

การออกแบบสร้างและทดสอบอินดิเคเตอร์

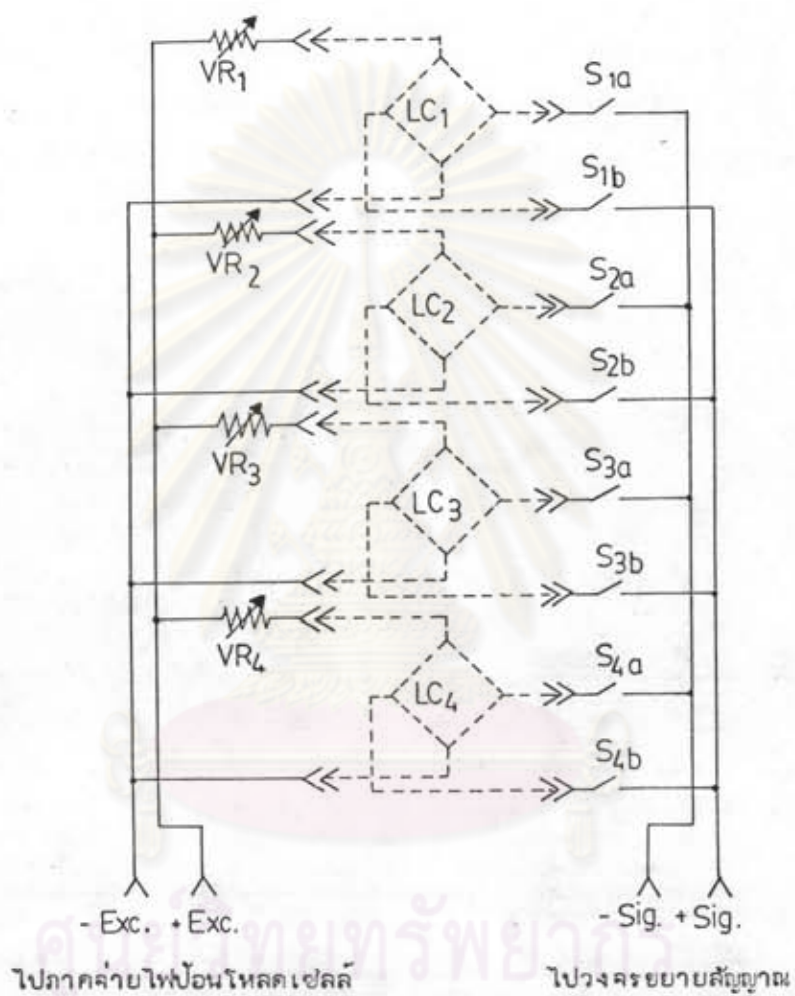
3.1 ข้อกำหนดในการออกแบบอินดิเคเตอร์

ในการออกแบบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ ได้พยายามจะให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด กรมทะเบียนการค้า กระทรวงพาณิชย์ ซึ่งรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก. สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ จัดอยู่ในเครื่องชั่งชนิดที่ 5 คือเครื่องชั่งอัตโนมัติ (automatic) และจากข้อบังคับสำหรับเครื่องชั่ง ข้อ 88 จะต้องทดสอบตามข้อบังคับของ เครื่องชั่งชนิดที่ 4 ซึ่งกำหนดอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อย และอัตราความรู้สึกไวดังนี้ .

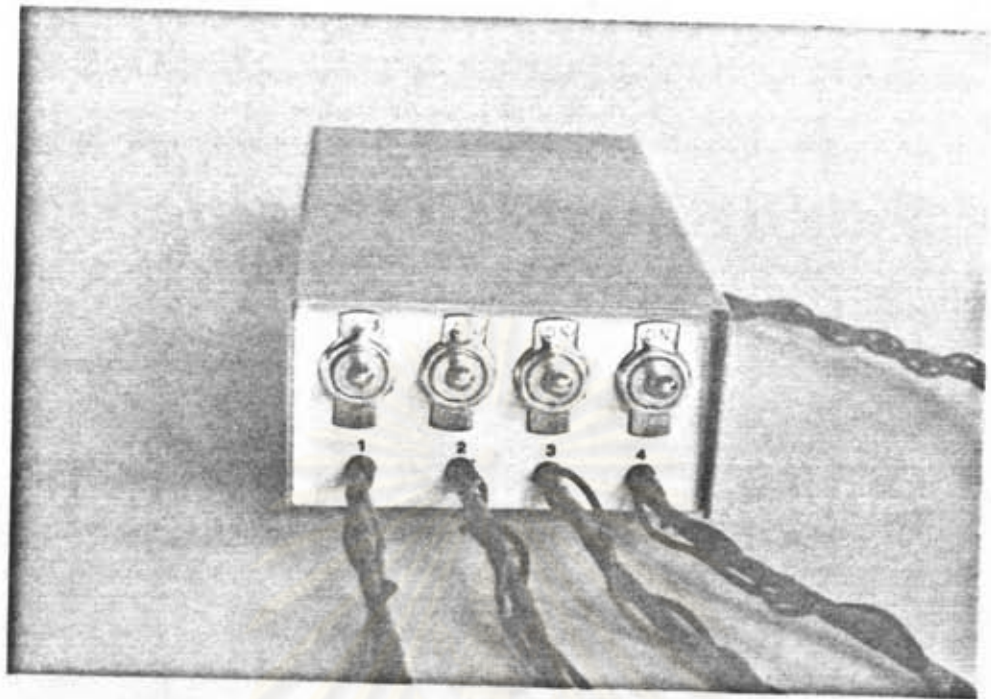
ที่น้ำหนักเต็มขีดกำลัง เครื่อง อนุญาต 1/2000 ของน้ำหนักนั้น

ส่วนข้อกำหนดอื่นยังไม่บังคับ จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อกำหนดของอินดิเคเตอร์สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักจากต่างประเทศ และทำการกำหนดเป็นข้อ ๆ ดังนี้

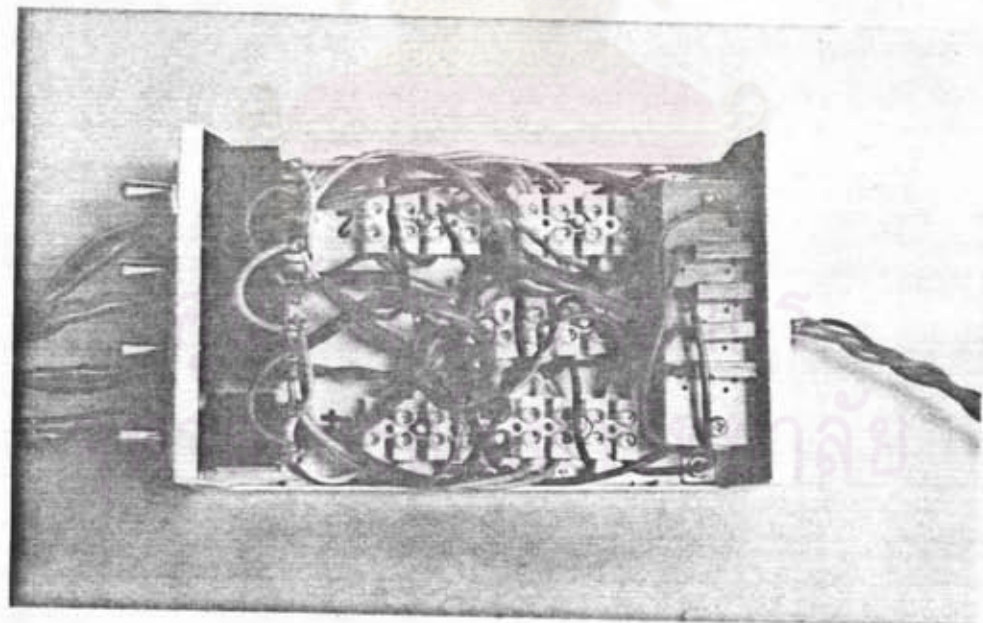
1. ความแม่นยำในการวัด (accuracy) ดีกว่า ± 0.05 % ของค่าน้ำหนักเต็มขีด (จากข้อกำหนดของ เครื่องชั่งชนิดที่ 4)
2. ความไม่เป็นเชิงเส้น ดีกว่า ± 0.01 % ของค่าน้ำหนักเต็มขีด
3. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ดีกว่า ± 50 ppm/ $^{\circ}$ C
4. แสดงผลค่าน้ำหนัก หน่วยเป็นกิโลกรัม ด้วยไดโอดเปล่งแสง LED จำนวน $4\frac{1}{2}$ หลัก
5. สามารถชั่งน้ำหนักได้ 20,000 กก. (ที่สเกล x 1) และ 200,000 กก. (ที่สเกล x 10) โดยมีค่าละเอียดสุดที่อ่านได้ 1 และ 10 กก. ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 วงจรของภาครวมสัญญาณ



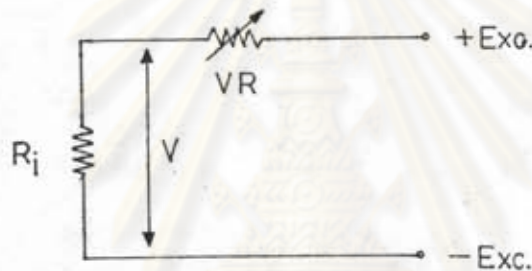
รูปที่ 3.3 ด้านหน้าของกล่องรวมสัญญาณ



รูปที่ 3.4 รายละเอียดภายในกล่องรวมสัญญาณ

3.3 ภาครวมลัทธิญาณ

จากหัวข้อ 2.4.1 ได้เลือกภาครวมลัทธิญาณแบบขนาน ในการออกแบบจะให้สามารถเข้ากับโหลดเซลล์ได้ 4 อัน โดยมีสวิทช์เลือกใช้ทีละอัน หรือพร้อมกันหมดก็ได้ รายละเอียดของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ความต้านทานปรับค่าได้ $VR_1 - VR_4$ ใช้ปรับความไวของโหลดเซลล์แต่ละอันให้เท่ากัน ความต้านทานปรับค่าได้จะต่ออนุกรมกับความต้านทานภายในของโหลดเซลล์ เป็นวงจรแบ่งแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อให้แรงดัน V ที่คร่อมโหลดเซลล์มีค่าลดลง พิจารณาลมการ (2.11), (2.14) และ (2.17) จะเห็นว่าค่า ΔV_o จะมีค่าลดลง รูปที่ 3.3 จะแสดงให้เห็นด้านหน้ากล่องรวมลัทธิญาณ และรูปที่ 3.4 แสดงภายในของกล่องรวมลัทธิญาณ



R_i = ความต้านทานขาเข้าของโหลดเซลล์

$Exc.$ = แรงไฟป้อนโหลดเซลล์

รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของการปรับความไวโหลดเซลล์

3.4 ภาคลำโพงป้อนโหลดเซลล์

3.4.1 คุณสมบัติที่ต้องการ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ภาคลำโพงไฟแบบแรงดันคงที่ โดยมีเหตุผลอยู่ 2 ประการคือ ประการแรกจากหัวข้อ 2.3.2 ได้เลือกใช้ลิเนียร์เทคแบบแผ่นโลหะบาง ค่า $\Delta R/R$ จะมีค่าน้อย ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรบริคมีค่าน้อย จึงสามารถใช้แรงดันคงที่ได้ ประการที่สองการใช้แรงดันคงที่ป้อนโหลดเซลล์ เมื่อมีการลดหรือเพิ่มโหลดเซลล์ (โดยไม่เกินที่ออกแบบไว้ ฉะนั้นแรงดันอาจจะลดลง) ค่าแรงดันที่คร่อมโหลดเซลล์แต่ละอันจะเท่าเดิม ทำให้กระแสที่ไหลผ่านโหลดเซลล์เท่าเดิม แต่ในกรณีของกระแสคงที่ ถ้าเพิ่มโหลดเซลล์ จะต้องเพิ่มกระแสของภาคลำโพงไฟ เพื่อรักษากระแสของแต่ละโหลดเซลล์ให้คงที่

และถ้ามีการลดหรือ บางตัวสายเคเบิลขาดหรือหลุด จะต้องลดค่ากระแสของภาคจ่ายไฟลงด้วย ไม่เช่นนั้นโหลดเซลล์ที่เหลืออาจจะเสียหายเนื่องจากกระแสเกิน

เพื่อให้การชั่งน้ำหนักถูกต้องแม่นยำ จึงได้กำหนดคุณสมบัติบางประการดังนี้

ก. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำกว่า $\pm 50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ เพราะถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 10°C จะทำให้ค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป $\pm 500 \text{ ppm}$ หรือ $\pm 0.05 \%$ ตาม 3.1.ก

ข. ค่าแรงดันริบเบิล (Ripple voltage) น้อยกว่า 1 มิลลิโวลต์ เพราะถ้าใช้แรงดัน 12 โวลต์ จะทำให้ค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 0.0083 % หรือ ± 1 หลักที่ค่าเต็มขีด (20,000 กก.)

ค. สามารถจ่ายกระแสให้โหลดเซลล์ได้ 4 อัน หรือ 140 มิลลิแอมป์ สำหรับโหลดเซลล์ชนิด 350 โอห์ม และแรงดัน 12 โวลต์

ง. ค่าโหลดเรกกูเลชัน (Load regulation) เมื่อจ่ายกระแสตามข้อ ค. จะต้องดีกว่า 0.05 % จึงจะทำให้ค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 0.05 %

3.4.2 การออกแบบวงจร

ในการออกแบบวงจรภาคจ่ายไฟ จะต้องพิจารณาถึงค่าแรงดันที่จะจ่ายให้กับโหลดเซลล์ด้วย เพราะในการใช้งานจะเกิดความร้อนขึ้นในลัเตรนเกจแบบความต้านทาน ความร้อนนี้จะส่งผ่านไปยังชิ้นส่วนรับน้ำหนัก แล้วระบายออกสู่อากาศ ถ้าแรงดันที่ป้อนให้กับโหลดเซลล์สูงเกินไป จะทำให้เกิดความร้อนที่ลัเตรนเกจมากจนระบายออกไม่ทัน จะทำให้ลัเตรนเกจเสียหายได้ แต่ถ้าป้อนแรงดันต่ำเกินไป สัญญาณออกจากโหลดเซลล์จะมีค่าน้อย ทำให้ต้องขยายสัญญาณมากเกินไป จะมีปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายขึ้นมาด้วย

จาก 2.3.4 ได้เลือกใช้วงจรแบบที่ 4 ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลัเตรนเกจแต่ละตัวจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_G = \frac{V^2}{4RA_G} \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ P_G = ความร้อนที่เกิดขึ้นในลัเตรนเกจ (มิลลิวัตต์/ตร.มม.)

V = แรงดันป้อนโหลดเซลล์

R = ความต้านทานของลัเตรนเกจ

A_G = พื้นที่กริด (Grid Area) ของลัเตนเกก

จากสมการ (3.1) เมื่อแรงดันป้อนโพลดเซลล์มีค่าคงที่ ค่าความร้อนจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อความต้านทานและพื้นที่กริดมีค่ามาก แต่ลัเตนเกกที่มีพื้นที่กริดมากจะไม่เหมาะสมกับการติดบนผิวที่โค้งของชิ้นส่วน รับน้ำหนักที่เลือกไว้ จึงเหลือเพียงการเลือกลัเตนเกกที่มีความต้านทานสูงขึ้น ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในลัเตนเกกโดยไม่ง้อให้เกิดความเสียหาย แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 แบ่งตามชนิดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

ในวิทยานิพนธ์นี้ การเลือกค่าแรงดันป้อนโพลดเซลล์และค่าความต้านทานของลัเตนเกกได้กระทำไปพร้อมกันดังนี้

ก. เลือกความต้านทานของลัเตนเกกเท่ากับ 500 โอห์ม จากข้อมูลของผลิตภัณฑ์พื้นที่กริด เท่ากับ $5 \times 3.5 \text{ มม.}^2$ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 4.3)

ตารางที่ 3.1 ค่าความร้อนที่ขอมให้เกิดขึ้นในลัเตนเกก หน่วย-วัตต์/ตร.นิ้ว และมิลลิวัตต์/ตร.มม.

Accuracy Requirements		EXCELLENT Heavy Aluminum or Copper Specimen	GOOD Thick Steel	FAIR Thin Stainless Steel or Titanium	POOR Filled Plastic such as Fiberglass/Epoxy
STATIC	High	2 - 5 3.1 - 7.8	1 - 2 1.6 - 3.1	0.5 - 1 0.78 - 1.6	0.1 - 0.2 0.16 - 0.31
	Moderate	5 - 10 7.8 - 16	2 - 5 3.1 - 7.8	1 - 2 1.6 - 3.1	0.2 - 0.5 0.31 - 0.78
	Low	10 - 20 16 - 31	5 - 10 7.8 - 16	2 - 5 3.1 - 7.8	0.5 - 1 0.78 - 1.6
DYNAMIC	High	5 - 10 7.8 - 16	5 - 10 7.8 - 16	2 - 5 3.1 - 7.8	0.5 - 1 0.78 - 1.6
	Moderate	10 - 20 16 - 31	10 - 20 16 - 31	5 - 10 7.8 - 16	1 - 2 1.6 - 3.1
	Low	20 - 50 31 - 78	20 - 50 31 - 78	10 - 20 16 - 31	2 - 5 3.1 - 7.8

ข. เลือกค่าแรงดันเท่ากับ 12 โวลท์

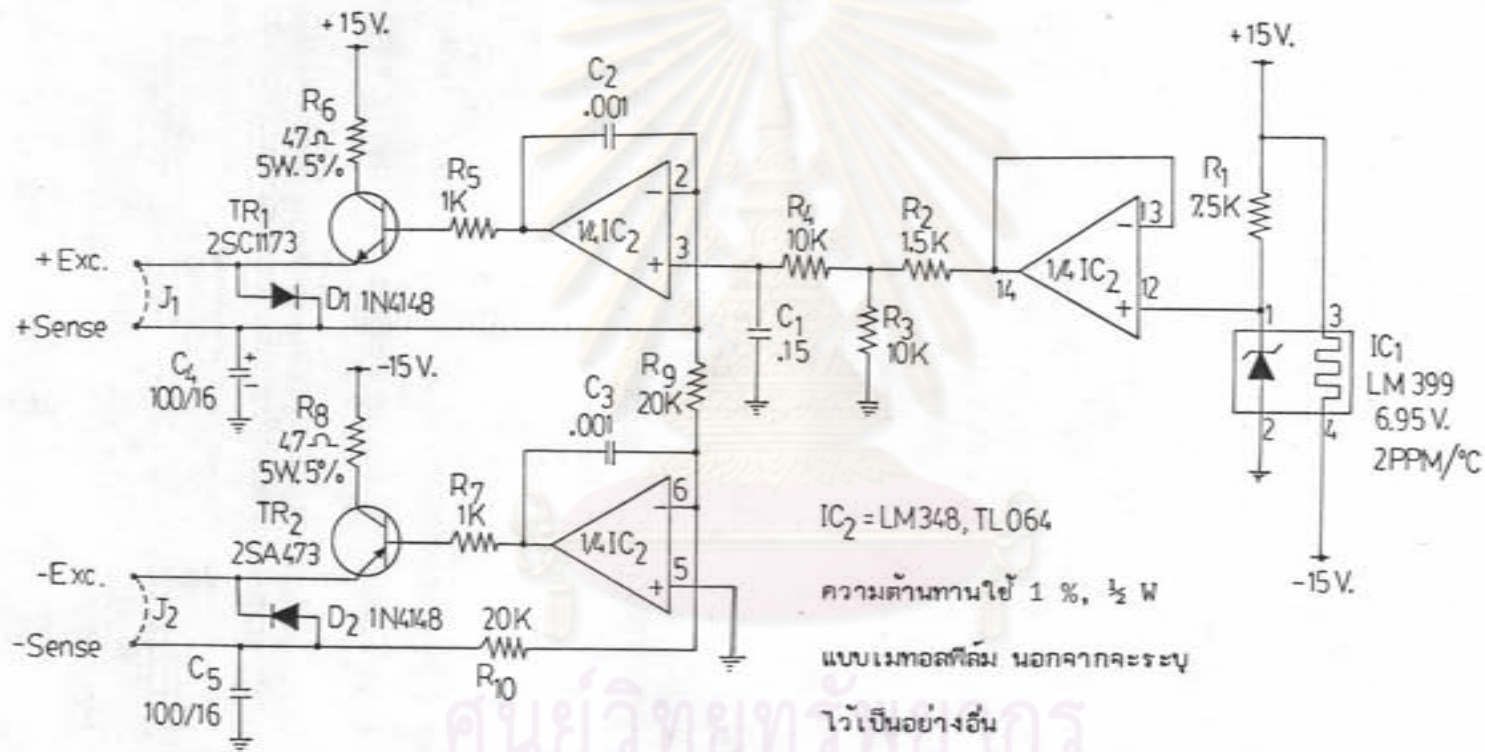
คำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้

$$P_G = \frac{(12)^2}{4 \times 500 \times 5 \times 3.5} = 4.11 \text{ มิลลิวัตต์/ตร.มม.}$$

จากหัวข้อ 2.3.1 ได้เลือกชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคอสมัน ซึ่งพอจะจัดเป็นพวกเหล็กหนา (Thick steel) ได้ ค่า $P_G = 4.11$ มิลลิวัตต์/ตร.มม. เมื่อนำไปเทียบในตารางที่ 3.1 ค่าความแม่นยำในการวัดแบบสแตติกจะอยู่ในระดับปานกลาง และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสเตรนเกจ

วงจรของภาคจ่ายไฟป้อนโพลดเซลล์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 รายละเอียดในการออกแบบและการทำงานของวงจรมีดังนี้

ส่วนที่สำคัญที่สุดในภาคนี้คือ แรงดันอ้างอิง ค่าเป็นจะต้องเลือกให้มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในที่นี้เลือกไปโอซีเบอร์ LM 399 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำมาก คือ $0.3 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ (typ), $2 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ (max) และเสถียรภาพระยะยาว $20 \text{ ppm}/1000 \text{ hr}$ (typ) รายละเอียดข้อมูลค่าเพาะอื่น ๆ ของ LM 399 อยู่ในภาคผนวก ข. ความต้านทาน R_1 จะกำหนดกระแสทำงานประมาณ 1 มิลลิแอมป์ แรงดันอ้างอิงประมาณ 6.95 โวลต์ จะผ่านออปแอมป์ไปเฟ้อไปยังวงจรแบ่งแรงดัน R_2 และ R_3 ลดลงมาเหลือ 6 โวลต์ สัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงกว่า 110 เฮิรท์ จะถูกกรองโดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ประกอบด้วย R_4 และ C_1 เนื่องจากจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้โพลดเซลล์ได้ถึง 4 ตัว จึงใช้ออปแอมป์ไปขับทรานซิสเตอร์ TR_1 เพื่อให้จ่ายกระแสได้มาก และป้อนกลับจากขา E ของ TR_1 มายังขา 2 ของออปแอมป์ อัตราขยายของวงจร = +1 ทำให้แรงดัน + Exc. = + 6 โวลต์ แรงดัน + 15 โวลต์ จะป้อนให้ขา C ของ TR_1 ผ่าน R_6 ซึ่งจะจำกัดกระแสในกรณีที่เกิดสัตวงจรที่ + Exc. ไม่ให้เกิน 300 mA แรงดัน + 6 โวลต์จะผ่าน R_9 ไปเข้าขา 6 ของออปแอมป์ที่สัตวงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณ และขับ TR_2 เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มาก การป้อนกลับจะผ่าน J_2 และ R_{10} อัตราขยายของวงจร = -1 ทำให้ได้แรงดันออก - Exc = -6 โวลต์ แรงดัน - 15 โวลต์ป้อนให้ขา C ของ TR_2 ผ่าน R_8 แรงดันคงที่ที่ป้อนให้โพลดเซลล์จะเป็น 12 โวลต์ โดยจ่ายเป็น + 6 และ - 6 โวลต์เทียบกับกราวด์ ซึ่งการจ่ายเป็นแรงดันอุ่อย่างนี้มีข้อดีคือ สัญญาณออกของโพลดเซลล์จะมีระดับใกล้เคียงกับกราวด์ เมื่อนำไปขยายโดยวงจรที่มีขั้วสัญญาณเข้าแบบขยายผลต่าง จะทำให้ลดปัญหาของการขยายแบบคอมมอน-โหมดไปได้มาก



รูปที่ 3.6 วงจรของภาคจ่ายไฟป้อนโวลต์เซลล์

ในกรณีที่ลำบ่ไฟจากภาคจ่ายไฟไปยังโหลดเซลล์ยาวมาก จะทำให้เกิดแรงดันที่โหลดเซลล์ตกลงกว่าต้นทาง สามารถจะแก้ไขโดยการจ่ายไฟแบบ Remote sensing ทอด J_1 และ J_2 ออก แล้วต่อจาก + Sense และ -Sense ไปต่อกับ + Exc. และ - Exc. ตามลำดับ โดยให้จุดต่อบู่ใกล้กับโหลดเซลล์มากที่สุด โดโอด D_1 และ D_2 จะเป็นตัวป้องกันขณะที่ + Sense และ - Sense ยังไม่ได้ต่อกับ + Exc. และ - Exc.

ความต้านทานใช้ชนิดเมทอลฟิล์ม (Metal Film) ค่าผิดพลาด ± 1 เปอร์เซ็นต์
ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

3.4.3 ผลการทดสอบภาคจ่ายไฟป้อนโหลดเซลล์

ก. หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

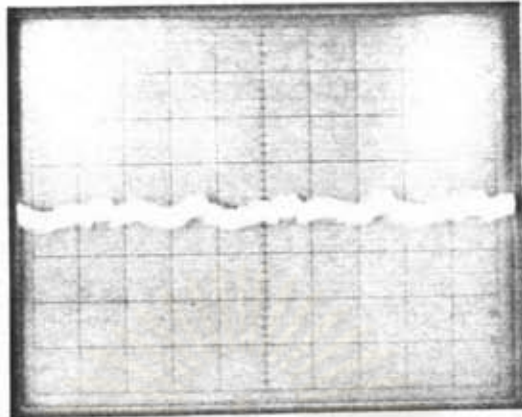
ในการทดสอบจะนำเอาวงจรภาคจ่ายไฟป้อนโหลดเซลล์ไปแช่ไว้ในตู้เย็นปรับให้ได้จุดหมุ่ 10 $^\circ\text{C}$ และเริ่มวัดค่าแรงดัน ปิดสวิตช์ตู้เย็นปล่อยให้จุดหมุ่ค่อย ๆ สูงขึ้นจนถึงจุดหมุ่ห้อง นำออกมาใส่ในกล่องโลหะ และใช้เครื่องเป่าผมเป่าให้จุดหมุ่ค่อย ๆ สูงจนถึง 60 $^\circ\text{C}$ ข้อมูลการทดสอบแสดงในตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ค. และนำมาคำนวณดังนี้

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ} = \frac{(12.0487 - 12.0430) \times 10^6}{(60-10) \times 12.0467} = 9.46 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ทดสอบได้จริงต่ำกว่าค่า 50 ppm ที่กำหนดไว้ใน

3.4.1 ข้อ ก.

ข. วัดค่าแรงดันริบเปิด โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป ตามรูปที่ 3.7 สามารถวัดค่าแรงดันริบเปิดได้ประมาณ 0.4 mVp-p ขณะจ่ายกระแส 147 มิลลิแอมป์ ค่าแรงดันริบเปิดที่วัดได้ต่ำกว่า 1 mVp-p ที่กำหนดไว้ใน 3.4.1 ข้อ ข.



รูปที่ 3.7 แสดงค่าแรงดันรีปเปิลของภาคจ่ายไฟป้อนโหลดเซลล์ 1 mv/div และ 5 m sec/div.

ค. ทดสอบความล้มเหลวในการจ่ายกระแส ถ้าใช้โหลดเซลล์ที่มีความต้านทานภายใน 500 โอห์ม จำนวน 4 ตัว จะต้องจ่ายกระแสเท่ากับ 96 มิลลิแอมป์ แต่ถ้าเป็นโหลดเซลล์ที่มีความต้านทานใน 350 โอห์ม 4 ตัว จะต้องจ่ายกระแสเท่ากับ 137 มิลลิแอมป์

ในการทดสอบใช้ความต้านทานค่า 82 โอห์ม 5 วัตต์ คือเป็นโหลดวัดกระแสได้ 147 มิลลิแอมป์ วัดค่าแรงดันได้เท่ากับ 12.045 โวลท์

ในการทดสอบสัณฐานวงจร วัดกระแสได้ 323 มิลลิแอมป์ เกิดความร้อนที่ R_6 และ R_8 เท่ากับ $(0.323)^2 \times 47 = 4.9$ วัตต์

ง. หาค่าโหลดเรกกูเลชั่น ขณะยังไม่จ่ายกระแสวัดได้ 12.046 โวลท์จาก
 ข้อ ค. เมื่อจ่ายกระแสวัดได้ 12.045 โวลท์ ดังนั้น

$$\text{โหลดเรกกูเลชั่น} = \frac{0.001 \times 100}{12.046} = 0.008 \%$$

ค่าโหลดเรกกูเลชั่นที่คำนวณได้ต่ำกว่าค่า 0.05 % ที่กำหนดไว้ใน 3.4.1 ข้อ ง.

3.5 ภาคปรับสัญญาณ

3.5.1 จุดเล็มบัติที่ต้องการ

ก. สามารถขยายสัญญาณได้ 200 - 1000 เท่า เพื่อให้สามารถใช้ได้กับ โหลดเซลล์ที่แรงดันออกต่ำถึง 0.67 mV/V และแรงดันออกภาคปรับสัญญาณสูงสุด 8 โวลต์

ข. ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นดีกว่า 0.01 % ตามกำหนดใน 3.1 ข้อ 2.

ค. มีฟังก์ชันปรับศูนย์ (Zero adjust) ทั้งแบบปรับหยาบและละเอียด สำหรับปรับค่าน้ำหนักบนหน้าปัดก่อนจะให้เป็นศูนย์หรือค่าอื่น

ง. สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันอินพุตออฟเซต $\leq \pm 0.3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ค่าแรงดันออกที่เปลี่ยนไปของภาคปรับสัญญาณ จะไม่ค่อยมีผลต่อความแม่นยำเท่าใดนัก เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมักจะเปลี่ยนอย่างช้า ๆ และสามารถจะปรับชดเชยได้ โดยอาศัย ฟังก์ชันปรับศูนย์ สำหรับค่าที่กำหนดไว้ ถ้าใช้อัตราขยาย 1000 จะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ประมาณ 37.5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$

จ. Common mode rejection ratio > 100 dB

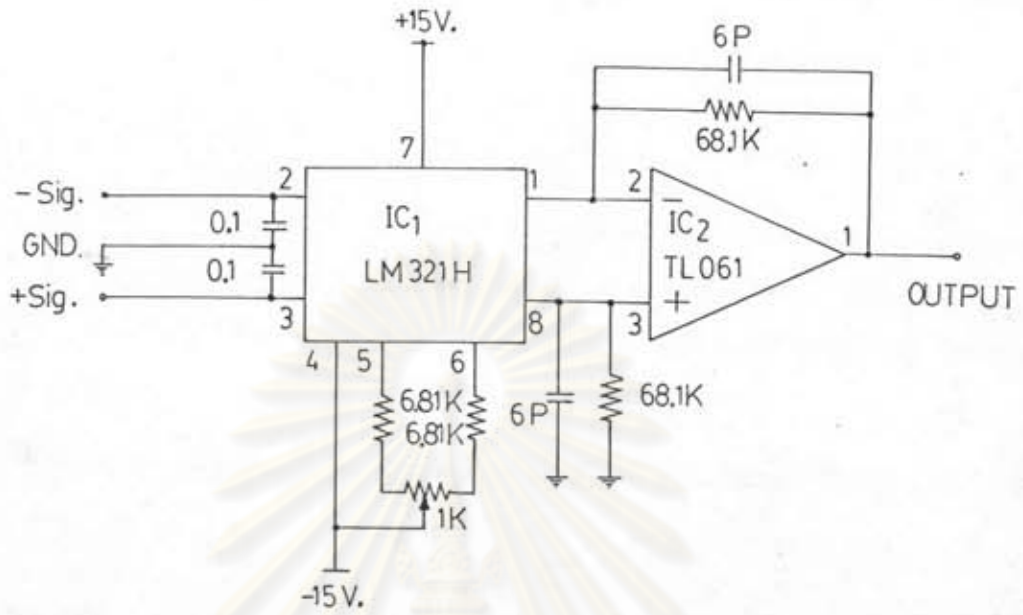
ฉ. มีวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำประมาณ 2 เฮิรท์ เพื่อกรองสัญญาณ 50 เฮิรท์ และสัญญาณรบกวนอื่น ๆ

3.5.2 การออกแบบวงจร

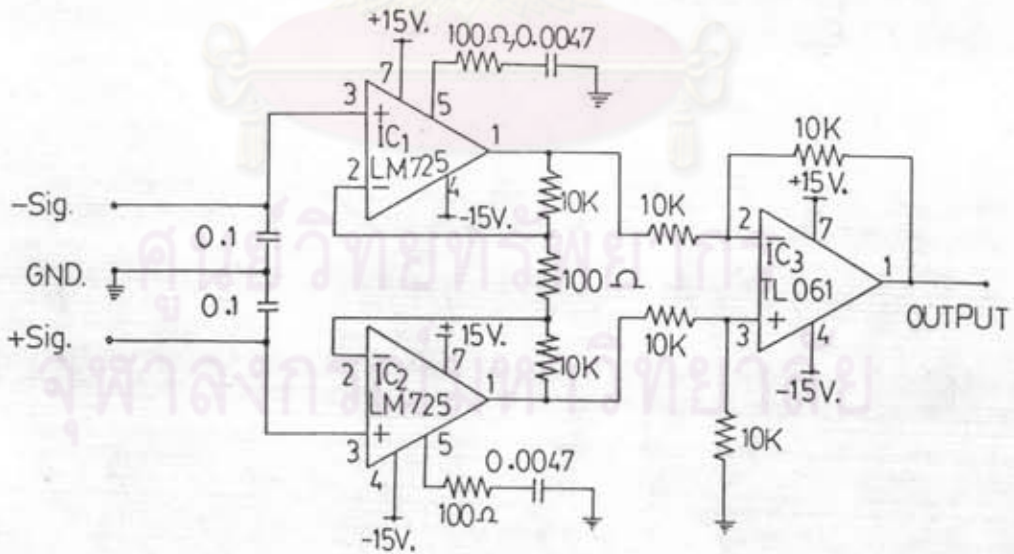
จากหัวข้อ 2.4.3 ได้กล่าวถึงวงจรขยายที่สำคัญ และได้เลือกใช้วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน สำหรับขยายสัญญาณจากโหลดเซลล์ ไอซีที่เลือกนำมาใช้ทดลอง ออกแบบมีอยู่หลายเบอร์ คือ LM 321, LM 725 และ LH 0038 C

ก. การออกแบบโดยใช้ไอซีเบอร์ LM 321

ไอซีเบอร์ LM 321 จะมีทั้งขั้วสัญญาณเข้า และสัญญาณออกเป็นแบบผลต่าง โดยการใส่ร่วมกับบออปแอมป์อีก 1 ตัว ตามรูปที่ 3.8 จะได้วงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน ค่าอุปกรณ์ที่แสดงไว้จะมีอัตราขยายประมาณ 200 เท่า แต่จากการทดสอบค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้เท่ากับ 1.13 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ต้องการมาก วงจรนี้จึงใช้ไม่ได้



รูปที่ 3.8 วงจรขยายแบบอินลัตรูเมนเตย์นที่ใช้ไอซีเบอร์ LM321



รูปที่ 3.9 วงจรขยายแบบอินลัตรูเมนเตย์นที่ใช้ไอซีเบอร์ LM 725

ข. การออกแบบโดยใช้ไอซีเบอร์ LM 725

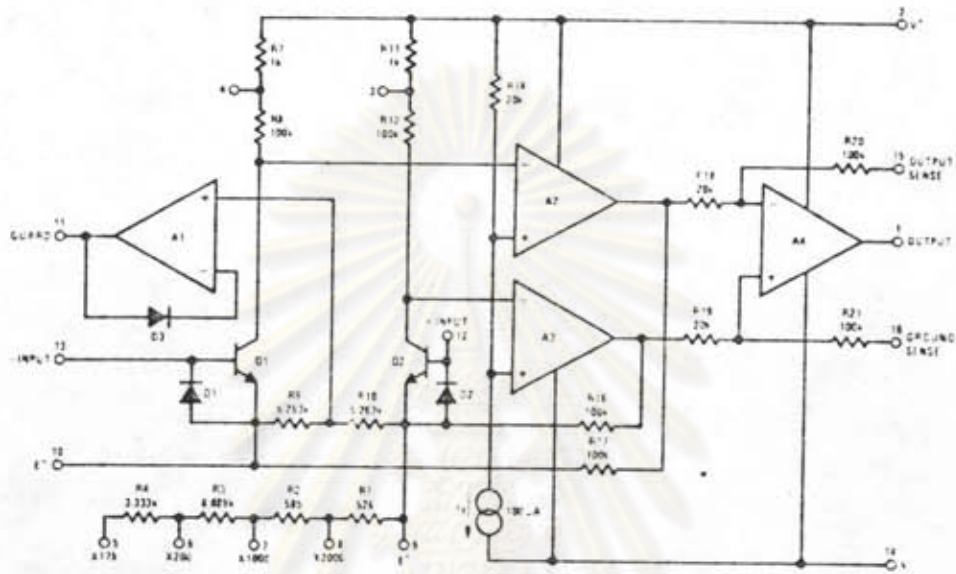
ไอซี LM 725 เป็นออปแอมป์ สำหรับทำวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน วงจรที่ทดลองออกแบบแสดงในรูปที่ 3.9 IC₁ และ IC₂ จะต้องมีการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุ และความต้านทาน อัตราขยายทั้งหมดประมาณ 200 เท่า ความต้านทานใส่แบบเมทอลฟิล์ม 1 %, 100 ppm/°C จากการทดสอบวงจรที่ออกแบบ วัดค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้ 0.017 % และสัมประสิทธิ์จุดหนีของแรงดันอินพุตออฟเซตเท่ากับ 0.87 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีความสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ใน 3.5.1 วงจรนี้จึงใช้ไม่ได้เช่นกัน

ค. การออกแบบโดยใช้ไอซีเบอร์ LH 0038 C

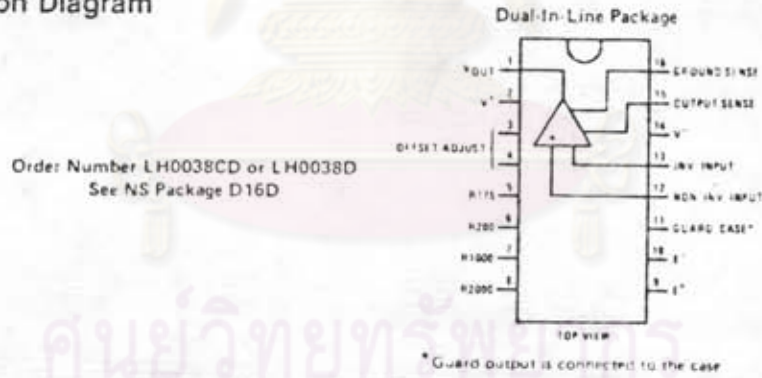
ไอซีเบอร์ LH 0038 C เป็นไอซีที่ได้รับการออกแบบมาเป็นวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันโดยเฉพาะ ค่าสัมประสิทธิ์จุดหนีของแรงดันอินพุตออฟเซต เท่ากับ 0.2 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (typ) และ 1.0 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (max) สัญญาณรบกวนที่ขาเข้าต่ำถึง 0.2 $\mu\text{Vp-p}$ อัตราขยายสามารถจะเลือกได้ในช่วง 100 - 2000 เท่า โดยมีค่าความไม่เป็นเชิงเส้นต่ำมากถึง 1 ppm (typ) เท่านั้น ข้อมูลค่าเพาะอื่น ๆ อยู่ในภาคผนวก ข. รูปที่ 3.10 จะแสดงไดอะแกรมภายในและภายนอกของ LH 0038 C ออปแอมป์ และความต้านทานถูกบรรจุไว้ในตัวตั้งเดียวกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงตามจุดหนีเป็นไปอย่างพร้อมกัน จึงมีค่าสัมประสิทธิ์จุดหนีต่ำดังที่แสดงมาแล้ว การเลือกอัตราขยายทำได้โดยการเชื่อมต่อขา 10 กับขา 5, 6, 7, 8, 9 ขาใดขาหนึ่ง ก็จะได้อัตราขยายตามที่ระบุไว้ที่ขานั้น ๆ ในรูปที่ 3.11 เป็นวงจรของภาคปรับสัญญาณ ซึ่งมีรายละเอียดของการออกแบบและการทำงานดังนี้

ในการออกแบบวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน ได้คำนึงถึงความผิดพลาดในการใช้กับโวลต์เซลล์ที่มีระดับสัญญาณออกต่าง ๆ กันด้วย ดังนั้นจึงออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราขยายได้ง่าย เพื่อป้องกันการขยายจนถึงจุดอิ่มตัวของไอซี ตามปกติแล้วถ้าเชื่อมต่อขา 10 กับขา 7 ของ IC 3 เข้าด้วยกันจะได้อัตราขยายเท่ากับ 1000 การเพิ่ม VR 1 ค่า 1K โอห์มอนุกรมเข้าไป จะทำให้สามารถปรับอัตราขยายได้ในช่วง 575 ถึง 1000 เท่า จะสามารถใช้โวลต์เซลล์ที่มีแรงดันออก 0.67 mV/V ถึง 1.74 mV/V ที่แรงดันป้อนโวลต์เซลล์ 12 โวลต์ แต่ถ้าโวลต์เซลล์มีแรงดันออกมากกว่านี้ ก็ลดอัตราขยายลงอีกโดยเพิ่มค่า VR1 ซึ่งสามารถจะคำนวณอัตราขยายได้ดังนี้

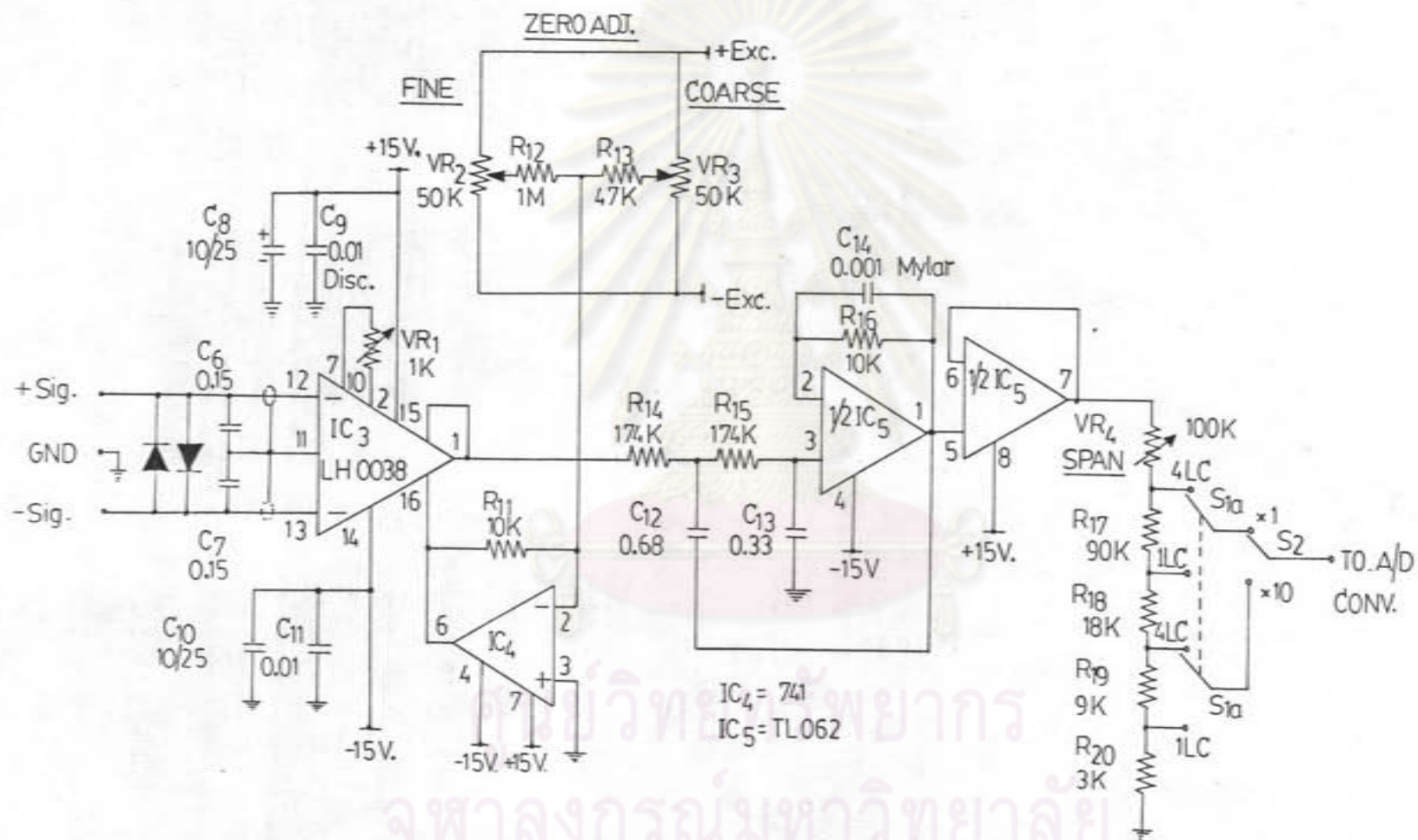
Simplified Schematic Diagram



Connection Diagram



รูปที่ 3.10 แสดงไดอะแกรมของ LH 0038 C



รูปที่ 3.11 วงจรของภาคปรับสัญญาณ

$$\text{อัตราขยาย} = 5 \left(\frac{200 \text{ K}}{R_E} + 1 \right) \dots\dots\dots(3.2)$$

จากรูปที่ 3.10 ค่า R_E เท่ากับ $(R_9 + R_{10})$ ยนามกับ $(V_{R1} + R_1 + R_2)$

ไดโอด D3 และ D4 จะเป็นตัวป้องกันทางด้านขั้วสัญญาณเข้า ตัวเก็บประจุ C6 และ C7 จะกรองเอาสัญญาณความถี่สูงทิ้งไป

การปรับศูนย์ซึ่งมีประโยชน์ในการหักลบหรือเพิ่มค่าน้ำหนักใด ๆ ก่อนทำการชั่งกระทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิงที่ขา 16 ของ IC3 แรงดันอ้างอิงนี้ได้มาจากขา 6 ของ IC4 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณ VR2 จะเป็นตัวปรับแบบละเอียดใช้โพเทนชิโอเมเตอร์แบบ 10 รอบ ส่วน VR3 เป็นตัวปรับแบบหยาบใช้ทริมเมอร์แบบ 15 รอบ ช่วงของการปรับศูนย์คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ช่วงการปรับศูนย์แบบละเอียด} &= \pm \left(\frac{R_{11} \times \text{Exc}}{R_{12}} \right) \\ &= \pm \left(\frac{10\text{K} \times 6}{1\text{M}} \right) = \pm 0.0600 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ช่วงการปรับศูนย์แบบหยาบ} &= \pm \left(\frac{R_{11} \times \text{Exc}}{R_{13}} \right) \\ &= \pm \left(\frac{10\text{K} \times 6}{47\text{K}} \right) = \pm 1.2766 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

สัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วจาก IC3 จะถูกส่งไปยังวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งในที่นี่ใช้แบบบัตเตอร์เวิร์ท ความถี่คัทออฟประมาณ 2 เฮิรท์ และมีอัตราลดระดับ - 40 เดซิเบลต่อดีเซต สัญญาณที่ผ่านออกจากบัฟเฟอร์ จะนำไปแบ่งช่วงของการวัด โดยอาศัยวงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งมีอัตราส่วนเป็น 1, 1/4, 1/10 และ 1/40 สวิตช์ S1 จะเลือกกว่าเป็นการชั่งแบบโหลดเซลล์ 4 ตัวหรือ โหลดเซลล์ตัวเดียว โดยที่การเลือกแบบโหลดเซลล์ 4 ตัว จะได้สัญญาณออกเป็น 4 เท่าของการเลือกแบบโหลดเซลล์เดียว สวิตช์ S2 จะเลือกช่วง $\times 1$ หรือ $\times 10$ ของค่าสัญญาณที่ส่งไปวงจรแปลงแอนาล็อก ความต้านทานปรับค่าได้ VR4 จะเป็นตัวปรับช่วงการอ่านค่า (Span) ของวงจรแปลงแอนาล็อกให้อ่านค่าน้ำหนักที่ชั่งออกมาเป็นกิโลกรัมโดยตรง

ความต้านทานในวงจรใช้แบบเมทอลฟิล์ม ค่าผิดพลาด 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ $\pm 100 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ขนาด 1/4 วัตต์ ความต้านทานปรับค่าได้ทุกตัวเป็นแบบปรับละเอียด 15 รอบ มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ $\pm 100 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ เช่นกัน

ตัวเก็บประจุ C6, C7, C12, C13 ใช้แบบฟิล์ม นอกนั้นใช้ตามที่ระบุไว้ในวงจร

3.5.3 ผลการทดสอบวงจรปรับสัญญาณ

เครื่องมือวัดที่นำมาทดสอบที่สำคัญได้แก่ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ HEWLETT PACKARD รุ่น 3465B ขนาด $4\frac{1}{2}$ หลัก มีค่าความแม่นยำในการวัด $\pm 0.03 \%$ ของค่าที่อ่านได้ในทิสัย 20 มิลลิโวลต์ และ $\pm 0.02 \%$ ของค่าที่อ่านได้ในทิสัย 200 มิลลิโวลต์ ถึง 200 โวลต์ และอีกเครื่องหนึ่งคือเครื่องกำเนิดแรงดันไฟตรงมาตรฐาน ยี่ห้อ KIKUSUI MODEL 101 มีค่าผิดพลาด $\pm 0.05 \%$ ในทิสัย 1 และ 10 โวลต์ และ $\pm 0.1 \%$ ในทิสัย 10 และ 100 มิลลิโวลต์

ก. ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้น

ในการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟตรงประมาณ 0-20 มิลลิโวลต์ เข้าที่ขั้วสัญญาณเข้าของวงจรปรับสัญญาณ เพื่อป้องกันแรงดันออกของวงจรรขยายอินสตรูเมนเตชันไม่ให้เกินค่าสูงสุด (ประมาณ ± 12 โวลต์) จึงปรับ VR1 ให้มีค่า 1K โอห์ม ซึ่งจะได้อัตราขยายประมาณ 575 เท่า ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดที่ตำแหน่ง "x1" ของโพลดเซลล์เดี่ยว และปรับ VR4 "SPAN" เพื่อให้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์อ่านได้ในช่วง 0-2 โวลต์ สำหรับข้อมูลและผลของการทดสอบ แสดงไว้ดังตารางที่ ค-2 ในภาคผนวก ค.

ผลจากการทดสอบ ไม่สามารถวัดค่าความไม่เป็นเชิงเส้นได้เลย เพราะว่าเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ จะสามารถวัดความไม่เป็นเชิงเส้นได้เพียง 0.005 % เท่านั้น แต่จากข้อมูลของผู้ผลิต ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของไอซีเบอร์ LH 0038C จะมีค่าน้อยมากถึง 0.0001 % ดังนั้นจึงสรุปได้แต่เพียงว่าค่าความไม่เป็นเชิงเส้นดีกว่า 0.005 % ซึ่งจะต่ำกว่า 0.01 % ที่กำหนดไว้ใน 3.5.1 ข้อ ข.

ข. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันอินพุทออฟเซต

ในการทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 10°C - 60°C ปรับ VR1 ให้มีค่าต่ำสุดหรือเท่ากับ 0 โอห์ม จะได้อัตราขยายของวงจรขยายอินสตรูเมนต์เช่น เท่ากับ 1000 ใช้มัลติมิเตอร์วัดที่ขา 7 ของ IC5 ซึ่งจุดนี้สัญญาณออกจะไม่ถูกบั่นทอนลง (attenuate) จากนั้นนำเอาวงจรปรับสัญญาณไปไว้ในตู้เป็นและปรับจุดอุณหภูมิลงมาที่ 10°C ปรับ VR2 และ VR3 ให้มัลติมิเตอร์อ่านได้ 0.0 มิลลิโวลต์ ปิดสวิตช์ไฟตู้เป็นปล่อยจุดอุณหภูมิเท่ากับจุดอุณหภูมิห้อง แล้วนำออกมาเป่าร้อนจนถึง 60°C

สำหรับข้อมูลการทดสอบได้จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ค. การคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันอินพุทออฟเซต มีดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันอินพุทออฟเซต

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{แรงดันออกที่เปลี่ยนไป}}{\text{อัตราขยาย} \times \text{อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป}} \\
 &= \frac{-12.17 \times 10^{-3}}{100 \times 50} \quad \text{โวลต์/}^{\circ}\text{C} \\
 &= -0.24 \quad \mu\text{V/}^{\circ}\text{C} \\
 &= -30 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C} \quad \text{ที่อัตราขยาย 1000 เท่า}
 \end{aligned}$$

ผลจากการคำนวณข้างบน ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันอินพุทออฟเซตของวงจรปรับสัญญาณ = $-0.24 \mu\text{V/}^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมิต้านน้อยกว่าค่า $\pm 0.3 \mu\text{V/}^{\circ}\text{C}$ ที่กำหนดไว้ใน

3.5.1 ข้อ ค.

ค. ผลการทดสอบ Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)

วิธีการทดสอบค่า CMRR ทำตามรูปที่ 3.12 โดยสลับวงจรขั้วสัญญาณเข้า และต่อกับกราวด์ ใช้มัลติมิเตอร์วัดที่ขา 7 ของ IC5 แล้วปรับ VR2 และ VR3 ให้มัลติมิเตอร์อ่านแรงดันได้ 0.0 มิลลิโวลต์ จากนั้นจึงย้ายขั้วสัญญาณเข้าไปต่อกับแรงดันคงที่ + Exc. และ - Exc. ซึ่งมีค่า + 6.02 และ - 6.02 โวลต์ ตามลำดับ ค่า CMRR คำนวณได้ดังนี้

$$\text{CMRR} = 20 \log\left(\frac{\text{input common-mode voltage range}}{\text{peak-to-peak change in input offset voltage}}\right)$$

ที่อัตราขยาย = 1000

แรงดันขาเข้า = + 6.02 โวลต์ แรงดันขาออก = + 0.3 มิลลิโวลต์

แรงดันขาเข้า = - 6.02 โวลต์ แรงดันขาออก = - 0.3 มิลลิโวลต์

$$\therefore \text{ค่า CMRR}_{1000} = 20 \log \left(\frac{12.04 \times 1000}{0.6 \times 10^{-3}} \right) = 146.05 \text{ dB}$$

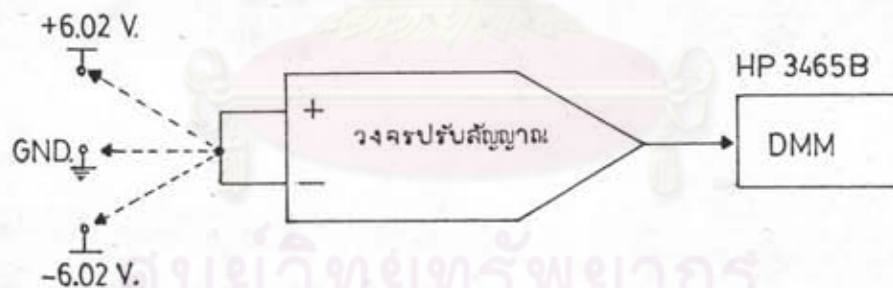
ที่อัตราขยาย = 575

แรงดันขาเข้า = + 6.02 โวลต์ แรงดันขาออก = + 0.6 มิลลิโวลต์

แรงดันขาเข้า = - 6.02 โวลต์ แรงดันขาออก = - 0.6 มิลลิโวลต์

$$\therefore \text{CMRR}_{575} = 20 \log \left(\frac{12.04 \times 575}{1.2 \times 10^{-3}} \right) = 135.22 \text{ dB}$$

ผลการทดสอบค่า CMRR ทั้งที่อัตราขยาย 575 และ 1000 ปรากฏว่าค่า CMRR ดีกว่าค่า 100 dB ที่กำหนดไว้ใน 3.5.1 ในข้อ ง.



รูปที่ 3.12 การหาค่า CMRR

3.6 ภาคแสดงผลเชิงเลข

3.6.1 คุณสมบัติที่ต้องการ

ก. แสดงผลเป็นตัวเลขขนาด $4\frac{1}{2}$ หลัก เพื่อให้มีความละเอียดในการชั่งถึง 1 ใน 20,000 กิโลกรัม

ข. ความแม่นยำในการวัดดีกว่า $\pm 0.05\%$ ตามที่กำหนดใน 3.1 ข้อ 1

ค. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิดีกว่า $+ 50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ และ $- 20 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ เพื่อ

ที่จะรวมกับผลการทดสอบของภาคปรับสัญญาณใน 3.5.3 ข้อ ข. ($-30 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) แล้วไม่เกินค่า $\pm 50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ที่กำหนดใน 3.1 ข้อ 3

ง. อุณหภูมิใช้งาน $10 - 60^{\circ}\text{C}$

3.6.2 การออกแบบวงจรแปลงแอนะล็อก

ในหัวข้อ 2.4.4 ข้อ ก. ได้กล่าวถึง ชนิดต่าง ๆ ของวงจรแปลงแอนะล็อกไว้แล้ว และผู้จัดทำได้เลือกวงจรแปลงแอนะล็อกประเภทที่มีการอินทิเกรต แต่วงจรประเภทนี้ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปของไอซี และมีขนาด $4\frac{1}{2}$ หลักร หรือ 16 Pin นั้น ส่วนมากจะเป็นแบบ Dual slope type และสามารถนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 จากการพิจารณาจะเห็นว่าคุณสมบัติส่วนใหญ่จะค่อนข้างใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันบ้างที่ แหล่งจ่ายไฟที่ต้องการ แรงดันไฟอ้างอิง และวงจรมหาพีการที่ต้องเพิ่มเข้าไป สำหรับแรงดันอ้างอิงภายในที่นำมาด้วยนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิค่อนข้างสูง ค่าเป็นจะต้องใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอกที่ดีกว่า

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกไอซีเบอร์ ICL 7135 โดยมีเหตุผลคือ มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแอนะล็อกต่ำ ใช้แหล่งจ่ายไฟเพียง 2 ชุด คือ ± 5 โวลต์ ในขณะที่เบอร์อื่นต้องใช้เวลา 3 ชุด การเพิ่มวงจรมหาพีการเข้าไปก็มีอุปกรณ์เพิ่มไม่กี่ยิ่ง และเบอร์นี้เป็นไอซีเพียงตัวเดียวทำให้ลดปัญหาในการวางอุปกรณ์ การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบที่มีไมโครโพรเซสเซอร์ได้ โดยการเพิ่มอุปกรณ์ไม่กี่ยิ่ง

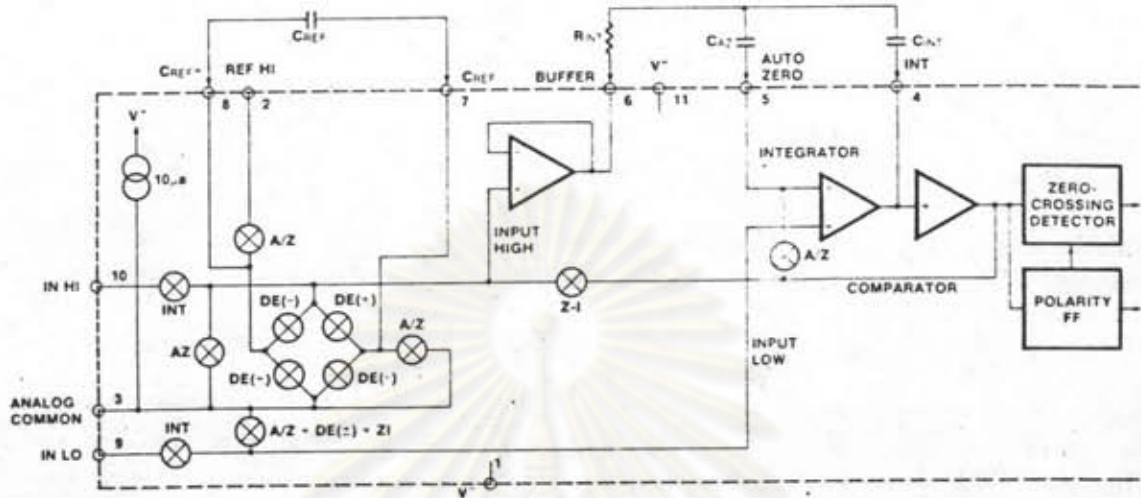
ในรูปที่ 3.13 แสดงส่วนประกอบภายในของ ICL 7135 ซึ่งแบ่งเป็นภาคอานาล็อกประกอบด้วยตัวรีฟิรียอเลคทรอนิกส์ 12 ตัว เพื่อควบคุมทิศทางของสัญญาณ บัฟเฟอร์ ตัวอินทิเกรต และตัวเปรียบเทียบ ภาคเชิงเลขนั้นประกอบด้วยวงจรตรวจสอบการตัดศูนย์ (Zero crossing detector) วงจรตรวจจับสัญญาณ (Polarity Flip-Flop) วงจรควบคุม วงจรนับ และวงจรผลิตเพื่อกสัญญาณออก หลักการทำงานจะคล้ายกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4.4 ข้อ ก. รายละเอียดของคุณสมบัติและข้อมูลค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

วงจรแปลงแอนะล็อกออกแบบสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

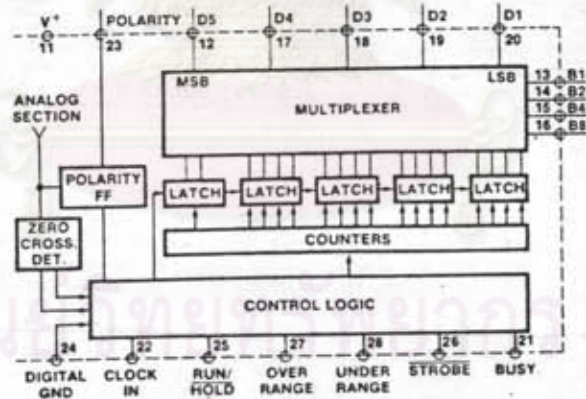
ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบไอซีแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต่าง ๆ

เบอร์ไอซี/ ผู้ผลิต	จำนวนตัวเลข	ช่วงแรงดัน ไฟเข้า	ความแม่นยำ	สัมประสิทธิ์ อุณหภูมิ	สัญญาณออก แสดงผล	แหล่งจ่ายไฟ	แรงดันอ้างอิง ภายใน	วงจรอื่น ๆ ที่ ต้องเพิ่มเติม
ICL 7135 Intersil	4½ หลัก	0-2 V.	<u>±</u> 1 digit	5 ppm/°C	BCD Multiplex	<u>±</u> 5V	ไม่มี	วงจร Clock
ICL 8052A/ 7103 A Intersil	4½ หลัก	0-2 V.	<u>±</u> 1 digit	15 ppm/°C	BCD Multiplex	5V <u>±</u> 15 V	1.5 V 40 ppm/°C	วงจร Clock
TL 500 C/ TL 503 Texas	4½ หลัก	0-2 V.	<u>±</u> 1 digit	6 ppm/°C	BCD Multiplex	5V <u>±</u> 12V	1.2 V 80 ppm/°C	ไม่มี

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ภาคอานาล็อก



ข. ภาคเชิงเลข

รูปที่ 3.13 แสดงส่วนประกอบภายในของไอซี 7135

IC1 เบอร์ LM 336H เป็นตัวสร้างแรงดันอ้างอิง 2.5 โวลต์ รายละเอียด ข้อมูลจากภาคผนวก ข. ความต้านทาน R1 จะกำหนดกระแสการทำงานของ IC1 ให้มีค่า 1 มิลลิแอมป์ ไตโอด D1, D2 และ VR1 จะเป็นวงจรขั้วต่อเพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์ อุณหภูมิต่ำที่สุด โดยการปรับ VR1 ให้ได้แรงดันออก 2.490 โวลต์ ความต้านทาน R2 และ VR2 จะลดแรงดันอ้างอิงลงให้เท่ากับ 1.0000 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับ IC2 C1 เป็น ตัวเก็บประจุในการอินทิเกรต เพื่อที่จะให้มีความถูกต้องในการวัดมากที่สุด ได้เลือกตัวเก็บประจุ ที่มีค่า dielectric absorption ต่ำ คือชนิด Polypropylene ความต้านทาน R4 ที่ต่ออนุกรมกับ C1 จะช่วยลดความไม่เชิงเส้น เมื่อแรงดันเข้ามีค่าน้อย ๆ R3 และ D3 จะลด Roll-over error ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างในการอ่านค่าแรงดันบวกและลบ ที่เท่ากัน ส่วนตัวเก็บประจุ C2 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุสำหรับปรับศูนย์อัตโนมัติ และ C3 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแรงดันอ้างอิง จะมีผลในการลดสัญญาณรบกวนด้วย จึงเลือกค่าที่มากขึ้น คือ $1 \mu\text{F}$ และ ใช้แบบ Polycarbonate ความต้านทาน R5 จะเป็นความต้านทานใน การอินทิเกรต ทางด้านจุดสัญญาณเข้าคือขา 9 และ 10 จะมีวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ผ่านแบบพาสซีฟ R6 และ C4 ซึ่งมีความถี่คัทออฟประมาณ 3 Hz

วงจรสัญญาณนาฬิกา ซึ่งใช้กำหนดช่วงเวลาในการลุ่มตัวอย่างและใช้ในการนับเพื่อให้ได้ตัวเลขแสดงผลนั้น ใช้ไอซีเบอร์ 4001 ร่วมกับ R8, C5, และ VR3 ความถี่ของ สัญญาณนาฬิกาเป็น 100 KHz ซึ่งด้วยความถี่นี้จะทำให้วงจรแปลงแอนะล็อก ทำการลุ่มตัวอย่าง 2.5 ครั้งต่อวินาที

สวิตช์ SW1 เมื่อ "ปิด" จะทำให้วงจรแปลงแอนะล็อกหยุดการทำงานและจะคงค่า (Hold) เองเอาไว้

สำหรับ R7, Q1 และ IC3 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขับเครื่องหมาย "-" ของวงจรแสดงผล สัญญาณออกอื่น ๆ ที่จะส่งไปยังภาคแสดงผลมี D1, D2, D3, D4, D5, B8, B4, B2 และ B1

เพื่อที่จะให้วงจรแปลงแอนะล็อก มีความแม่นยำและเสถียรภาพดีตลอดช่วงอุณหภูมิทำงาน 10 - 60 °C จึงเลือกใช้ความต้านทานชนิดเมทอลฟิล์ม ความผิดพลาด 1 % ส่วนความต้านทานแบบปรับค่าได้นั้น ใช้แบบปรับ 15 รอบ

3.6.3 การออกแบบวงจรแสดงผล

สัญญาณเชิงเลขที่ได้ออกมาจากวงจรแปลงเลขฐานสิบ จะเป็นรหัสและสัญญาณรหัสนี้ของแต่ละหลักจะถูกส่งออกมาในช่วงเวลาที่ต่างกัน การส่งออกไปใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์ ข้อมูลจากรูปที่ 3.14 สัญญาณ B1, B2, B4 และ B8 เป็นรหัส BCD ของตัวเลขแต่ละหลัก และสัญญาณ D1 - D5 เป็นสัญญาณบอกตำแหน่งของหลัก ซึ่งจะแสดง ดังนั้นวงจรแสดงผลจึงมีหน้าที่แปลงรหัส BCD ไปเป็นรหัส 7-บิต ดังแสดงในรูปที่ 3.15 IC4 เบอร์ 7447 จะทำหน้าที่แปลงรหัส และขับไดโอดเรืองแสง (LED) สำหรับการแสดงผลมัลติเพล็กซ์ ข้อมูลเพื่อส่งตัวเลขไปแสดงผลยังหลักที่ถูกต้อง จะใช้ทรานซิสเตอร์ Q2 - Q6 ทำการปิดเปิดการไหลของกระแสใน 7-Segment LED แต่ละตัว โดยใช้สัญญาณ D1 - D5 เป็นตัวควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ ความต้านทาน R10 - R15 กำหนดกระแสของแต่ละขั้ว ทรานซิสเตอร์ Q7 - Q8 ที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยให้การแสดงผลตัวเลข 6 และ 9 สัมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ในกรณีรหัสหลักที่ 5 คือ DS5 มีค่าเป็นศูนย์นั้น ขั้ว b และ c จะต้องดับ ซึ่งสามารถควบคุมโดย R19 และ Q9 จะทำให้ RBI ขั้ว 5 ของ IC4 เป็น "LOW" สัญญาณออกของ IC4 เป็น "HIGH" หมด ขั้ว b และ c จึงดับ

ความต้านทาน R9 จะกำหนดกระแสของเครื่องหมายวงกลม ความต้านทานทุกตัวใช้แบบคาร์บอนฟิล์ม ค่าผิดพลาด 5 % 1/4 วัตต์

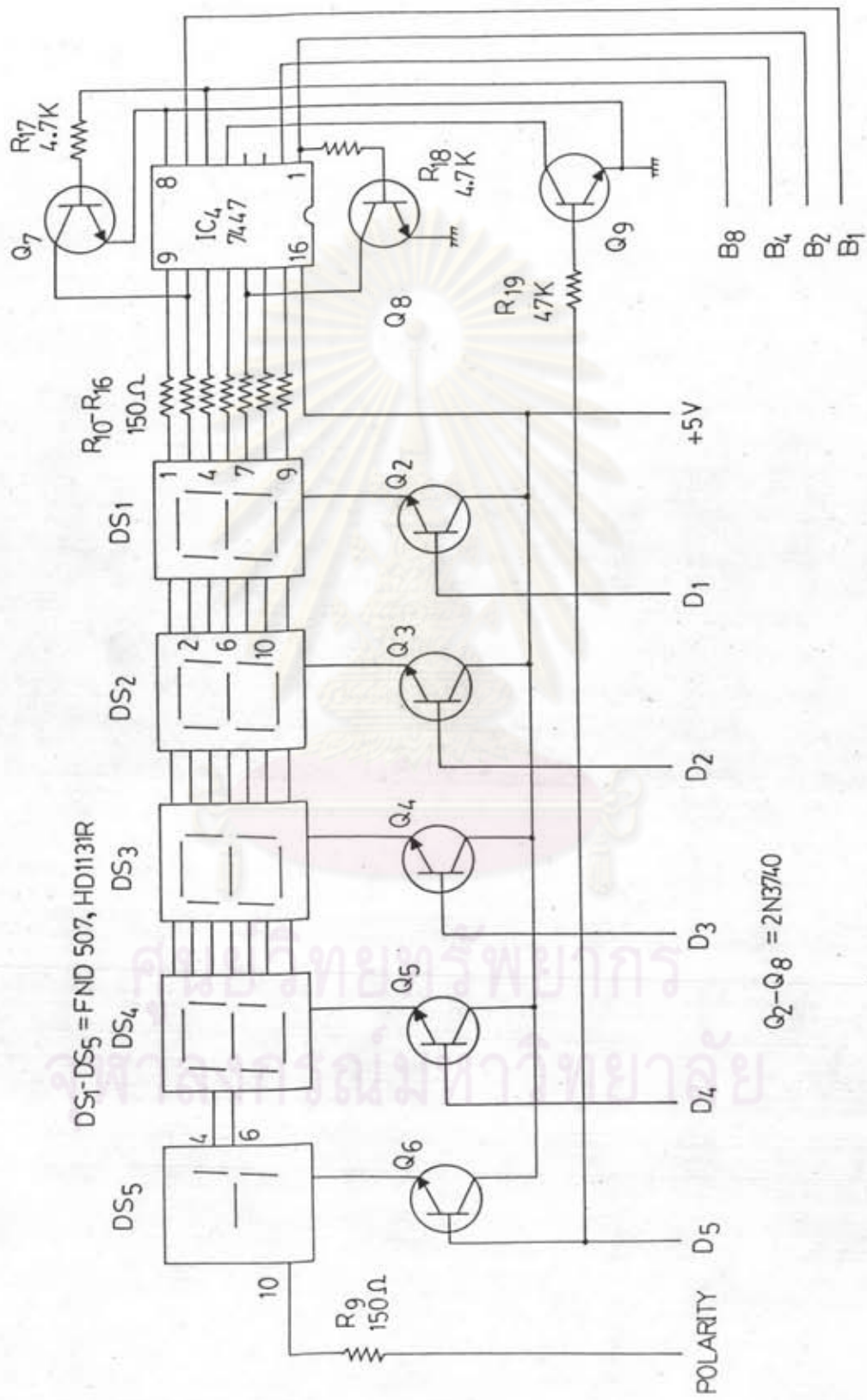
3.6.4 ผลการทดสอบภาคแสดงผลเชิงเลข

ก. ผลการทดสอบความแม่นยำในการวัด

ในการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟตรงมาตรฐานให้กับวงจรแสดงผลเชิงเลข และใช้คิตอสมัลติมิเตอร์ HP 3465 B พร้อม ๆ กัน ผลของการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ ค-4 ในภาคผนวก ค. จุดหุ้มนิยามะทดสอบ 28°C สำหรับความแม่นยำของมัลติมิเตอร์ HP 3465 B ในหุ้มนิยามะ 2V. เท่ากับ 0.02 %

จากตารางที่ ค.-4 จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดของวงจรแสดงผลเชิงเลข จากมัลติมิเตอร์ เท่ากับ 0.0001 โวลท์

ดังนั้นความแม่นยำของภาคแสดงผลเชิง เลขที่ออกแบบสร้าง



Q₂-Q₈ = 2N3740

รูปที่ 3.15 วงจรแปลงดิจิตอล

$$= \frac{0.0001}{2} \times 100 \% + 0.02 \%$$

$$= 0.025 \% \text{ ของ เต็มพิกัด}$$

ซึ่งค่าความแม่นยำที่ทดสอบได้นี้ ต่ำกว่าค่า 0.05 % ที่กำหนดไว้ใน 3.6.1 ข้อ ย.

ย. ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ในการทดสอบจะป้อนแรงดันจนเกือบจะเต็มพิกัดคือ 1.9960 โวลต์ให้วงจร แสดงผลเชิงเลข อุณหภูมิประมาณ 30°C จากนั้นเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง $10^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ ข้อมูลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ ค.-5 ในภาคผนวก ค.

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิในช่วง ($10^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$) สามารถคำนวณได้คือ

$$= \frac{(1.99873 - 1.9953) \times 10^6}{(60 - 10) \times 2} \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$$

$$= 34.3 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$$

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะน้อยกว่าค่า $\pm 50 \text{ ppm}$ ที่กำหนดไว้ใน 3.6.1 ข้อ ค. และภาคแสดงผลเชิงเลขนี้สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ ได้โดยไม่มีปัญหา

3.7 ภาคจ่ายไฟหลัก

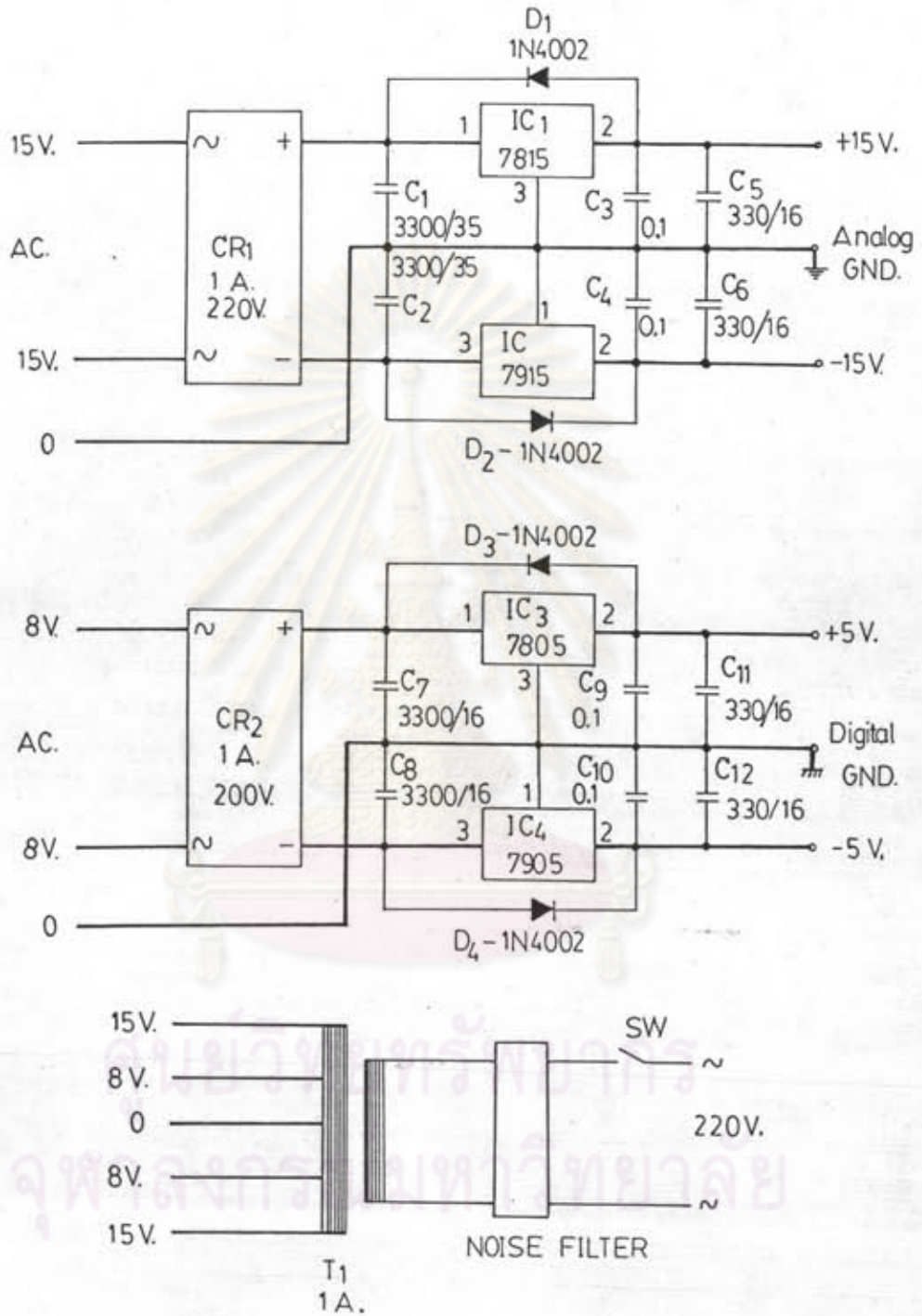
ภาคจ่ายไฟหลักจะทำหน้าที่แปลงไฟปลั๊ก 220 โวลต์ ให้เป็นไฟตรง เพื่อป้อนให้กับวงจรในภาคต่าง ๆ ดังนี้

ภาคจ่ายไฟป้อนโหลดเซลล์ ต้องการแรงดันไฟ $\pm 15 \text{ V}$, 200 mA

ภาคปรับสัญญาณต้องการแรงดันไฟ $\pm 15 \text{ V}$, 15 mA

ภาคแสดงผลเชิงเลขต้องการแรงดันไฟ $+ 5\text{V}$, 500 mA และแรงดันไฟ $- 5\text{V}$, 3mA

วงจรของภาคจ่ายไฟหลักแสดงไว้ในรูปที่ 3.16 CR1 เป็น Bridge rectifier แปลงไฟปลั๊ก 15 โวลต์เป็นไฟตรง กรองไฟให้เรียบด้วย C1, C2 แล้วผ่านไอซีคงค่าแรงดัน (Regulator) เบอร์ 7815 และ 7915 ได้แรงดันไฟออก ± 15 โวลต์ ส่วนแรงดันไฟปลั๊ก 8 โวลต์ ก็จะผ่านการแปลงเช่นเดียวกัน แต่ไอซีรักษาแรงดันใช้เบอร์ 7805 และ 7905 ทำให้ได้แรงดันออก ± 5 โวลต์ ไดโอด D1 - D4 เป็นตัวป้องกันความเสียหายของไอซี



รูปที่ 3.16 วงจรภาคจ่ายไฟหลัก

ค่าแรงดัน

ทางด้านไฟลึกลับ 220 โวลท์ เมื่อผ่านสวิตช์แล้ว ก่อนจะเข้าสู่หม้อแปลง จะต้องผ่านวงจรกรองสัญญาณรบกวน (Noise Filter) เสียก่อน

3.8 การประกอบเครื่อง

อินดิเคเตอร์ ที่ได้ออกแบบสร้าง ประกอบด้วยแผ่นวงจรทั้งหมด 5 แผ่นคือ

1. แผ่นวงจรหลัก ประกอบด้วย ภาควัดจ่ายไฟป้อนโพลตเซลล์ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ และวงจรความต้านทานลดแรงดัน

2. แผ่นวงจรภาควัดสัญญาณอินดิเคเตอร์เมนเตชั่น ซึ่งวางอยู่บนแผ่นวงจรหลัก

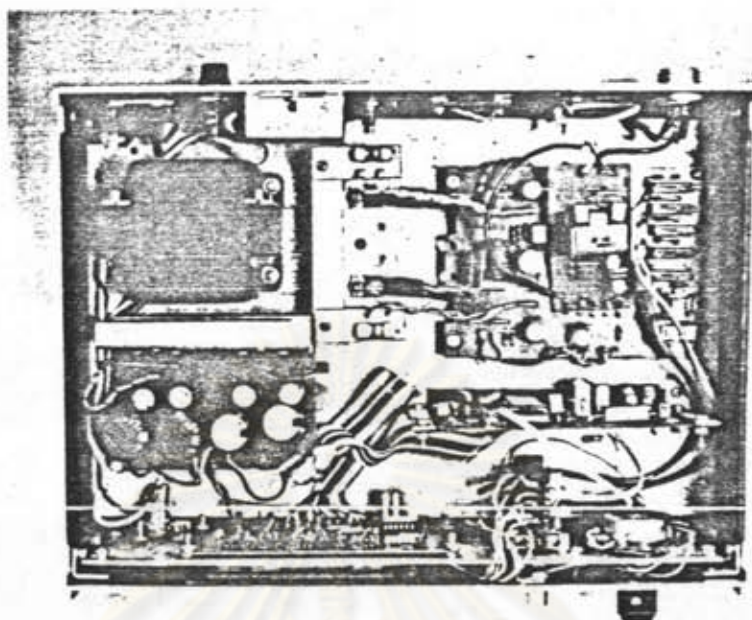
3. แผ่นวงจรของวงจรแปลงเอาต์

4. แผ่นวงจรของวงจรแสดงผล

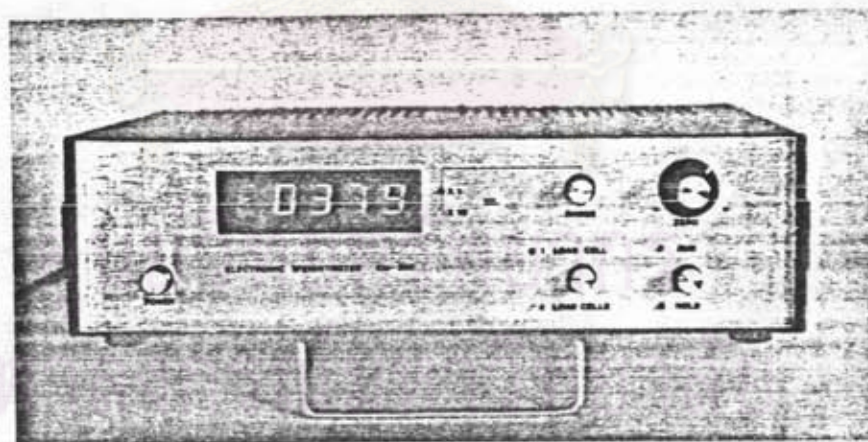
5. แผ่นวงจรภาควัดจ่ายไฟหลัก

ในรูปที่ 3.17 จะแสดงรายละเอียดภายในกล่อง ส่วนรูปที่ 3.18 จะแสดงด้านหน้าของกล่องอินดิเคเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 แสดงรายละเอียดภายในกล่องอินดิเคเตอร์



รูปที่ 3.18 แสดงด้านหน้าของกล่องอินดิเคเตอร์