

บทที่ 3

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

3.1 หลักการพื้นฐาน

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้คุณลักษณะการกระจายตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ภายในวัตถุในรูปแบบของภาพตัดขวาง 2 มิติ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การไหลหรือการกระจายตัวของ ก๊าซ/น้ำมัน ในท่อส่งน้ำมัน กระบวนการการแยก/ผสมทางเคมี เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่รบกวน หรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ มีความปลอดภัยสูง มีความเร็วในการสร้างภาพ เครื่องมือสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก มีขนาดเล็กและสะดวกกว่าเมื่อเทียบกับ MRI หรือ X-ray CT

ระบบ ECT แตกต่างจากระบบ EIT คือ ระบบ EIT ใช้แสดงภาพตัดขวางภายในวัตถุโดยอาศัยความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยการป้อนกระแสเข้าไปที่ผิวหน้าของวัตถุ แล้วใช้อิเล็กโทรดวัดศักดาไฟฟ้าโดยรอบ จากนั้นคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ภายใน ที่ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมโดยรอบนั้น ปัญหาของ EIT คืออิเล็กโทรดต้องสัมผัสโดยตรงกับตัวนำภายในวัตถุ ซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรม ที่โครงสร้างภายนอกวัตถุมีลักษณะเป็นฉนวนและยุ่งยากในการทำให้อิเล็กโทรดสัมผัสโดยตรงกับสารในวัตถุ

ระบบ ECT อาศัยการวัดความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ติดอยู่รอบๆ วัตถุที่จะวัด ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าเพอmittiviti ของสารองค์ประกอบในวัตถุนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้มาสร้างเป็นภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ แสดงถึงความแตกต่างของค่าเพอmittiviti ของวัตถุ ด้วยขั้นตอนการสร้างภาพต่างๆที่เหมาะสม ดังนั้นระบบ ECT จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่ทำการวัด วัตถุนี้อาจมีลักษณะเป็นฉนวนทางไฟฟ้าหรือมีค่าความเป็นตัวนำทางไฟฟ้าต่ำ

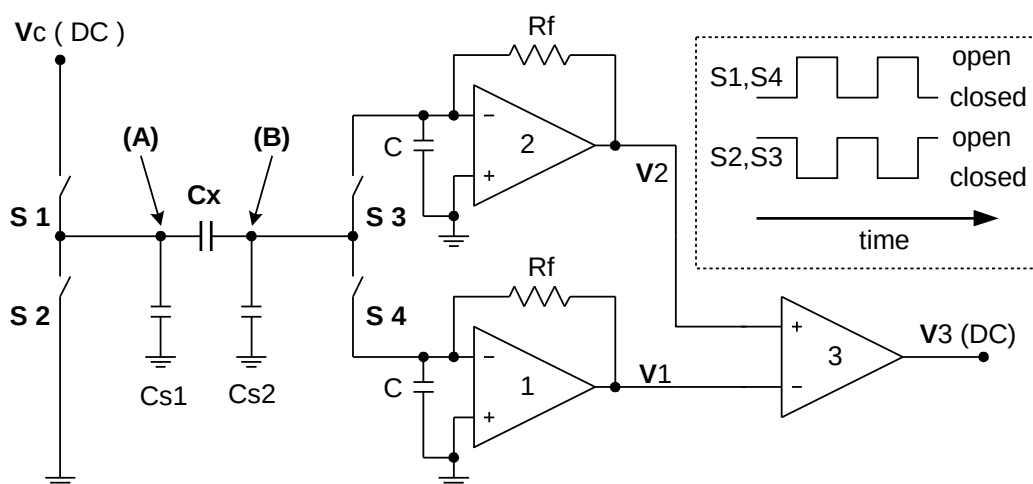
3.2 วงจรพื้นฐานที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าในระบบ ECT เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากคู่อิเล็กโทรดซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะวางอยู่ห่างกัน จึงส่งผลให้ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดมีค่าน้อย และยากต่อการวัดค่าให้มีความแม่นยำ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการนั้น เป็นค่าความแตกต่างหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวกลางที่แทรกอยู่ระหว่างคู่

อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเดิมได้มีการออกแบบวงจรที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบ ECT โดยวิธีหลักๆ 2 วิธี คือ วิธีการ ชาร์จ - ดิสชาร์จ (Charge / Discharge) [3] ประจุผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด และวิธีการป้อนสัญญาณไซน์ (AC – Based) [4] ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด

3.2.1 วงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี ชาร์จ-ดิสชาร์จ [3] นั้นจะใช้หลักการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เข้าที่ตัวเก็บประจุ ทั้งขั้วบวก และขั้วลบ สลับกันซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุอยู่ในสถานะ ชาร์จประจุ และดิสชาร์จประจุสลับกัน ส่วนแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ถูกวัด โดยในระบบ ECT นี้ ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่อยู่ในรูปของศักดาไฟฟ้า ซึ่งจากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจร ชาร์จ – ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit)

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงของสายส่งหรือสายนำสัญญาณ (Stray Capacitance) จะถูกยุบรวมกันเป็น C_{s1} และ C_{s2} การทำงานในแต่ละรอบจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงของการชาร์จ และช่วงของการดิสชาร์จ โดยที่ในขณะชาร์จ สวิตช์ S_1 และ S_4 จะปิด จุด A ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดัน และจุด B ถูกต่อเข้ากับอินพุตลบของออปแอมป์1 ขณะเดียวกันที่ S_2 และ S_3 จะเปิด ส่งผลให้กระแสชาร์จไหลจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_c (DC) ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด (C_x) ไปยังออปแอมป์1 โดยที่ประจุที่ชาร์จเข้าตัวเก็บประจุ C_x แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$Q_1 = V_c C_x \quad (3.1)$$

การชาร์จและดิสชาร์จสลับกันอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่คงที่ จึงต้องพิจารณาเรื่องของความถี่ด้วย โดยกระแสที่ชาร์จประจุ ที่ผ่านไปยัง ออปแอมป์1 จะแสดงดังสมการที่ (3.2)

$$I_1 = fQ_1 = fV_C C_X \quad (3.2)$$

ออปแอมป์1 จะทำหน้าที่แปลงกระแสชาร์จ I_1 ให้อยู่ในรูปของแรงดัน V_1 ที่เอาต์พุต ดังสมการที่ (3.3) และเมื่อคิดค่าแรงดัน Offset จะแสดงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$V_1 = -I_1 R_f = -fV_C C_X R_f \quad (3.3)$$

$$V_1 = -fV_C C_X R_f + e_1 \quad (3.4)$$

และเช่นเดียวกันในช่วงของการดิสชาร์จ สวิตช์ S2 และ S3 จะปิดโดยที่สวิตช์ S1 และ S4 จะเปิด ประจุที่เก็บอยู่ใน C_X จะถูกดิสชาร์จ เนื่องจากจุด A จะถูกต่อลงกราวด์ และจุด B จะถูกต่อเข้ากับอินพุตลบของ ออปแอมป์2 เป็นผลให้ กระแสดิสชาร์จประจุของ C_X ถูกดึงจาก ออปแอมป์2 และ ออปแอมป์2 จะแปลงกระแสนั้นเป็นแรงดัน V_2 ดังสมการที่ (3.5)

$$V_2 = fV_C C_X R_f + e_2 \quad (3.5)$$

เมื่อ e_1 และ e_2 คือ แรงดันออฟเซตของออปแอมป์ (Offset Voltage)

สำหรับ ออปแอมป์3 จะทำหน้าที่รวมสัญญาณเพื่อให้ได้ค่าศักดาไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_X ที่ถูกวัดโดยที่ออปแอมป์3 จะมีอัตราขยายเท่ากับ K และค่าศักดาไฟฟ้าเอาต์พุต V_3 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.5)

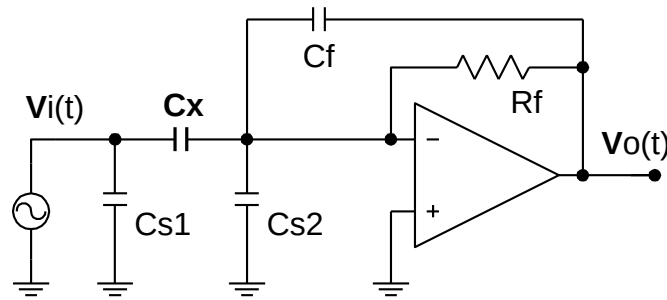
$$V_3 = K(V_2 - V_1) = 2KfV_C C_X R_f + K(e_2 - e_1) \quad (3.6)$$

ในรูปที่ 3.1 ค่าความจุไฟฟ้าแฝง C_{s1} จะถูกต่อเข้าโดยตรงกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_C (DC) หรือต่อกับกราวด์สลับไปมา โดยที่ C_{s1} นั้นไม่ได้สร้างกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่กำลังถูกวัด C_X ดังนั้น C_{s1} จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของ C_X ในขณะเดียวกัน C_{s2} จะถูกต่ออยู่กับอินพุตของออปแอมป์ทั้งสองตัวซึ่งจะเป็นกราวด์เสมือน และค่าแรงดันตกคร่อมจึงเป็น 0 จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของ C_X เช่นกัน

สำหรับความเร็วในการสวิตช์จะถูกจำกัดโดยตัว CMOS ที่ถูกเลือกมาใช้ทำสวิตช์ และตัวออปแอมป์เองก็จะมีค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) เป็นข้อจำกัด

3.2.2 วงจรเอซี-เบส (AC - Based Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี เอซี-เบส [4] นั้นจะใช้หลักการป้อนสัญญาณไซน์ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด C_x ในลักษณะเหมือนกับการ คัปปลิง (Coupling) สัญญาณ โดยสัญญาณไซน์ที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_x จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x ที่ต้องการวัด ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรเอซี - เบส (AC - Based Circuit)

จากรูปที่ 3.2 สัญญาณไซน์ $V_i(t)$ จะถูกป้อนให้กับ C_x ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดค่า จากนั้นสัญญาณที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_x จะถูกขยาย โดยออปแอมป์ และได้ $V_o(t)$ ตามสมการที่ (3.7)

$$-V_o = \frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_i \quad (3.7)$$

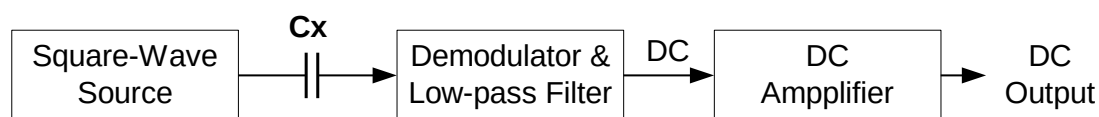
และหากเลือก R_f ที่มีค่ามากๆ $j\omega C_f R_f \gg 1$ จะทำให้ ค่า “ 1 ” ในสมการที่ (3.7) ไม่มีผลต่อค่า V_o จึงเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$-V_o = \frac{C_x}{C_f} V_i \quad (3.8)$$

$$-\frac{V_o}{V_i} = \frac{C_x}{C_f} \quad (3.9)$$

ในรูปที่ 4 สำหรับค่าความจุไฟฟ้าแฝง C_{s1} จะถูกต่อขนานอยู่กับแหล่งจ่ายสัญญาณไซน์ จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x และในขณะเดียวกัน C_{s2} ก็ถูกต่อเข้ากับอินพุตลบของออปแอมป์ ซึ่งจะเป็นกราวด์เสมือนจึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x เช่นกัน

จากวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบที่มีวิธีในการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันและสำหรับข้อดี และข้อเสีย รวมถึงผลของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นั้นแตกต่างกันอย่างไร วงจรทั้งสองแบบจึงถูกนำมาทดลองและเปรียบเทียบ [7] จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3



Charge/Discharge Block Diagrams



AC - Based Block Diagrams

รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบ ชาร์จ - ดิสชาร์จ และ เอซี - เบส

จากรูปที่ 3.1 สวิตช์ S1 และ S2 จะทำหน้าที่มอดูเลท (Modulate) สัญญาณแบบสี่เหลี่ยม (Square Wave) ไปยังตัวเก็บประจุ ที่ต้องการวัดค่า (Cx) ส่วนสวิตช์ S3 และ S4 จะทำหน้าที่เหมือน ดีมอดูเลเตอร์ (Demodulator) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) สำหรับสัญญาณที่ได้จากการชาร์จและดิสชาร์จจะถูกนำไปขยายด้วยวงจร ดีซีแอมป์ (DC-Amplifier) เพื่อให้มีขนาดเพียงพอกับความต้องการดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 รูปบน

และจากรูปที่ 3.2 นั้นเนื่องจาก C_f มีค่ามากกว่า C_x อัตราขยายของวงจร จากสมการที่ (3.9) จึงมีค่าน้อยกว่า 1 เอาต์พุตของวงจรจึงเป็นสัญญาณเอซีที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นต้องมีวงจรขยายสัญญาณเอซีเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการก่อน จากนั้นจึงจะนำสัญญาณไปดีมอดูเลท และกรองความถี่ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันดีซี ซึ่งใช้แทนค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าได้ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 รูปล่าง

ข้อแตกต่างของวงจรทั้งสองแบบคือ ตำแหน่งการวางของ ดีมอดูเลเตอร์ในแบบ ชาร์จ-ดิสชาร์जनั้น อินพุตของตัว ดีมอดูเลเตอร์จะรับสัญญาณทุกอย่าง จากตัวเก็บประจุ C_x แต่สำหรับใน เอซี-เบส นั้น สัญญาณเอซีที่รับจากตัวเก็บประจุ C_x จะถูกขยายก่อนจากนั้นจึงจะทำการดีมอดูเลท

เนื่องจากวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบนั้นได้ใช้วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลที่ได้จากวงจรทั้งสองแบบจึงมีทั้งข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ และวงจรเอซี-เบส โดย [7]

	วงจรชาร์จ - ดิสชาร์จ	วงจรเอซี-เบส
คุณสมบัติ	(1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง (stay-immune) (2) สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าละเอียดได้ที่ขนาด 0.3 fF [1] (3) ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (4) ความถี่ที่ใช้ในการชาร์จ-ดิสชาร์จ สูงถึง 2.5 MHz	(1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง (2) สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าละเอียดได้ที่ขนาด 0.4 fF [16] (3) ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์ หรือ การมอดูเลตด้วยการเปลี่ยนแปลงเฟส PSD(phase sensitive demodulator) หรือ ค่าการเก็บประจุ และ/หรือ ค่าความนำ (4) ความถี่ที่ใช้กระตุ้นสามารถสูงได้ถึง 1 MHz
ข้อดี	(1) ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่ำ	(1) มีจุดทำงาน (drift) ต่ำเนื่องจากใช้วงจรขยายแบบเอซี แทนวงจรขยายแบบดีซี (2) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีค่าสูง
ข้อเสีย	(1) ประจุที่เกิดจากช่วงการชาร์จของสวิตช์ซิมอส (2) เนื่องจากการใช้วงจรขยายแบบดีซี (ดูรูปที่ 3.3) ทำให้ได้รับค่าที่เกิดจากการเลื่อน (drift problem) (3) ผลกระทบจากการสูญเสียสภาพการนำ	(1) มีความยุ่งยากและมีราคาสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่ความถี่สูง

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในตารางที่ 3.1 วงจรแบบ เอซี-เบส จะมีข้อดีมากกว่าวงจรแบบ ชาร์จ-ดิสชาร์จ และขณะเดียวกันทางด้านคุณสมบัติของวงจรแบบเอซี-เบส ก็ไม่ด้อยกว่าส่วนในเรื่องข้อเสียของวงจรแบบเอซี-เบส นั้นจะมีความซับซ้อนยุ่งยากและราคาที่สูงกว่าวงจรแบบชาร์จ-ดิสชาร์จ แต่ถึงอย่างไรในระบบ ECT ก็ยังมีต้นทุนที่ต่ำและความซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าระบบสร้างภาพตัดขวางแบบอื่นๆ

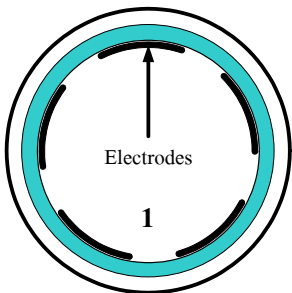
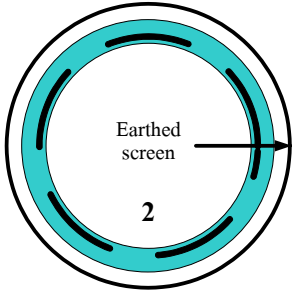
จากการศึกษาวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้ถูกนำมาใช้กับระบบ ECT และได้เปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรทั้งสองแบบ ดังนั้นการทดลองในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบ เอซี-เบส และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบ สร้างระบบจึงได้ตัดวงจรบางส่วนที่ไม่มีผลมากนักต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยใช้วงจร เอซี-เบส และเอซี-แอมป์เพียงชุดเดียว ซึ่งเดิม [7] ได้ใช้วงจร เอซี-เบส และ เอซี-แอมป์ หนึ่งชุดต่ออิเล็กโทรดหนึ่งตัว

3.3 รูปแบบการวางอิเล็กโทรดในระบบ ECT

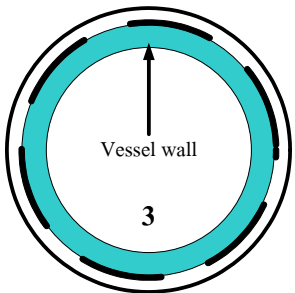
ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในระบบ ECT จะอยู่ในรูปแบบที่ 3 เนื่องจากความง่ายต่อการสร้าง และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่นำมาตรวจสอบ ดังนั้นอิเล็กโทรด จะไม่ถูกกัดกร่อนในกรณีที่วัตถุภายในเซ็นเซอร์มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนและที่สำคัญไม่มีผลกระทบต่อวัตถุหรือรบกวนต่อการไหลของระบบ ซึ่งได้อธิบายข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

1. ติดอยู่ด้านในของท่อ (Internal electrodes)
2. ฝังอยู่ภายในของท่อ (Embedded electrodes)
3. ติดอยู่ด้านนอกของท่อ (External electrode)

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของการติดอิเล็กโทรดแต่ละลักษณะ

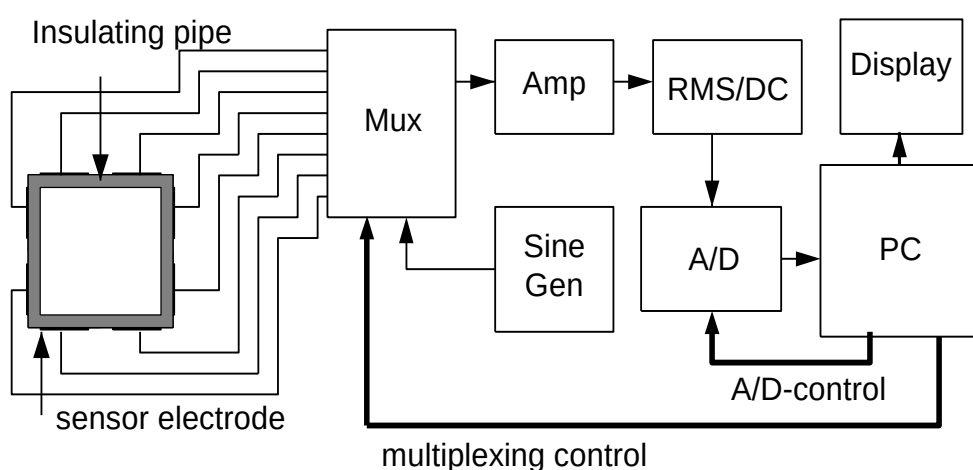
ลักษณะอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
	- วัสดุที่ใช้ทำท่อไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าสูง - วัสดุที่ใช้ทำท่อสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้า	- อิเล็กโทรดอาจถูกกัดกร่อน - รบกวนการไหลของระบบ - ยากต่อการสร้าง
	- ไม่รบกวนการไหลของระบบ - อิเล็กโทรดมีความแข็งแรง - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย)	- วัสดุที่ใช้ทำท่อมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า - ยากต่อการสร้าง

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ลักษณะอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
	- ไม่รบกวนการไหลของระบบ - ง่ายต่อการสร้าง - ราคาถูก - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย)	- ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

3.4 โครงสร้างของระบบ ECT

ระบบ ECT พื้นฐานจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับส่วนที่จะวัด (Primary sensor) ซึ่งประกอบไปด้วย อิเล็กโทรดและส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า Earth screen อิเล็กโทรดของระบบ ECT โดยส่วนใหญ่จะถูกติดตั้งด้านนอกของส่วนที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ใช้วัดค่าสัญญาณไฟฟ้าและ แปลงค่าเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แล้วจึงแปลงเป็นค่าความจุไฟฟ้า ส่วนที่สาม คือ ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างภาพกลับซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Image reconstruction computer) โดยโครงสร้างระบบทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



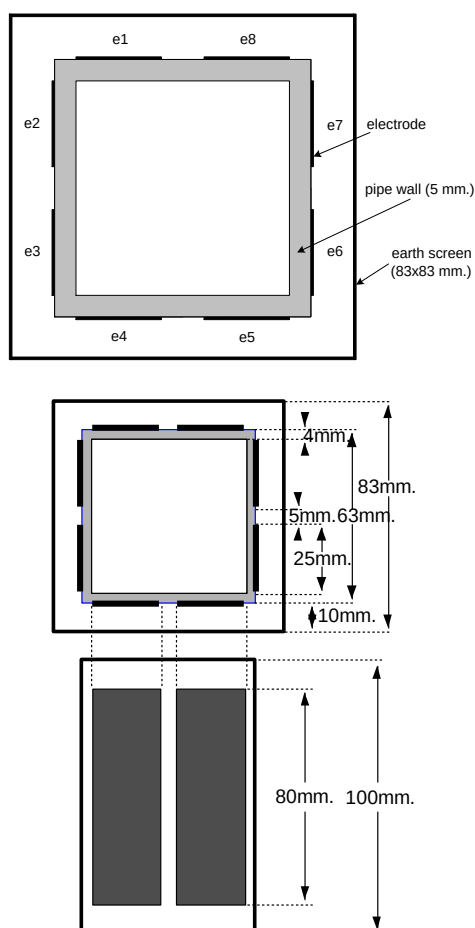
รูปที่ 3.4 โครงสร้างระบบ ECT

3.5 ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทดลองในระบบ ECT นี้จะมี 2 แบบด้วยกันคือ แบบทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ แบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม ซึ่งทั้งสองแบบนี้จะมีลักษณะของการติดอิเล็กโทรดตามโครงสร้างดังในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.7

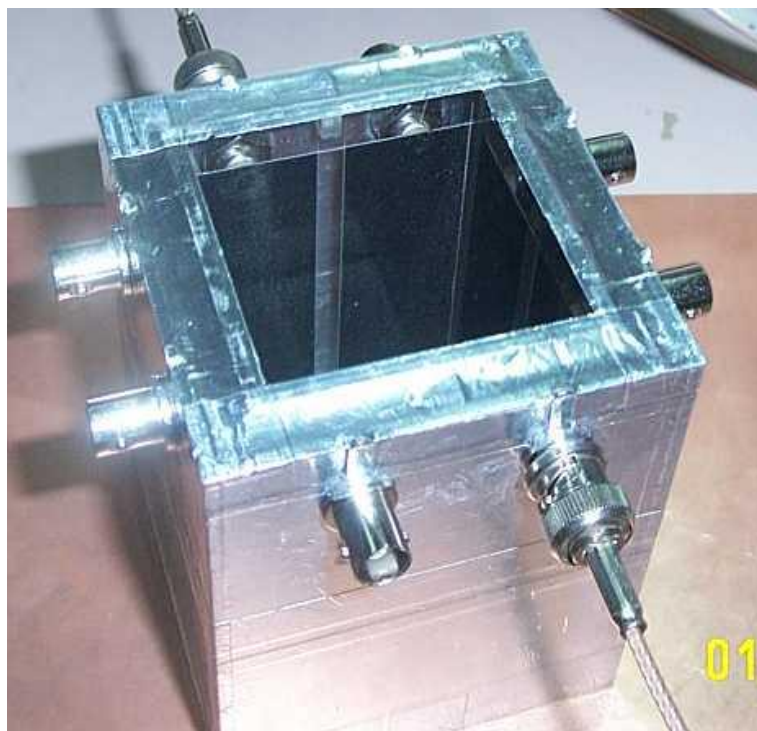
3.5.1 เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

โครงสร้างของเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกออกแบบให้มีขนาดตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นทองแดงจำนวน 8 อิเล็กโทรด (e1-e8) ขนาดความกว้าง 25 มม. และมีความยาว 80 มม. โดยอิเล็กโทรดแต่ละตัวจะวางห่างกัน 5 มม. และวางอยู่ติดกับส่วนนอกของกรอบด้านใน (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 5 มม. กรอบด้านนอก (Earth screen) ทำจากอะลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์โดยมีขนาด 83 x 83 มม. ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด

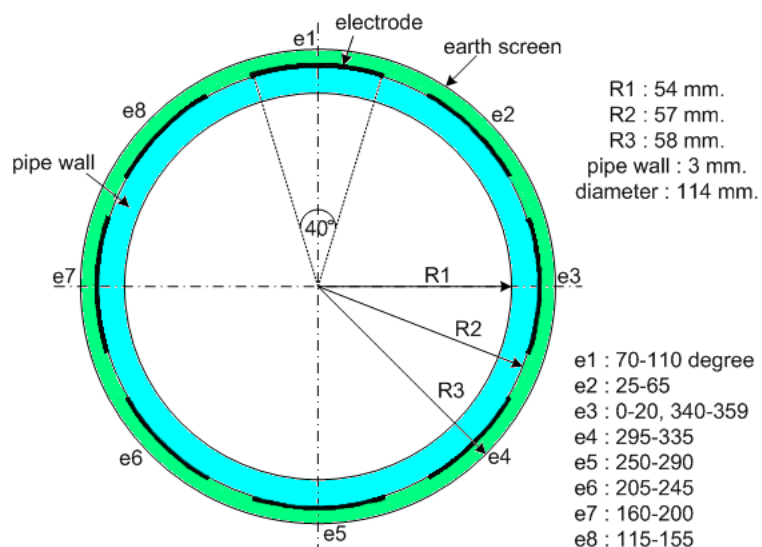
กรอบด้านในทำมาจากแผ่นอะครีลิก (Acrylic plate) โดยมีค่าเพอมีตติวิตีเท่ากับ 3 ในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอกถูกบรรจุอากาศ ซึ่งมีค่าเพอมีตติวิตีเท่ากับ 1 ค่าเพอมีตติวิตีของส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้จะถูกกำหนดลงในส่วนของการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า เพื่อสร้างเซนซิติวิตีของระบบ ECT สำหรับตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง

3.5.2 เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดวงกลม

โครงสร้างของเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละอิเล็กโทรดจะทำมุมกับจุดศูนย์กลางเท่ากับ 40 องศา และวางติดอยู่กับส่วนนอกของกรอบด้านใน (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 3 มม. ตำแหน่งของส่วนต่างๆ แสดงไว้ดังรูป ขนาดของรัศมี R1 เท่ากับ 54 มม. ขนาดของ R2 เท่ากับ 57 มม. และขนาดของ R3 เท่ากับ 58 มม. กรอบด้านนอก (Earth screen) ทำจากอะลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์ ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบตามเข็มนาฬิกากรอบด้านในทำมาจากวัสดุ PVC (Polyvinyl chloride) โดยมีค่าเพอมีตติวิตีเท่ากับ 2.7 และในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอกจะถูกกั้นด้วยอะครีลิก ซึ่งมีค่าเพอมีตติวิตีเท่ากับ 3 สำหรับตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด

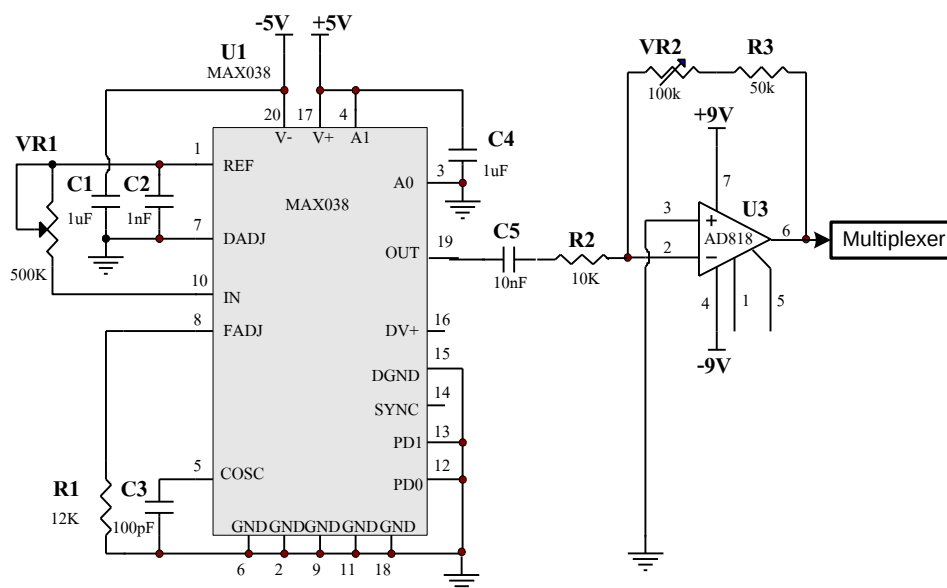


รูปที่ 3.8 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลอง

3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์(Sine Wave Generator)

วงจรในรูปที่ 3.9 จะใช้ไอซี MAX 308 ในการกำเนิดความถี่ ไอซี MAX 038 เป็นไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Waveform Generator) โดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในรูปแบบสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth Wave)

สัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) การกำหนดชนิดของสัญญาณสามารถกำหนดได้โดยขา A0 (ขา3) และ ขา A1 (ขา4) ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.9 วงจรไซน์เวฟเจนเนอเรเตอร์โดยใช้ไอซี MAX038

ตารางที่3.3 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี MAX 038

A0	A1	ชนิดของสัญญาณ
X	1	สัญญาณไซน์
0	0	สัญญาณสี่เหลี่ยม
1	0	สัญญาณสามเหลี่ยม

ไอซี MAX 038 สามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 0.1 Hz ถึง 20 MHz สำหรับวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.9 ค่าความถี่ของวงจรจะถูกควบคุมโดย VR₁ และ C₃ โดยความถี่เอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.10) ในระบบนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณ ไซน์ความถี่ 1 MHz และสัญญาณที่ได้จะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นประมาณ 13Vp-p โดย AD818 (U3) ก่อนส่งเข้าออสilloscope โดยผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์

$$f_o = \frac{V_{in}}{(R_{in} \times C_f)} \quad (3.10)$$

จากวงจรในรูปที่ 3.9 $C_f = C_3$, $V_{in} = 5\text{ V}$, $R_{in} = VR_1$ ต้องการความถี่เอาต์พุต 1 MHz ดังนั้น จากสมการที่ (3.10) จะได้

$$1 \times 10^6 = \frac{5}{VR_1 \times C_3} \quad (3.11)$$

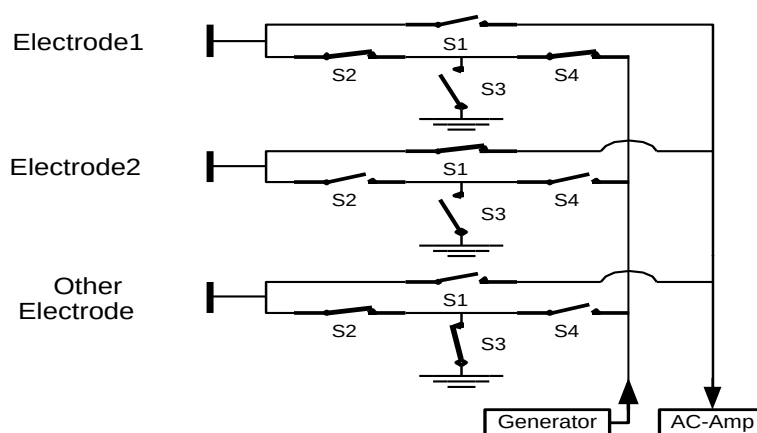
$$VR_1 \times C_3 = \frac{5}{1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-6} \quad (3.12)$$

แต่เนื่องจากค่าตัวชี้ท (Datasheet) กำหนด VR_1 ควรอยู่ในช่วง $12.5\text{ k}\Omega$ - $500\text{ k}\Omega$ $\therefore$ ที่ความถี่ที่ต้องการจะกำหนดให้ VR_1 มีค่า $50\text{ k}\Omega$ $\therefore$ หาค่า C_3 ได้ดังสมการที่ (3.13)

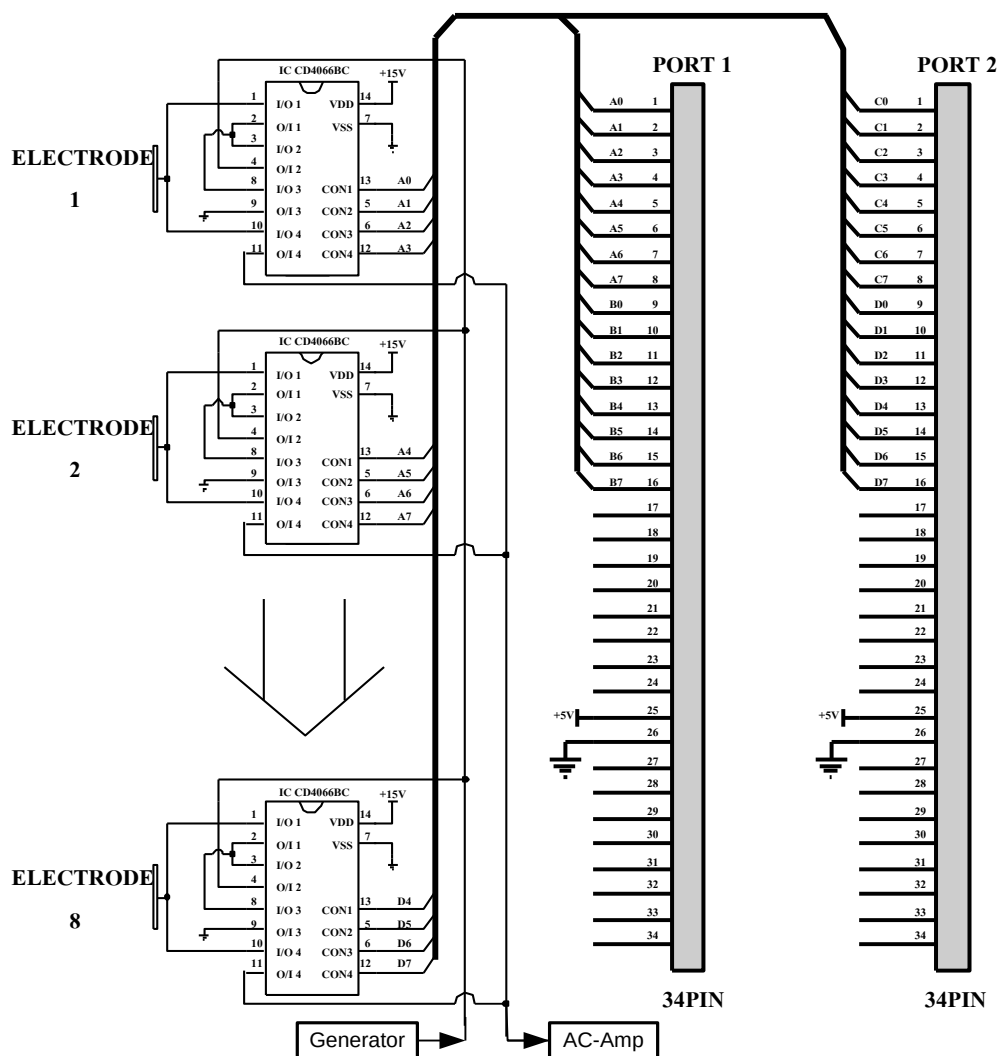
$$C_3 = \frac{5 \times 10^{-6}}{50 \times 10^3} = 100 \times 10^{-12} = 100\text{ pF} \quad (3.13)$$

3.7 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer)

วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์จะใช้ไอซี CD4066BC เป็นไอซีชิมอสที่ภายในจะประกอบด้วย สวิตช์ 4 ตัวซึ่งจะถูกต่อไว้ดังรูปที่ 3.10 เพื่อทำหน้าที่สวิตช์เลือก อิเล็กโทรดตัวส่ง (Tx) และ อิเล็กโทรดตัวรับ (Rx) ที่จะทำการวัด และ เนื่องจากสวิตช์มีจำนวนมาก อีกทั้ง เพื่อให้วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ทำงานสัมพันธ์กันกับการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าจากวงจรอนุล็อก/ดิจิตอล จึงต้องอาศัย การ์ด 8255 มาช่วยควบคุมการทำงานซึ่งจะต่อที่ I/O Port1 และ Port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และสถานะสวิตช์จะถูกกำหนดไว้ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.10 รูปแบบการต่อสวิตช์ในวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์



รูปที่ 3.11 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer)

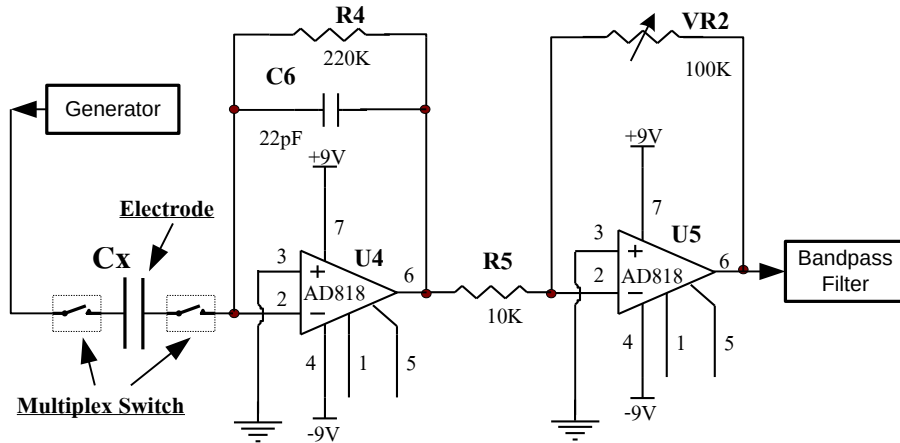
ตารางที่ 3.4 สถานะสวิทช์

Electrode	S1	S2	S3	S4
Tx	Off	On	Off	On
Rx	On	Off	Off	Off
Other	Off	On	On	Off

3.8 วงจรขยายสัญญาณ (AC-Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณ จะรับสัญญาณขาเข้าที่ผ่านคู่อิเล็กโทรดที่ถูกเลือกโดยวงจรมัลติเพล็กซ์ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด (C_x) มีค่าน้อยมาก อยู่ในช่วง $0.1\text{pf} - 3\text{pf}$ สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของ U4 จึงมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มวงจรขยาย U5 และเนื่องจากสัญญาณก่อนขยายมี

ขนาดเล็กใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยาย U5 จึงมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่มาก ดังนั้นสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปกรองโดยวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ เมื่อกำหนดให้ C_x (Electrode Capacitance) เป็นอินพุตของวงจร และไม่คิดผลของวงจรมีดติเฟล็ก อัตราขยายของ U4 (Gain) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ C_x , C_6 และอัตราขยาย U5 คือ $-V_o/V_i = VR_2 / R_5$



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณ (AC Amplifier)

อัตราขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ C_x เป็นอินพุตของวงจรสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$-V_i(j\omega C_x) - \frac{V_o \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_6} \right)}{\frac{R_4}{j\omega C_6}} = 0 \quad (3.14)$$

$$-V_i(j\omega C_x) - V_o(j\omega C_6 R_4 + 1) \frac{1}{R_4} = 0 \quad (3.15)$$

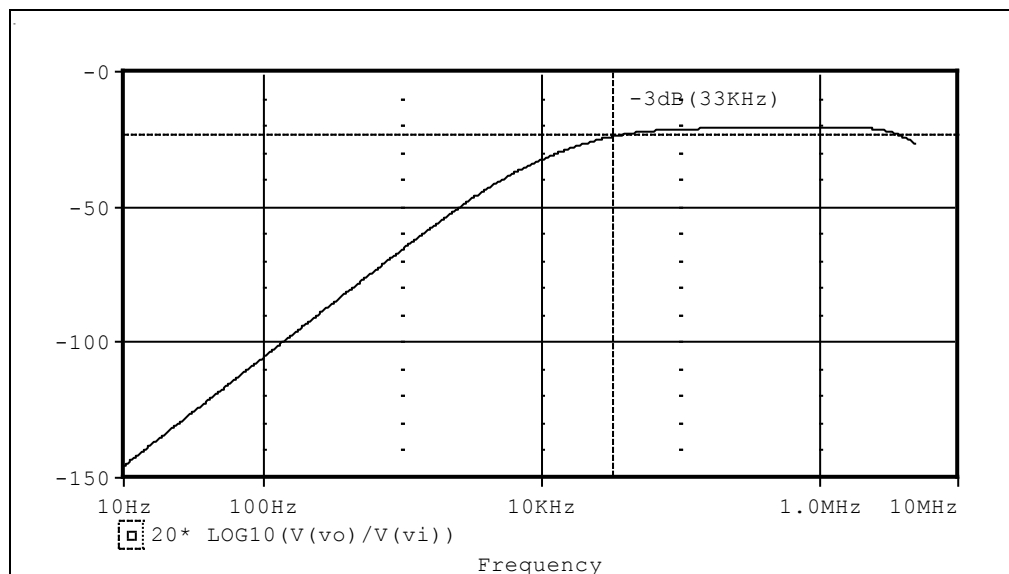
$$-V_o \left(j\omega C_6 + \frac{1}{R_4} \right) = V_i(j\omega C_x) \quad (3.16)$$

$$-\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega C_x}{j\omega C_6 + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_4 j\omega C_x}{R_4 j\omega C_6 + 1} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.17) เมื่อ $R_4 \gg 1/(j\omega C_6)$ จะได้อัตราขยายตามสมการที่ (3.18)

$$-\frac{V_o}{V_i} \cong \frac{C_x}{C_6} \quad (3.18)$$

จุดตัดความถี่ของวงจร (cut off frequency) สามารถหาได้ จากสมการที่ (3.17) ซึ่งจะได้
ค่า $\omega = 1/(C_6 R_4)$ หรือจะได้ $f_c = 1/(2\pi C_6 R_4)$

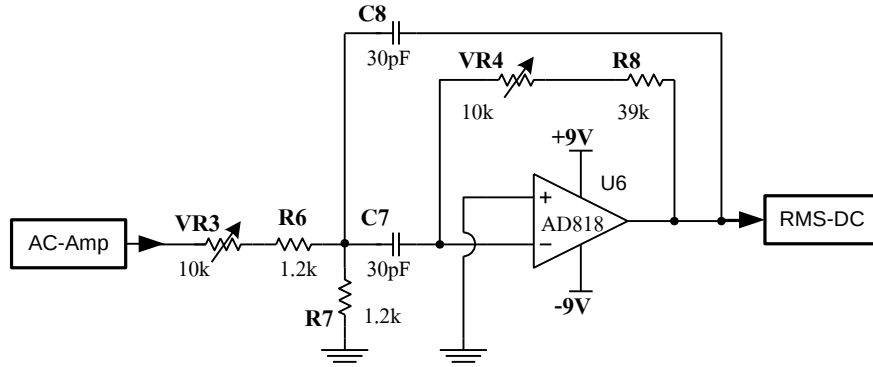


รูปที่ 3.13 แสดงจุดตัดความถี่ของวงจรขยาย U4 และความถี่ที่ใช้งาน

สำหรับกราฟในรูปที่ 3.13 เป็น กราฟที่ได้จากการ ซิมูเลท (Simulate) โดยโปรแกรม PSpice ซึ่งแสดงให้เห็นการตอบสนองความถี่ ของวงจรขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ $C_x = 2\text{pf}$ ความถี่ที่ใช้ในระบบนี้คือ 1 MHz จากกราฟจะเห็นว่าความถี่ 1 MHz จะอยู่สูงกว่าจุดตัดความถี่ของวงจร ซึ่งในวงจรนี้จะมีจุดตัดที่ประมาณ 33 KHz หรือ $\omega = 1/(C_6 R_4)$

3.9 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ (Multiple Feedback Bandpass Filter)

สัญญาณที่ผ่านการขยายยังมีขนาดเล็ก และมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยค่อนข้างมาก วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ [8,9] จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนทิ้งโดยให้ผ่านเฉพาะสัญญาณไซน์ ความถี่ 1 MHz ซึ่งซิมูเลทโดย PSpice ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.15 และเงื่อนไขที่ต้องการของวงจร ในรูปที่ 3.14 คือ จะเลือกค่า $Q = 4$ อัตราขยายประมาณ 16 เท่า ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 3.14 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์แบบมัลติฟีดแบค (Multiple Feedback Bandpass Filter)

เมื่อกำหนดให้ $C_7 = C_8 = C = 30\text{ pF}$; $Q = 4$; $A = 16$; $f_0 = 1\text{ MHz}$

$R_i = VR_3 + R_6$; $R_2 = R_7$; และ $R_f = VR_4 + R_8$

$$Q = \frac{f_0}{f_h - f_l} \quad (3.19)$$

$$R_i = \frac{Q}{A \cdot 2\pi f_0 C} \quad (3.20)$$

$$R_7 = \frac{Q}{(2Q^2 - A)2\pi f_0 C} \quad (3.21)$$

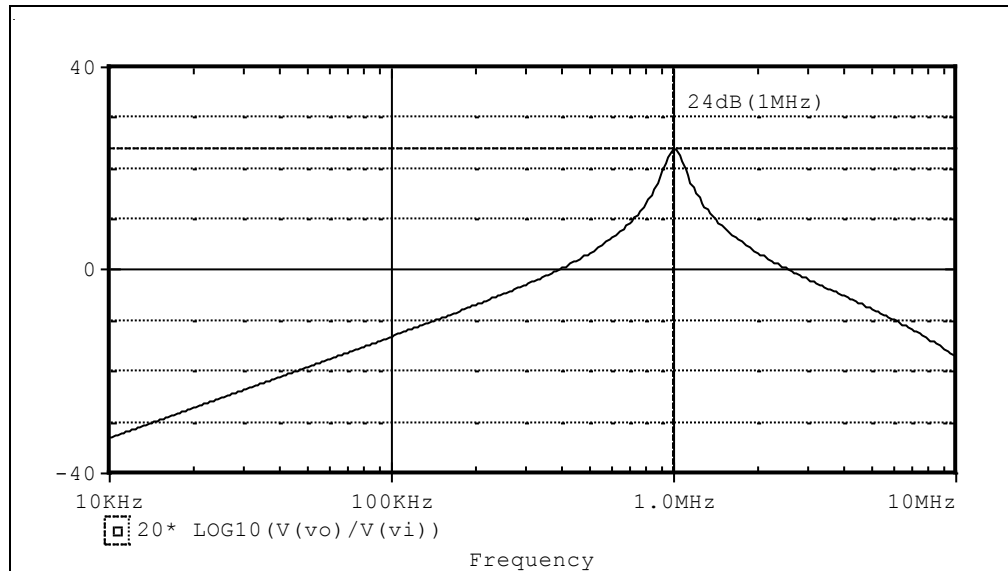
$$R_f = \frac{Q}{\pi f_0 C} \quad (3.22)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนดและสมการที่ (3.20), (3.21), (3.22) จะสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทานในวงจรได้ดังสมการที่ (3.23), (3.24) และ (3.25) คือ

$$R_i = \frac{4}{16 \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326\text{ k}\Omega \quad (3.23)$$

$$R_7 = \frac{4}{(2 \times 4^2 - 16) \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326\text{ k}\Omega \quad (3.24)$$

$$R_f = \frac{4}{\pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 42.441 k\Omega \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.15 การตอบสนองความถี่ของวงจรแบบพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.14

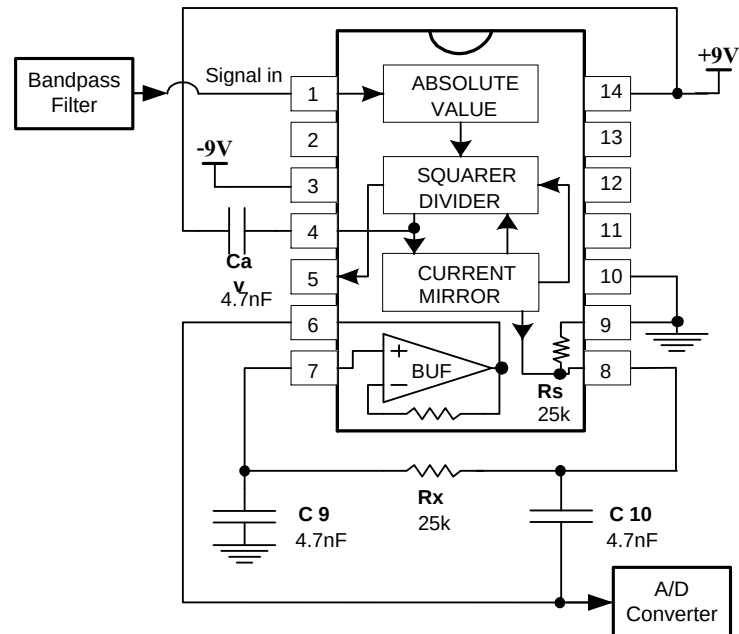
3.10 วงจรแปลงแรงดันเอซี เป็นแรงดันดีซี (RMS to DC Converter)

วงจรอาร์เอ็มเอส- ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.16 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไซน์ ความถี่ 1 Mhz ที่รับมาจากวงจรแบบพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.14 ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟ ดีซี (DC) ซึ่งขนาดของแรงดัน ดีซี ที่ได้จะมีค่าเทียบเท่ากับโวลท์อาร์เอ็มเอส (Volt RMS) ของสัญญาณอินพุต (Vin) จากนั้นนำระดับสัญญาณ ดีซี ที่ได้ไปเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิทัลและนำข้อมูลส่งต่อไปเก็บยังเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทาง พอร์ต I/O โดยอยู่ในรูปของเท็กซ์ไฟล์ก่อนจะนำไปสร้างภาพกลับ

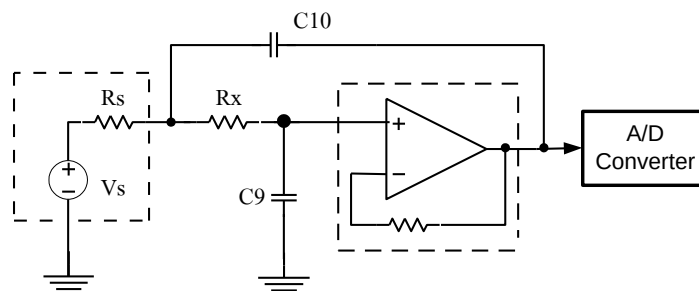
จากค่าตัวชี้ท และวงจรฟิลเตอร์ [8,9] จะสามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในรูปที่ 3.17 ได้จากสมการที่ (3.26) ในส่วนเอาต์พุต ของวงจรเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับสอง (Second-Order Low Pass Filter) ซึ่งจะได้ ค่าความชัน (Slope) -40 dB/decade และจุดตัดความถี่จะถูกกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความเร็วของการสวิตช์เลือกอิเล็กทรอนิกส์ของวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ในการทดลองจากการอ่านค่าข้อมูล 28 ค่า (28 Conversion) เวลาที่ใช้ในการแปลงรวมกับเวลาการอ่านค่าในแต่ละค่าจะใช้เวลาประมาณ 1.2ms ดังนั้นความถี่ในการอ่านค่าคือ $1 / 1.2ms = 833Hz$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{R_s \times R_x \times C_9 \times C_{10}}} \quad (3.26)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{25 \times 10^3 \times 25 \times 10^3 \times 4.7 \times 10^{-9} \times 4.7 \times 10^{-9}}} = 1.354 \text{ kHz} \quad (3.27)$$



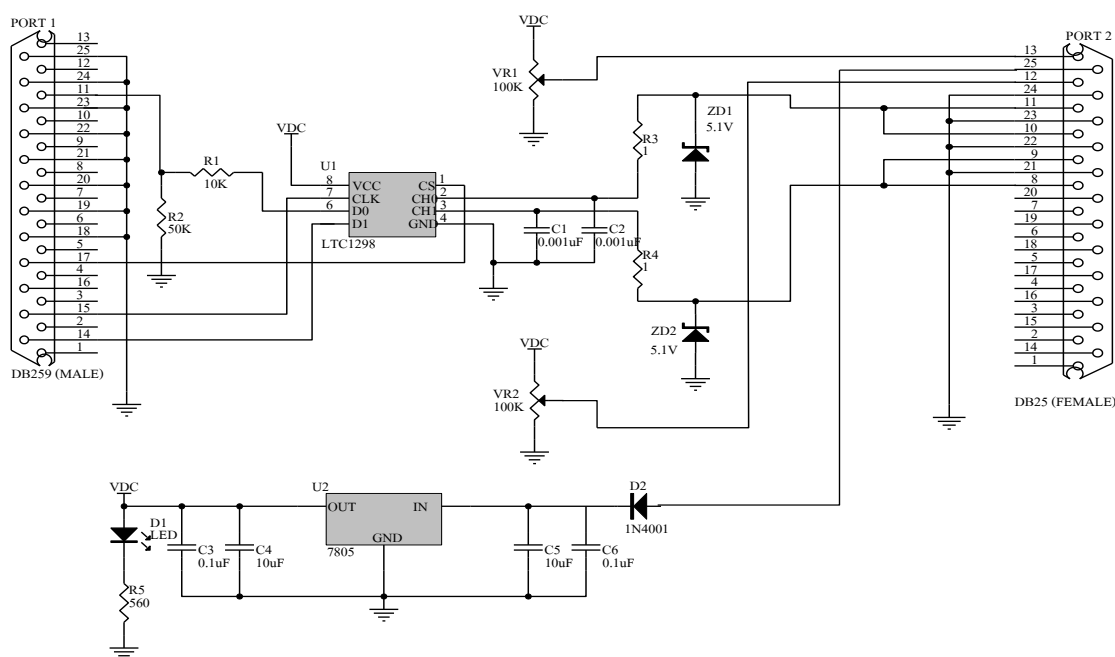
รูปที่ 3.16 วงจรแปลง อาร์เอ็มเอส เป็น แรงดันไฟตรง (RMS to DC Converter)



รูปที่ 3.17 เอาท์พุทของวงจรในรูปที่ 3.16 เมื่อวัดใหม่

3.11 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A to D Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะใช้บอร์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจรดังรูปที่ 3.18 และตารางที่ 3.5



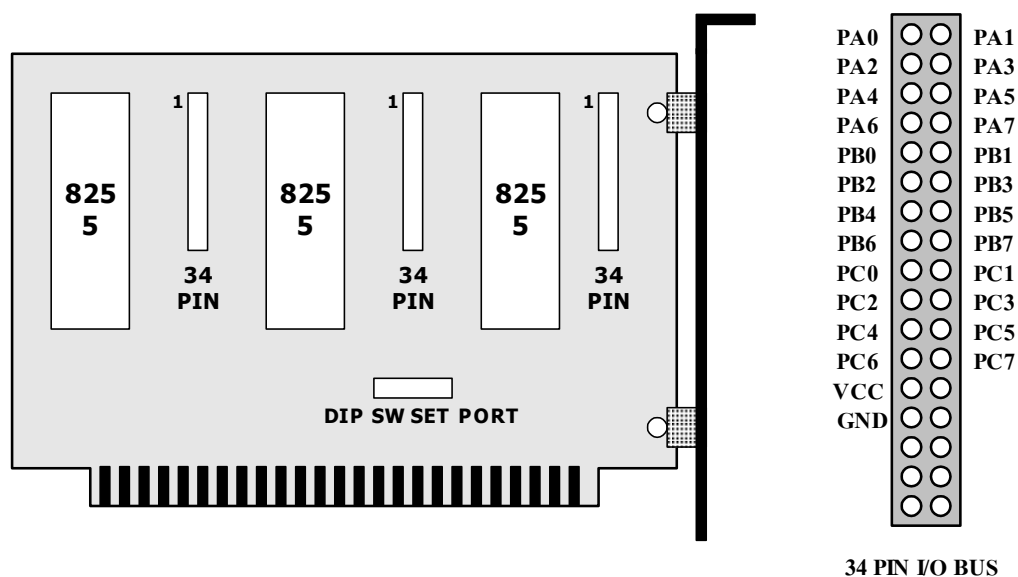
รูปที่ 3.18 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

CONVERSION TIME	60 μ s
SAMPLING RATE	11.1 KHz
INPUT CHANNEL	2 CHANNEL
GAIN ERROR	+/- 2 LSB
ANALOG INPUT RANGE	-0.05 V TO +5.05 V
+VCC SUPPLY	+9 VDC

3.12 การ์ดอินเตอร์เฟซ 8255 (ET-8255 Interface Card)

การ์ดอินเตอร์เฟซ 8255 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุตพอร์ตและเอาต์พุตพอร์ตเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเตอร์เฟซนี้จะมีพอร์ตให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ต หรือ 72 บิต (1 พอร์ตมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 3.19 และตารางที่ 3.6



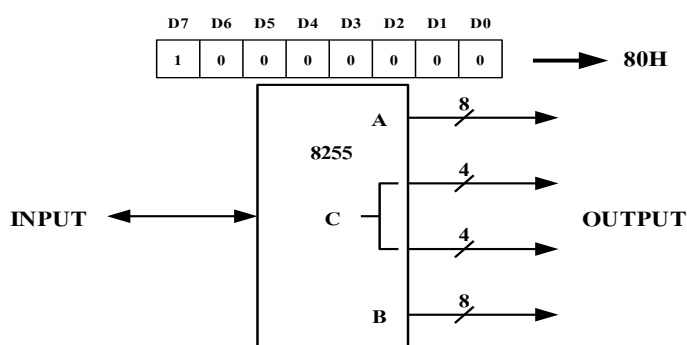
รูปที่ 3.19 ลักษณะของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

สำหรับรูปที่ 3.21 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ทและเอาต์พุตพอร์ท และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ท คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และดิพสวิทช์

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

คุณสมบัติของของบอร์ด ET-8255	
INPUT LOGIC LOW	MIN = -0.5 VOLTS , MAX = 0.8 VOLTS
INPUT LOGIC HIGH	MIN = 2.0 VOLTS , MAX = 5 VOLTS
OUTPUT LOW VOLTAGE PORTS (I-SINK = 1.7 mA)	0.45 VOLTS
OUTPUT HIGH VOLTAGE PORTS (I-SOURCE = 200 uA)	2.4 VOLTS
POWER CONSUMPTION	300 mA
DECODE PORT	8 POSITION DIP SW.
PORT	3 (8255 I/O PORT 3 X 8 BIT)

ในส่วนในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ต โดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 เราจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ตทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ตหรือเอาต์พุตพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุตพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด (Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

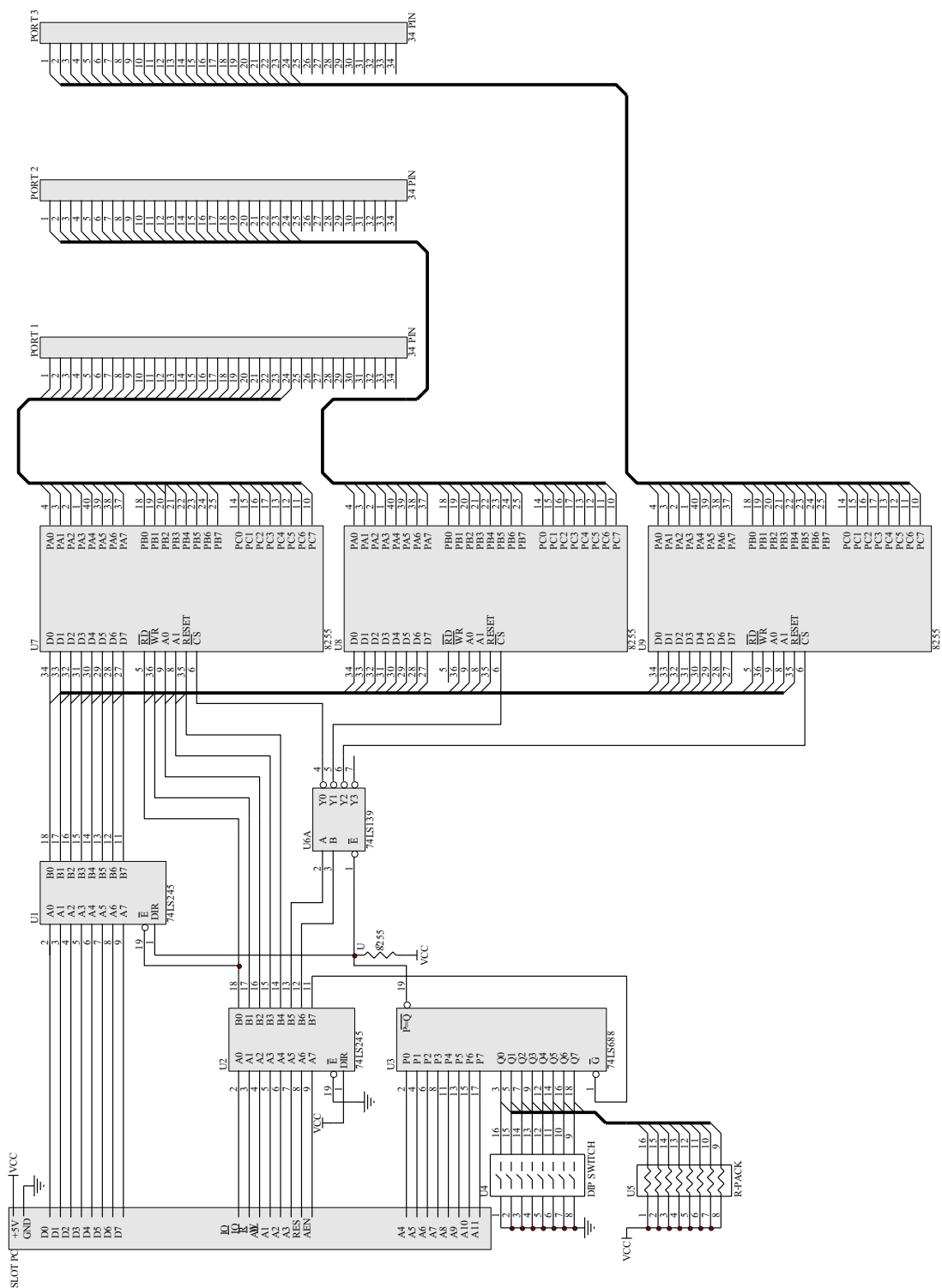
ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรส สามารถแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255

ตารางการใช้พอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของการ์ด ET-8255	
หมายเลขพอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	การใช้งานพอร์ตของการ์ด ET-8255
300H	PORT A 8255#1
301H	PORT B 8255#1
302H	PORT C 8255#1
303H	CONTROL PORT 8255#1
304H	PORT A 8255#2
305H	PORT B 8255#2
306H	PORT C 8255#2
307H	CONTROL PORT 8255#2
308H	PORT A 8255#3
309H	PORT B 8255#3

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255

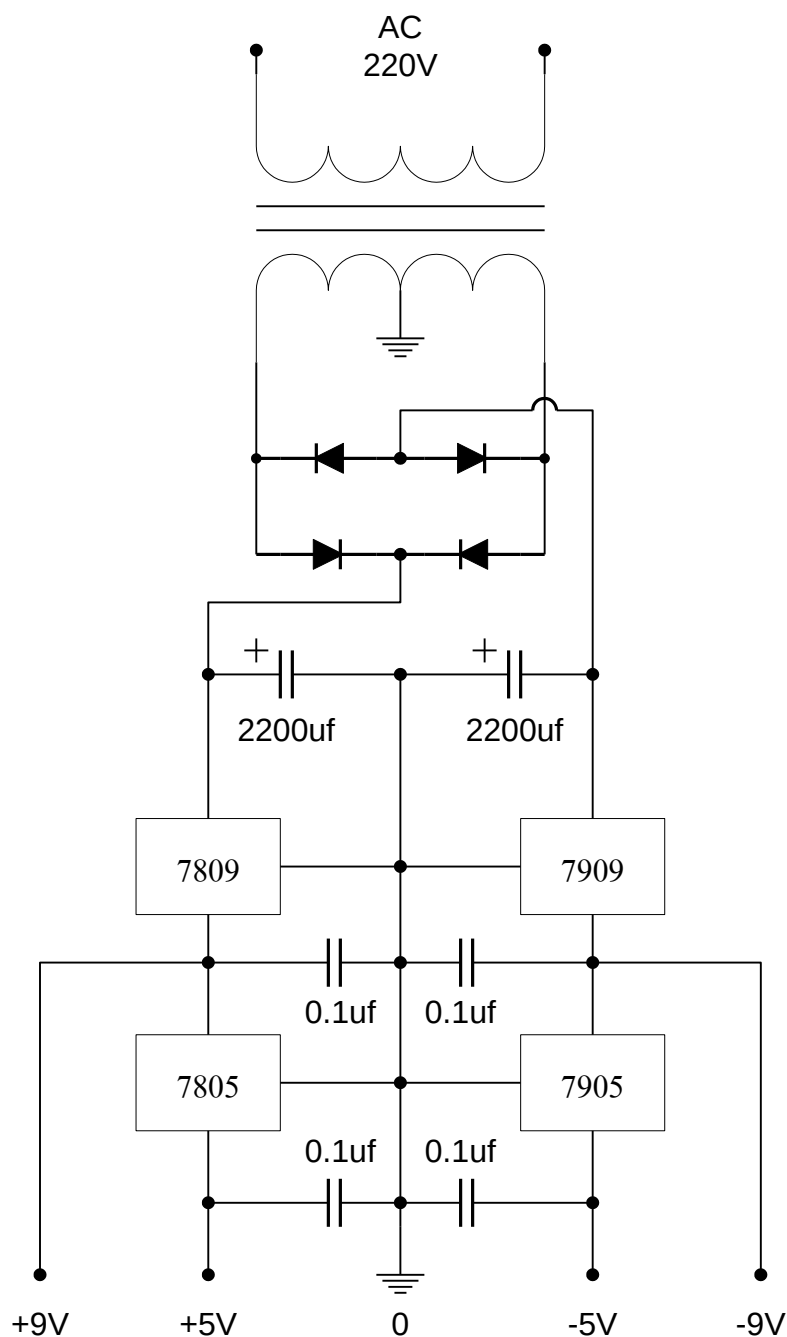
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3



รูปที่ 3.21 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

3.13 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)

วงจรภาคจ่ายไฟ(Power supply) ที่ใช้ในระบบจะประกอบด้วยไฟสองชุด คือ +9V, 0 , -9V และ +5V, 0 , -5V โดยใช้ ไอซีเร็กกูเลต LM 7809, LM7805 ในซีกบวก และ LM 7909, LM 7905 ในซีกลบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)