

**เซนเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าราคาถูกลงและวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ
สำหรับระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำ
อนุชา แก้วพูลสุข* และ เกียรติศักดิ์ พรหมภักดี**

Low-Cost Capacitive Sensor and Interfacing Circuit for Water Level Monitoring

Anucha Kaewpoonsuk* and Kriangsak Prompak

กลุ่มวิจัยฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

จังหวัดพิจิตร โลก 65000

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเซนเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า และวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ สำหรับการพัฒนาระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแสดงผล ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ วงจรเชื่อมต่อสัญญาณ และคอมพิวเตอร์สำหรับการแสดงผล โดยในส่วนแรกนั้นได้ใช้ขดลวดทองแดงชนิดเคลือบด้วยวาร์นิช 2 เส้นตัดแปลงเป็นเซนเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าซึ่งแปรผันตรงกับระดับน้ำที่ต้องการตรวจวัด สำหรับวงจรเชื่อมต่อสัญญาณประกอบด้วยกลุ่มวงจรย่อยสองส่วนคือ วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า และวงจรแปลงสัญญาณเพื่อการแสดงผล จากการทดสอบการทำงานพบว่าชุดเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้เป็นไปตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ช่วงระดับความลึกของน้ำที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 15 cm ค่าความผิดพลาดในการทำงานที่ตรวจวัดได้มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.7 %FS

คำสำคัญ: วงจรเชื่อมต่อสัญญาณ การตรวจวัดระดับ การตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า ระบบเฝ้าตรวจวัด

Abstract

This paper presents a low-cost capacitive sensor and an interfacing circuit for computer based water level monitoring. Overall structure consists of a sensor, an interfacing circuit, and a computer for display. Two varnish-coated copper wires are employed as the sensing parts to produce capacitance value proportional to water level being measured. Interfacing circuit consists of two sub-circuits, capacitance measurement and signal converter. Experimental results verifying the proposed equipment performance are closely agreed with the expected values. Maximum error is approximately equal to 0.7 % of full-scale, for 15 cm water level range.

Keywords: Interfacing circuit, level detection, capacitive sensing, monitoring systems

บทนำ

การเฝ้าตรวจวัดระดับของของเหลวเป็นงานหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการทางอุตสาหกรรมบางชนิดยกตัวอย่างเช่น การเฝ้าตรวจวัดปริมาณน้ำมันหรือสารเคมีภายในถัง การเฝ้าตรวจวัดปริมาณน้ำภายในหม้อต้ม หรือภายในถังพักน้ำสำรอง อุปกรณ์รับรู้หรือเซนเซอร์ (sensor) ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดระดับของของเหลวนั้นมีด้วยกันหลายแบบเช่น ลูกลอยหรือกระบวนการทางกล (Han *et al.*, 1992) เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optics) (Betta *et al.*, 1995) อัลตราโซนิก (Ultrasonic) (Lei *et al.*, 2005) และเซนเซอร์ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive sensors) (Canbolat, 2009; Reverter *et al.*, 2007) เป็นต้น สำหรับวิธีการที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำ ตัววงจรใช้พลังงานต่ำ มีความเป็นเชิงเส้นสูง และง่ายต่อการดัดแปลงให้เข้ากับสภาพการใช้งานต่างๆ การอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (Reverter *et al.*, 2007) คือ ของเหลวที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และของเหลวที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ในกรณีที่เป็นของเหลวชนิดนำไฟฟ้า แท่งอิเล็กโทรดอย่างน้อย 1 แท่งจะต้องหุ้มด้วยฉนวนเพื่อเป็นการป้องกันการลัดวงจร ทั้งนี้ตัวที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) ของตัวเก็บประจุคือฉนวนที่หุ้มอิเล็กโทรด (Electrodes) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์จะขึ้นอยู่กับระดับของของเหลวที่ท่วมแท่งอิเล็กโทรด ในกรณีที่เป็นของเหลวชนิดที่ไม่นำไฟฟ้า อิเล็กโทรดที่ใช้ไม่จำเป็นต้องหุ้มด้วยฉนวนแต่ต้องกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดแต่ละข้างให้มีค่าคงที่ โดยมีของเหลวทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุ สำหรับวงจรประมวลผลสัญญาณเพื่อการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่น่าสนใจแบ่งออกได้เป็น 4 แบบซึ่งได้แก่ แบบแรกเป็นการอาศัยการวัดค่าคงตัวเวลาของวงจร RC (RC Circuit) (Jordana and Pallás-Areny, 2006; Reverter and Casas, 2008) แบบที่สองเป็นการ

อาศัยหลักการสวิตช์คาปาซิเตอร์ (Switch capacitor) (Chiang and Huang, 2006; George, and Kumar, 2010; Heidary and Meijer, 2007; Lu *et al.*, 2008; Minjie *et al.*, 2008; Yazdi *et al.*, 2000) แบบที่สามารถเป็นการอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของตัวเก็บประจุ (Majid *et al.*, 2009; Preethichandra and Shida, 2001; Rerkratn *et al.*, 2010) โดยจะใช้วิธีการวัดค่าแอมพลิจูดหรือเฟสของสัญญาณที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัด แบบที่สี่เป็นการอาศัยเทคนิคการวัดคาบของสัญญาณที่ได้จากการนำตัวเก็บประจุที่ต้องการตรวจวัดไปต่อร่วมกับตัวกำเนิดสัญญาณ (Cheng *et al.*, 2009; Hruskovic and Hribik, 2008; Kaewpoonsuk and Rerkratn, 2011; Li *et al.*, 1997; Reverter and Meijer, 2008) ในโครงการนี้คณะผู้วิจัยได้พัฒนาเซนเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าและวงจรเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับใช้งานร่วมกันเพื่อพัฒนาเป็นระบบเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำดันแบบที่มีราคาถูก สำหรับเป็นข้อมูลและเป็นทางเลือกให้กับนักวิจัยและผู้ที่ต้องการนำหลักการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนสำหรับนิสิตนักศึกษาในระดับอุดมศึกษาได้เป็นอย่างดี

หลักการ และเทคนิคการออกแบบ

เซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำ

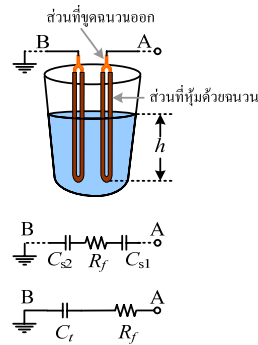
รูป 1 แสดงลักษณะของเซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการใช้เส้นลวดทองแดงที่หุ้มด้วยฉนวน 2 เส้น แต่ละเส้นงอเป็นรูปตัวยู (U) ปลายแต่ละด้านของเส้นลวดชุดฉนวนออกเพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อกับวงจรต่อไป ทั้งนี้เป็นการป้องกันการลัดวงจรของสัญญาณไฟฟ้าน้ำยาเคลือบเส้นลวดทองแดงทำหน้าที่เสมือนเป็นฉนวนของตัวเก็บประจุ C_{s1} และ C_{s2} ดังรูปวงจรเทียบเท่า (รูปกลาง) โดยมีน้ำซึ่งนำไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นแผ่นตัวนำอีกด้านหนึ่งของตัวเก็บประจุ C_{s1} และ C_{s2} ตัวต้านทาน R_f เสมือนเป็นค่าความต้านทานแฝงของน้ำ ค่าความจุไฟฟ้าของ C_{s1} และ C_{s2} จะขึ้นอยู่กับความหนาของฉนวนที่ใช้เคลือบเส้นลวด และขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่จุ่มน้ำของเส้นลวด เมื่อถือว่าความหนาของฉนวน และรัศมีของเส้นลวด รวมทั้งอุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าของ C_{s1} และ C_{s2} จะมีค่าขึ้นอยู่กับความสูงของระดับน้ำดังสมการ

$$C_{s1} = C_{s2} = 2 \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r \pi}{\ln(b/a)} h \quad (1)$$

เมื่อ ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศ, ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของเส้นลวดทองแดง, a และ b คือรัศมีภายในและภายนอกของฉนวนที่หุ้มทองแดงตามลำดับ, h คือค่าความสูงของระดับน้ำ (ความยาวของลวดทองแดงส่วนที่จุ่มน้ำเท่ากับ $2h$) โดยที่ C_f ของวงจรมีค่าเป็น

$$C_t = \frac{C_{s1}C_{s2}}{C_{s1} + C_{s2}} = \frac{2\epsilon_o\epsilon_r\pi}{\ln(b/a)}h \tag{2}$$

ที่จุด A และ B ของเซนเซอร์ จะถูกนำไปต่อเชื่อมกับวงจรหรือนำไปประกอบร่วมกับวงจรสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในรูป 2 ต่อไป



รูป 1 เซนเซอร์และวงจรเทียบเท่าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

สำหรับวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ภายในงานนี้ผู้วิจัยได้ดัดแปลงประยุกต์ใช้วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้เคยนำเสนอไว้ในเอกสาร (Kaewpoonsuk and Rerkratn, 2011) โครงสร้างของวงจรในส่วนนี้ประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม วงจรอินทิเกรต วงจรสุ่ม และคงค่าสัญญาณ และวงจรสร้างสัญญาณควบคุม โดยที่เซนเซอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นดังหัวข้อ 2.1 จะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (C_1) โดยพิจารณาว่าค่าความต้านทานแฝงของน้ำ (R_1) มีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทาน R_2 ที่ใช้ในวงจรมาก ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจะให้กำเนิดสัญญาณ Q_{os} ที่มีคาบเวลา (T_{os}) เท่ากับ

$$T_{os} = 0.693(R_1 + 2R_2)C_t \tag{3}$$

จากสมการที่ (3) ถ้ากำหนดให้ $2R_2 \gg R_1$ จะทำให้ได้สัญญาณที่มีค่าคิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ประมาณเท่ากับ 50 % และสามารถเขียนสมการ โดยประมาณได้เป็น

$$T_{os} = 0.693(2R_2)C_t \tag{4}$$

พิจารณารูปที่ 2 (ข) ซึ่งแสดงแผนภาพสัญญาณที่สำคัญของวงจรรูปที่ 2(ก) แต่ละรอบของการตรวจวัดนั้นจะใช้เวลาเท่ากับ 2 คาบของสัญญาณ Q_{os} ทั้งนี้อาศัยजेकेฟลิปฟล็อปสำหรับหารความถี่ของสัญญาณ Q_{os} เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม Q_{reset} Q_{int} และ Q_{sh} โดยที่การทำงานของวงจรจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 จังหวะการทำงานดังนี้คือ

ลำดับที่ 1: สัญญาณ Q_{reset} มีสถานะเป็นลอจิก “1” เพื่อรีเซ็ตเอาต์พุตเดิมของวงจรรีเซ็ตซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการตรวจวัดสัญญาณ

ลำดับที่ 2: สัญญาณ Q_{reset} เปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก “0” ขณะที่สัญญาณ Q_{int} มีสถานะเป็นลอจิก “1” วงจรรีเซ็ตจะทำการรีเซ็ตสัญญาณ Q_{int} กำหนดให้ความสูงของสัญญาณ Q_{int} มีค่าเท่ากับ V_H (ความกว้างของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $T_{os}/2$) โดยเมื่อสัญญาณ Q_{int} เปลี่ยนสถานะกลับเป็นลอจิก “0” จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรีเซ็ตเป็น

$$V_{o(int)} = \frac{V_H}{C_1 (R_x + r_x)} \frac{T_{os}}{2} \quad (5)$$

เมื่อ r_x คือค่าความต้านทานแฝงที่พอร์ต X ของวงจรรายพานกระแส (CCII)

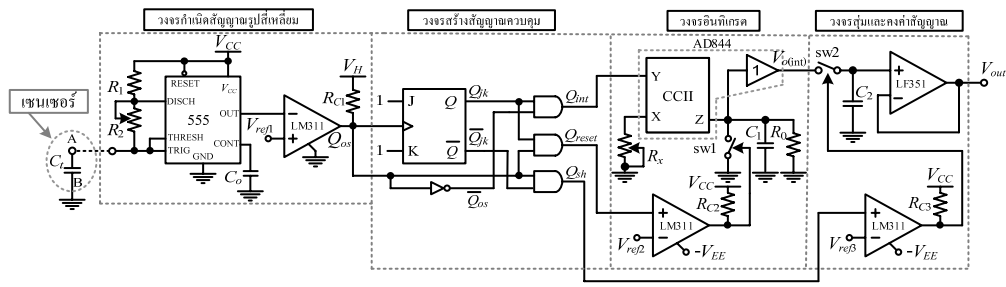
ลำดับที่ 3: สัญญาณ Q_{sh} เปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก “1” (ขณะที่สัญญาณ Q_{int} มีสถานะเป็นลอจิก “0”) วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะทำการเปิดรับและส่งผ่านขนาดของสัญญาณ $V_{o(int)}$ ไปเป็นเอาต์พุต (V_{out}) ของวงจรดังนี้คือ

$$V_{out} = V_{o(int)} = \frac{V_H}{C_1 (R_x + r_x)} \frac{T_{os}}{2} \quad (6)$$

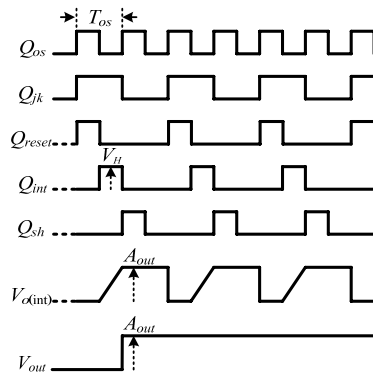
แทนค่าสมการที่ (2) และสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (6) จะได้

$$V_{out} = \frac{0.693 R_2 V_H}{C_1 (R_x + r_x)} \frac{\epsilon_o \epsilon_r \pi}{\ln(b/a)} h \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{out}) ของวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความสูงของระดับน้ำ (h)

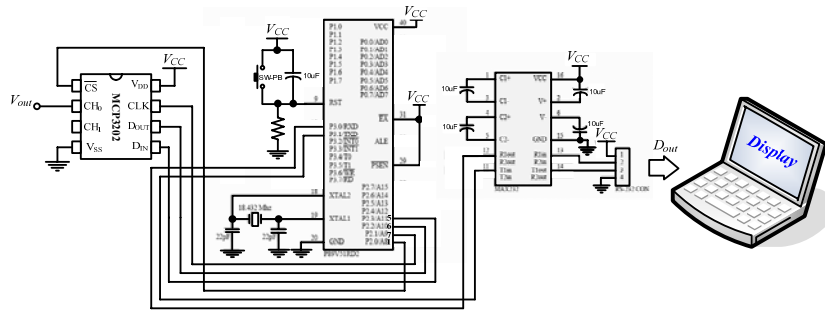


(ก) โครงสร้างวงจร



(ข) แผนภาพสัญญาณ

รูป 2 วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์



รูป 3 วงจรแปลงสัญญาณสำหรับการแสดงผล

วงจรแปลงสัญญาณสำหรับการแสดงผล

รูป 3 แสดงส่วนของวงจรแปลงสัญญาณสำหรับการส่งผ่านผลการวัดระดับน้ำไปแสดงผลยังคอมพิวเตอร์ เมื่อ V_{out} คือสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า D_{out} คือสัญญาณดิจิทัลที่ส่งผ่านพอร์ตอนุกรมให้กับคอมพิวเตอร์ โดยภายในงานนี้ได้ใช้ไอซีวงจรแปลง

สัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต เบอร์ MCP 3202 ต่อร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น AT89S52 และไอซี MAX232 สำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม

ในส่วนของโปรแกรมประมวลผลบนคอมพิวเตอร์นั้นได้ใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 พัฒนาหน้าต่างสำหรับติดต่อผู้ใช้งานและการแสดงผล โดยที่การแสดงผลจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบเส้นกราฟเปรียบเทียบกับเวลา และแบบภาพจำลองสองมิติ ดังแสดงตัวอย่างในภาพผลการทดลองรูป 6

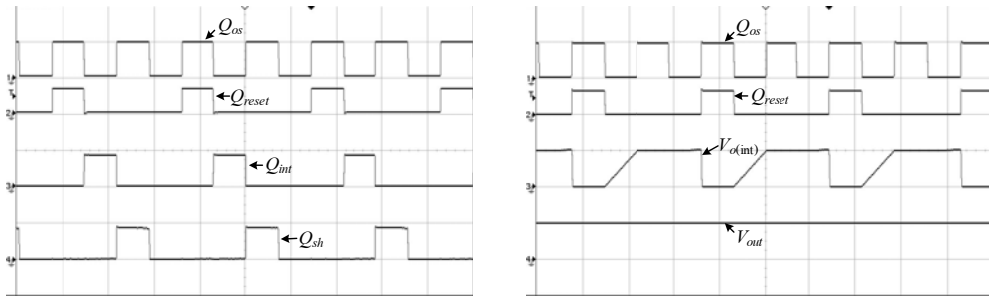
การทดสอบ ผลการทดสอบ และการวิจารณ์ผลการทำงาน

จากหลักการการทำงานของระบบที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้น ในงานนี้ได้ใช้วิธีต่อวงจรต่างๆ บนบอร์ดทดลอง กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามสมการที่ (7) เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 5 V ในขณะที่มีน้ำท่วมเซนเซอร์เต็มสเกลเท่ากับ 15 cm (คาบของสัญญาณ Q_{os} เท่ากับ 150 μs) ลำดับแรกทำการทดสอบจังหวะและความถูกต้องในการทำงานของวงจรปรับสภาพสัญญาณ ซึ่งตัวอย่างผลการตรวจวัดสัญญาณที่สำคัญของวงจร (ขณะน้ำท่วมเซนเซอร์เต็มสเกล) แสดงดังรูป 5 โดยจะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถให้แทนค่าตัวเก็บประจุ (C_f) เพื่อต่อร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (รูป 2(ก)) สำหรับการสร้างสัญญาณ Q_{os} ได้จริง และเมื่อเปรียบเทียบกับจังหวะการเกิดสัญญาณ Q_{reset} , Q_{im} , Q_{sh} , และ V_{ol} จะเห็นได้ว่าตรงกับแผนภาพสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ดังรูป 2(ข) ซึ่งจะมีผลทำให้ได้สัญญาณ V_{out} เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูป

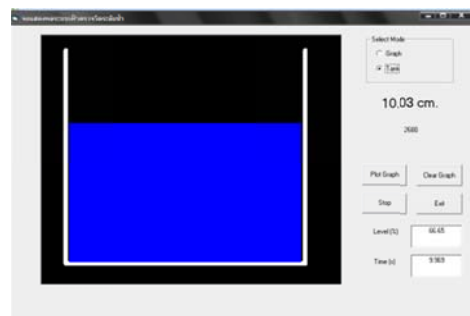
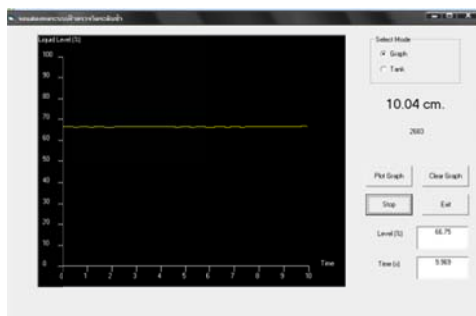
รูป 6 แสดงหน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ขณะที่น้ำท่วมเซนเซอร์เท่ากับ 10 cm โดยความสูงของเส้นกราฟที่แสดงหรือความสูงของระดับน้ำในภาพจำลองจะแปรค่าตามระดับน้ำที่ท่วมเซนเซอร์แบบเวลาจริง (real times) ลำดับต่อมาเป็นการทดลองแปรค่าความสูงของระดับน้ำที่ท่วมเซนเซอร์จากระยะ 0 cm ถึง 15 cm ความละเอียดของการแปรค่าเท่ากับ 0.5 cm โดยได้ผลการทำงานดังแสดงในรูป 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถให้ผลการวัดอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับน้ำตลอดพิสัยการวัด โดยมีค่าผิดพลาดสูงสุดเปรียบเทียบค่าเต็มสเกล (full scale errors) ต่ำกว่า 0.7 %



รูป 4 การติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำ



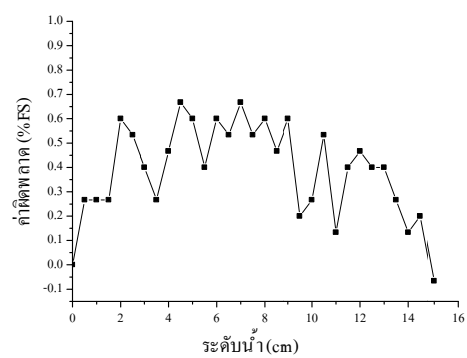
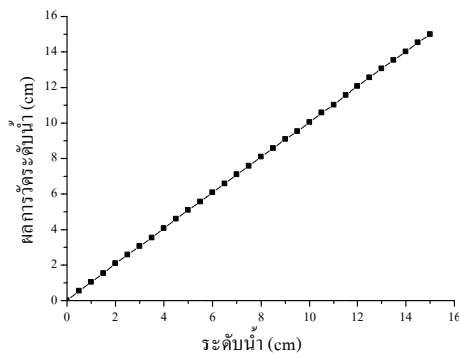
รูป 5 ตัวอย่างผลการวัดสัญญาณที่สำคัญของวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า
(สเกลแนวตั้ง: 5V/div., สเกลแนวนอน: 500 μ s/div.)



(ก) การแสดงผลแบบเส้นกราฟเทียบกับเวลา

(ข) การแสดงผลแบบภาพจำลองสองมิติ

รูป 6 หน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูป 7 ผลการตรวจวัดระดับน้ำ

สรุป

ชุดเฝ้าตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแสดงผล ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานนี้นำเสนอแนวคิดการประยุกต์ใช้เส้นลวดทองแดงชนิดเคลือบด้วยฉนวนดัดแปลงเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำแบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นการเรียนการสอนราคาถูกลำหรับนิสิตนักศึกษาที่ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบระบบเครื่องมือวัด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแนวคิดการพัฒนาออกแบบวงจรปรับสภาพสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณไฟตรงที่มีการกระเพื่อมต่ำโดยมีขนาดแปรผันตรงกับระดับน้ำ ทั้งนี้จะเป็นการลดภาระการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หลักในการแสดงผลและการติดต่อสื่อสารข้อมูล ผลการทดสอบการทำงานแสดงให้เห็นว่าชุดเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้สอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอ ผลการวัดพบว่ามีค่าผิดพลาดสูงสุดแบบเปรียบเทียบค่าเต็มสเกลตลอดย่านการวัด 15 cm ต่ำกว่า 0.7 %FS

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ. สว่างลัย เฟื่องพัด ซึ่งเป็นนักวิจัยที่ปรึกษาและผู้ให้คำแนะนำการดำเนินงาน ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ซึ่งเป็นต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนการพัฒนางานวิจัยของบุคลากรอย่างจริงจัง

เอกสารอ้างอิง

- Betta, G., Ippolito, L., Pietrosanto, A. and Scaglione, A. (1995). An Optical Fiber-Based Technique for Continuous-Level Sensing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 44(3), 686-689.
- Canbolat H. (2009). A Novel Level Measurement Technique Using Three Capacitive Sensors for Liquids. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 58(10), 3762-3768.
- Cheng, M.H.-M., Chiu, G.T.-C. and Franchek, M.A. (2009). *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 <http://ieeexplore.ieee.org>.
- 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), 564-1570.

- 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.
- Han, Y.-X., Zhou, J.-H., Kang, J.-Z. and Yiang, X.-H. (1992). *High Precision Intelligent Apparatus Driven by a Step Motor for Measuring Liquid Level*. Paper presented at the IEEE International symposium on, Xian Petroleum Institute, Xian, 710061, P.R. China, 172-176. Retrieved April 1, 2012, from <http://ieeexplore.ieee.org>.
- Heidary, A. and Meijer, G.C.M. (2007). *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, Munich, 404-407. Retrieved April 1, 2012, from <http://ieeexplore.ieee.org>, April 1, 2012)
- Hruškovic, M. and Hribik, J. (2008). Digital Capacitance and Inductance Meter. *Measurement Science Review*, 8,3(3), 61-64.
- 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.
- Kaewpoonsuk, A. and Rerkratn, A. (2011). Synthesis of Simple Interface Circuit Based on Time-Period Detection Technique for Capacitance Measurement", Paper presented at the SICE Annual Conference 2011, Waseda University, Tokyo, 2384-2387. Retrieved April 1, 2012, from <http://ieeexplore.ieee.org>.
- Lei, C., Xinmin, D., Jie, H. and Ping, Y. (2005). Development of Ultrasonic Instrument for the Sealed Container's Liquid Level Measurement. *Ultrasonics*, 56(3), 30-35.
- 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.
- Lu, T.C., Huang, Y.J. and Chou, H.P. (2008). *A Novel Interface Circuit for Capacitive Sensors Using Correlated Double Sampling Demodulation Technique*. Paper presented at the 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 396-400. Retrieved April 1, 2012, from <http://ieeexplore.ieee.org>.
- 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.

- Minjie, L., Gang, Z., Jingxin, D. and Changde, Z. (2008). *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 <http://ieeexplore.ieee.org>.
- 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). *Electrical Capacitance Tomography System for Monitoring Process Flow in Pipe*. Paper presented at the SICE Annual Conference, Taipei, 3229-3232. Retrieved April 1, 2012, from <http://ieeexplore.ieee.org>.
- 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. and Casas, Ò. (2008). Direct Interface Circuit for Capacitive Humidity Sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 143(2), 315-322.
- 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.
- 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.