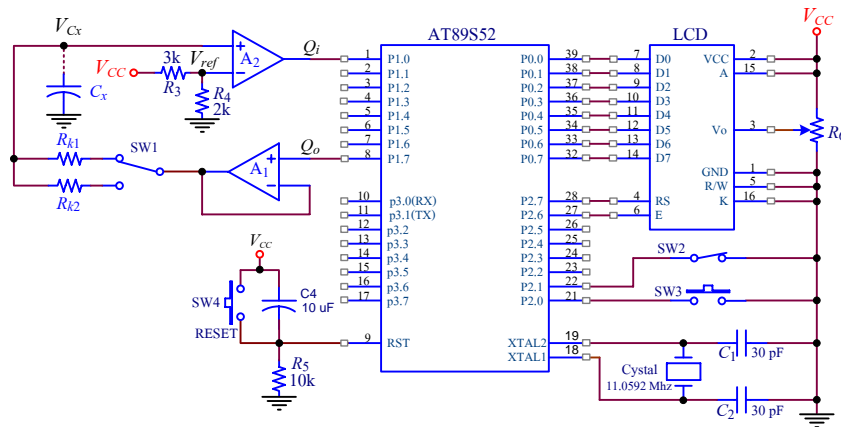
จากสมการที่ (3) สามารถแก้สมการเพื่อหาค่า C_x ได้ดังนี้คือ

$$C_x = \frac{\tau}{R_{k1}} = -\frac{t_c}{R_{k1} \ln(2V_{CC} / 5V_{C0})} \tag{4}$$

จากสมการที่ (4) จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้า C_x จะแปรผันตรงกับค่าเวลา (t_c) แต่อย่างไรก็ตามผลการตรวจวัดอาจคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งมีผลมาจากการใช้งานตัวต้านทาน R_{k1} หรือค่าความต่างศักย์ที่จุดต่างๆ คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในที่นี้จึงได้ใช้วิธีสอบเทียบค่าสัญญาณนาฬิกาภายในที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์นับได้ กับค่าของตัวเก็บประจุที่ทราบค่า สำหรับการคำนวณหาค่า C_x และเพื่อความแน่ใจสำหรับการตรวจวัด ภายในงานนี้ได้ออกแบบให้ระบบมีการทำงานซ้ำอีกเจ็ดครั้งเพื่อนำค่า C_x ที่ตรวจวัดได้ทั้งแปดค่าเฉลี่ยก่อนส่งไปแสดงผลยังจอแอลซีดีต่อไป

ในการทำงานเดียวกันเมื่อผู้ใช้งานเลือกสวิตช์ SW1 ต่ออยู่กับตัวต้านทาน R_{k2} สวิตช์ SW2 อยู่ในสถานะเปิดวงจร (Open) หลังจากผู้ใช้งานกด SW3 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจวัดค่า C_x ในย่านการทำงานที่สอง โดยจะใช้วิธีการเฉลี่ยค่าจากแปดค่าก่อนส่งผลไปแสดงที่จอแอลซีดีเช่นเดียวกัน สำหรับสมการในย่านที่สองนี้สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$C_x = \frac{\tau}{R_{k2}} = -\frac{t_c}{R_{k2} \ln(2V_{CC} / 5V_{C0})} \tag{5}$$

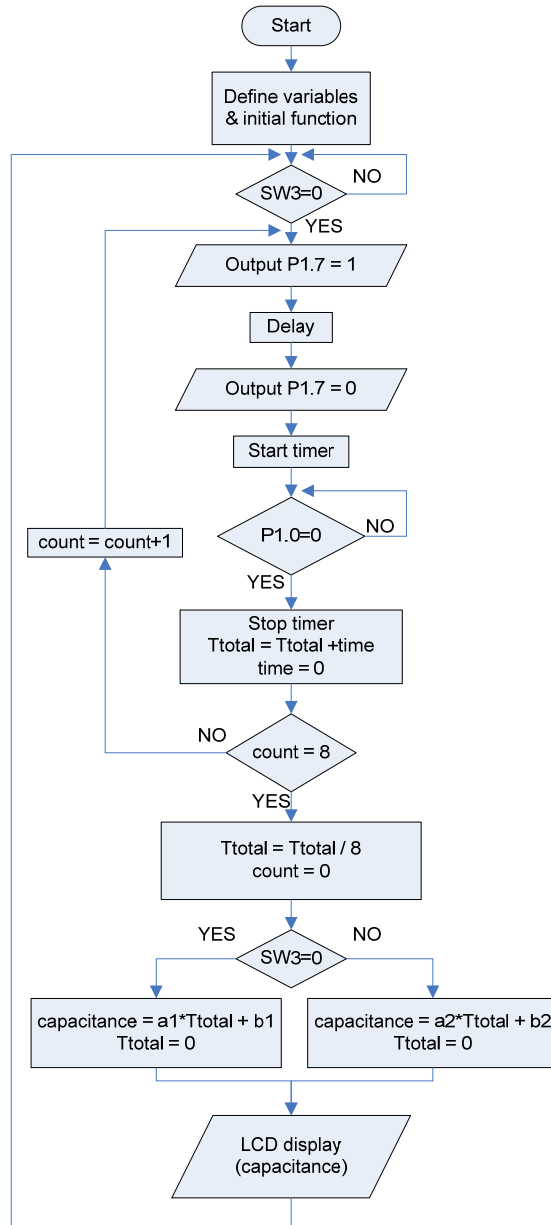


รูป 1 ลักษณะการต่อวงจรภายในโครงการ

2.2 ส่วนซอฟต์แวร์ (Software)

ภายในงานนี้ได้กำหนดให้พอร์ต P1.0 และ P1.7 เป็นขาอินพุตเพื่อตรวจวัดสัญญาณ Q_i และขาเอาต์พุตสำหรับการส่งสัญญาณ Q_o ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S52 ตามลำดับ กำหนดพอร์ต P0.0 – P0.7 และ P2.6–P2.7 สำหรับการติดต่อและการควบคุมการทำงานของจอแอลซีดี ใช้พอร์ต P2.1 สำหรับการเลือกย่านการวัด และใช้พอร์ต P2.0 สำหรับการตรวจเช็คการกดสวิตช์ SW3 เพื่อเริ่มการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า โปรแกรมประมวลผลพัฒนาขึ้นจากโปรแกรมภาษาซี รูป 2 แสดงผัง

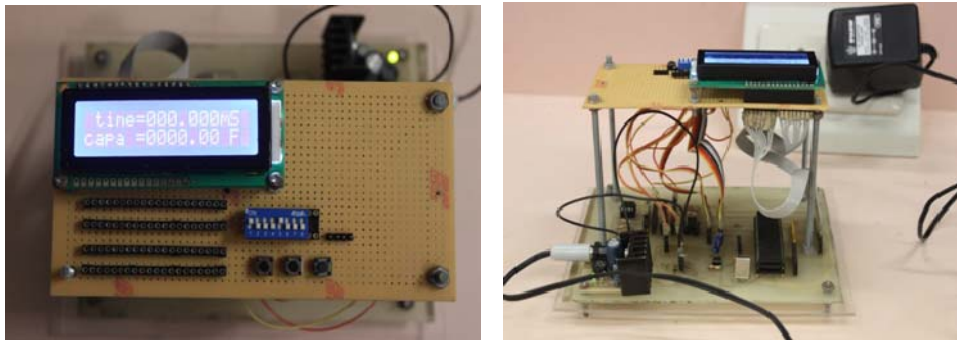
(Flowchart) กระบวนการทำงานของโปรแกรมประมวลผลที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าในแต่ละครั้งนั้นจะมีการทำซ้ำจนครบรอบก่อนจะมีการนำค่าเวลาที่ตรวจนับได้มาเฉลี่ยและคำนวณเป็นค่าความจุไฟฟ้าต่อไป ในส่วนของฟังก์ชันย่อยต่าง ๆ เช่นการกำหนดค่าเริ่มต้น การหน่วงเวลา และการส่งข้อมูลไปแสดงผลยังจอแอลซีดี ในที่นี้ได้ละไว้ในฐานที่เข้าใจ



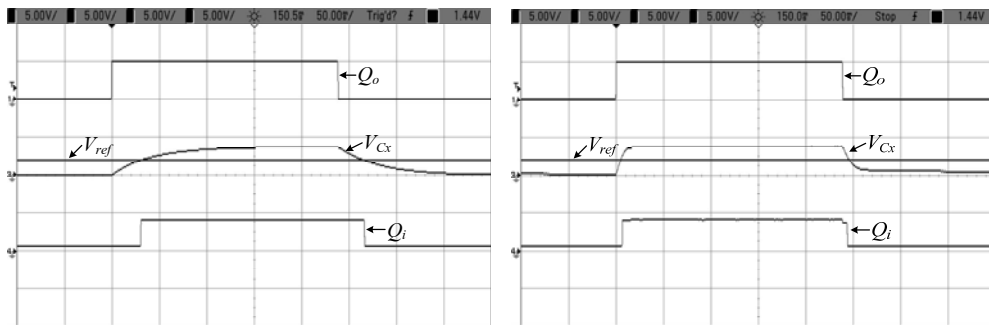
รูป 2 ฟังก์ชันการประมวลผล

การทดสอบ ผลการทดสอบ และการวิจารณ์ผลการทำงาน

จากหลักการของวงจรที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นดังแสดงในรูป 1 ผู้วิจัยได้พัฒนาเป็นชุดเครื่องมือดังแสดงในรูป 3 การจับเวลาเป็นการอาศัยการนับสัญญาณนาฬิกาภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีความละเอียดประมาณเท่ากับ $1.085 \mu\text{s}$ และผลจากการกำหนดค่าความต่างศักย์อ้างอิง (V_{ref}) ดังสมการที่ (2) จะได้ช่วงในการจับเวลาสูงสุดประมาณ $71,106 \mu\text{s}$ ทำการแบ่งย่านการวัดออกเป็นสองช่วงคือ ช่วง 1 nF ถึง 1000 nF และช่วง $1 \mu\text{F}$ ถึง $1000 \mu\text{F}$ โดยรูป 4 แสดงตัวอย่างการตรวจวัดรูปสัญญาณ Q_o , V_{Cx} และ Q_i ของวงจรทั้งสองย่านการทำงาน ทำการเปรียบเทียบค่าเวลาที่ตรวจวัดได้ทั้งสองย่านกับค่าความจุไฟฟ้าชนิดไมลาร์ (Mylar) ที่ทราบค่าโดยใช้เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น LCR-819 ที่มีความแม่นยำ (accuracy) 0.05% ตรวจวัด ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูป 5 พิจารณาค่าความชันของกราฟทั้งสองซึ่งจะได้ค่าความไวของระบบในแต่ละช่วงคือ $0.0358 \text{ nF}/\mu\text{s}$ และ $0.0185 \mu\text{F}/\mu\text{s}$ ตามลำดับ



รูป 3 การติดตั้งชุดวัดค่าความจุไฟฟ้า

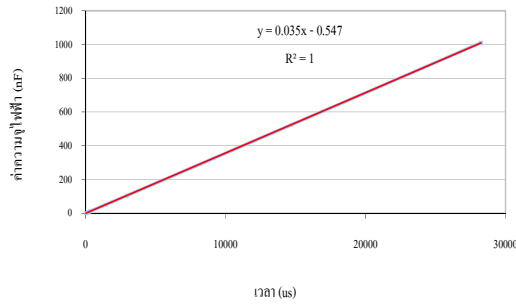


(ก) ช่วง 1 nF ถึง 1000 nF

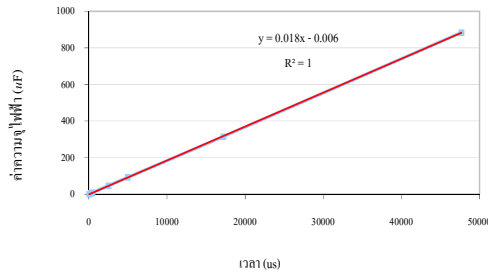
(ข) ช่วง $1 \mu\text{F}$ ถึง $1000 \mu\text{F}$

(สเกลแนวตั้ง: $5\text{V}/\text{div.}$, สเกลแนวนอน: $50\text{ms}/\text{div.}$)

รูป 4 ตัวอย่างผลการวัดสัญญาณที่สำคัญของวงจร



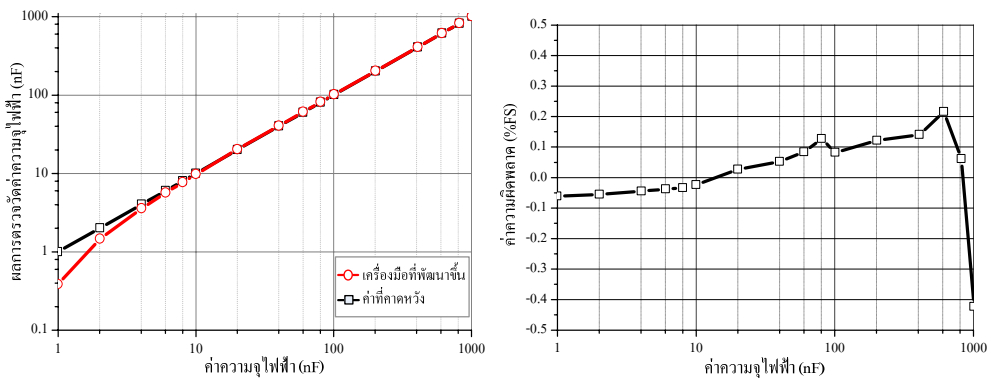
ก. ช่วง 1 nF ถึง 1000 nF



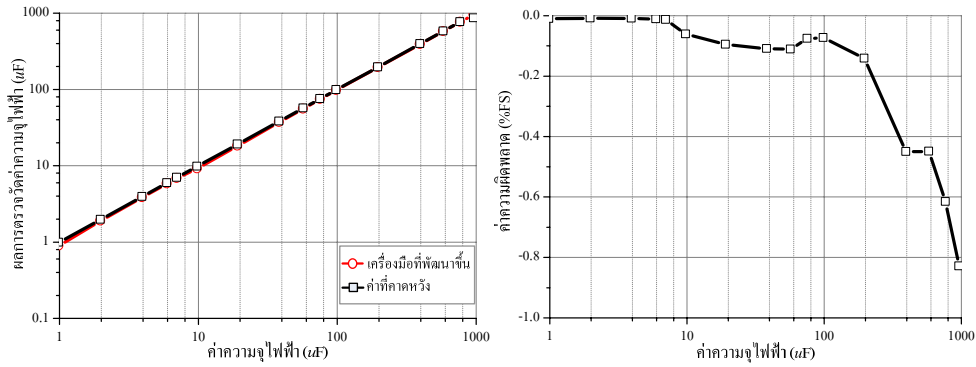
ข. ช่วง 1 μ F ถึง 1000 μ F

รูป 5 ผลการเปรียบเทียบค่าเวลากับค่าความจุไฟฟ้า

หลังจากได้ทำการทดสอบหาค่าสเกล (Scaling) ค่าเวลาที่ตรวจวัดได้กับค่าความจุไฟฟ้าที่ทราบค่า ทั้งสองย่านการทำงานเพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าไม่ทราบค่าที่ต้องการตรวจวัด ลำดับต่อมาผู้วิจัยได้ทำการทดสอบชุดเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นในแต่ละย่านการทำงานอีกครั้งเทียบกับเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น LCR-819 โดยได้ผลการทดสอบการทำงานทั้งสองย่านดังแสดงในรูป 6 และรูป 7 ตามลำดับ พิจารณาค่าผิดพลาดแบบเทียบค่าเต็มสเกล (Full-Scale) ทั้งสองย่านการทำงาน พบว่ามีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ $\pm 0.42\%$ และ $\pm 0.82\%$ ตามลำดับ



รูป 6 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในช่วง 1 nF ถึง 1000 nF



รูป 7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในช่วง $1 \mu\text{F}$ ถึง $1000 \mu\text{F}$

จากการทดสอบการทำงานเพิ่มเติมพบว่าสามารถตัดแปลงวงจรโดยการเพิ่มค่าความต้านทาน R_{k1} เพื่อการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่า 1 nF ได้ แต่อย่างไรก็ตามจะสามารถตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ต่ำสุดประมาณเท่ากับ 100 pF (โดยใช้ R_{k1} เท่ากับ $300 \text{ k}\Omega$) ซึ่งการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่านี้จำเป็นจะต้องใช้สัญญาณนาฬิกาที่มีค่าความถี่สูงขึ้นเพื่อทำให้ความละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้น หรือจำเป็นต้องใช้เทคนิคการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบอื่นๆ ต่อไป

สรุป

ชุดเครื่องมือตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นในงานนี้เป็นการอาศัยเทคนิคแบบการตรวจวัดค่าคงตัวของวงจร RC โดยใช้ความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S52 ในการจับเวลาการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า และการส่งผลการตรวจวัดไปแสดงผลยังจอแอลซีดี ในส่วนของการเชื่อมต่อวงจรส่วนที่เป็นแอนะล็อกเข้ากับวงจรส่วนที่เป็นดิจิทัลเป็นการต่อร่วมกันโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลต่อร่วม ซึ่งทำให้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนต่ำ ช่วงการวัดของเครื่องมือในครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วง 1 nF ถึง 1000 nF และช่วง $1 \mu\text{F}$ ถึง $1000 \mu\text{F}$ ผลจากการทดสอบการทำงานพบว่าเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้เป็นไปตามหลักการที่ได้นำเสนอ โดยมีค่าผิดพลาดแบบเทียบค่าเต็มสเกลทั้งสองช่วงเท่ากับ $\pm 0.42 \%$ และ $\pm 0.82 \%$ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นต้นสังกัดของผู้วิจัย ที่ได้ให้การส่งเสริมสนับสนุนการทำวิจัยของบุคลากรอย่างจริงจัง

เอกสารอ้างอิง

- Cheng, M.H.-M., Chiu, G.T.-C. and Franchek, M.A. (2009, June). Real-Time Measurement of Eccentric Motion with Capacitive Sensor for Hydraulic Pumps. Paper presented at the American Control Conference, 3687-3692. Retrieved April 1, 2012, from IEEE Xplore Digital Library.
- Chiang, C.-T. and Huang, Y.-C. (2006). A Semi-Cylindrical Capacitive Sensor With Interface Circuit Using for Fluidic Measuring. *IEEE Sensors Journal*, 6(6), 1564–1570.
- George, B. and Kumar, V. J. (2010). Analysis of the Switched-Capacitor Dual-Slope Capacitance-to-Digital Converter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(5), 997–1006.
- Jordana, J. and Pallàs-Areny, R. (2006). A Simple, Efficient Interface Circuit for Piezoresistive Pressure Sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 127(1), 69–73.
- Heidary, A. and Meijer, G.C.M. (2007, September). *An Integrated Switched-Capacitor Front-End for Capacitive Sensors with a Wide Dynamic Range*. Paper presented at the ESSCIRC 2007. 33rd European Solid State Circuits Conference, 404-407. Retrieved April 1, 2012, from IEEE Xplore Digital Library.
- Hruškovic, M. and Hribik, J. (2008). Digital Capacitance and Inductance Meter. *Measurement Science Review*, 8(3),3, 61-64.
- Li, X., De Jong, G.W., Meijer, G.C. M., Toth, F.N. and Van Der Goes, F.M.L. (1997). Low-Cost CMOS Interface for Capacitive Sensors and Its Application in a Capacitive Angular Encoder. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 14(3), 61-71.
- Liu, M., Zhang, G., Dong, J. and Zhao, C. (2008, August). *Interface Circuit for Capacitive Micro-accelerometer*. Paper presented at the MWSCAS 2008. 51st Midwest Symposium on Circuits and Systems, 654-657. Retrieved April 1, 2012, from IEEE Xplore Digital Library.

- Lu, T.C., Huang, Y.J. and Chou, H.P. (2008, August). *A Novel Interface Circuit for Capacitive Sensors Using Correlated Double Sampling Demodulation Technique*. Paper presented at the SENSORCOMM '08. Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 396–400. Retrieved April 1, 2012, from IEEE Xplore Digital Library.
- Majid, H. A., Razali, N., Sulaiman, M. S. and A'ain, A. K. (2009). A Capacitive Sensor Interface Circuit Based on Phase Differential Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 55, 630-633.
- Preethichandra, D.M.G. and Shida, K. (2001). A Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(6), 1583–1586.
- Rerkratn, A., Chitsakul, K., Soisup, A. and Wuti, V. (2010, August). *Electrical Capacitance Tomography System for Monitoring Process Flow in Pipe*. Paper presented at the SICE Annual Conference 2010, 3229–3232. Retrieved April 1, 2012, from IEEE Xplore Digital Library.
- Reverter, F., Li, X. and Meijer, G.C.M. (2007). Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. *Sensors and actuators, A: Physical*, 138(1), 1-8.
- Reverter, F., Li, X. and Meijer, G.C.M. (2008). A novel interface circuit for grounded capacitive sensors with feedforward-based active shielding. *Measurement Science and Technology*, 19(2), 1-5.
- Reverter, F. and Casas, Ò. (2008). Direct Interface Circuit for Capacitive Humidity Sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 143(2), 315–322.
- Yazdi, N., Mason, A., Najafi, K. and Wise, K. D. (2000). A Generic Interface Chip for Capacitive Sensors in Low-Power Multi-Parameter Microsystems. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 84(3), 351-361.