หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ส่วนประกอบของโปเทนชิโอมิเตอร์กระแสสลับแบบโคออร์ดิเนต

4.1 ออสซิลเลเตอร์ (oscillator)

เป็นเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปออสซิลเลเตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

4.1.1 ส่วนบังคับความถี่ (tank or oscillatory)

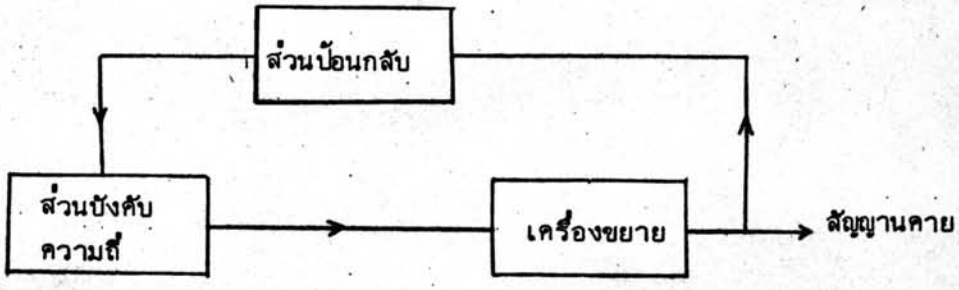
ความถี่ของไฟฟ้าสลับจะเกิดขึ้นที่ส่วนนี้ ตัวที่กำหนดความถี่นิยมใช้มีอยู่ 3 แบบ คือ L - C (inductance - capacitance) R - C (resistance - capacitance) และผลึก (cystral) ,

4.1.2 เครื่องขยาย (amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรบังคับความถี่

4.1.3 ส่วนป้อนกลับ (feedback)

ทำหน้าที่ดึงสัญญาณคาย (output signal) ส่วนหนึ่งจากเครื่องขยาย แล้วป้อนกลับไปยังวงจรบังคับความถี่ เป็นการชดเชยการสูญเสียพลังงานในส่วนนั้น ทั้งนี้จะทำให้การสั่น (oscillation) คงที่ ส่วนป้อนกลับสำหรับออสซิลเลเตอร์จะเป็นแบบบวก (positive feedback)



รูปที่ 4.1 แผนผังของออสซิลเลเตอร์

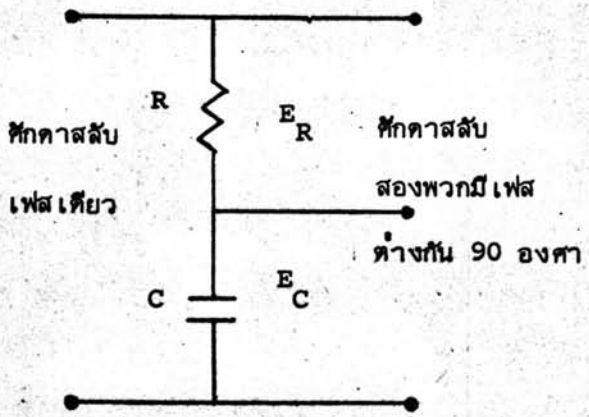
ในงานวิจัยนี้ใช้ออสซิลเลเตอร์ของ Tech Model 22 - D ซึ่งมีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

4.2 เครื่องขยาย (amplifier)

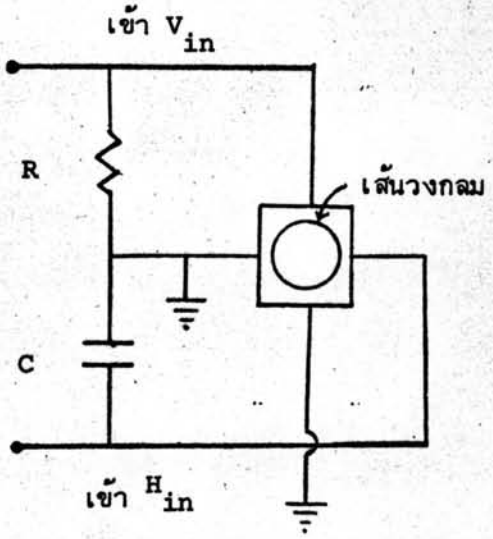
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณคลายจากออสซิลเลเตอร์ให้แรงขึ้น เครื่องขยายส่วนนี้จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้วงจรทั้งหมดต่อไป ในงานวิจัยใช้เครื่องขยายของ CENCO ความขัดป้อน (input impedance) 200 โอห์ม ความขัดคาย (output impedance) 5000 โอห์ม

4.3 เครื่องแยกเฟส (phase spilter)

จากหัวข้อ 2.1 ศักดาสลับเฟสเดี่ยวสามารถแยกออกมาเป็นศักดาสลับ 2 พวกที่มีเฟสต่างกัน 90 องศาได้ โดยใช้ตัวต้านทานตัวจุ ต่ออนุกรมกันเป็นตัวแยก ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 R - C เป็นตัวแยกเฟส



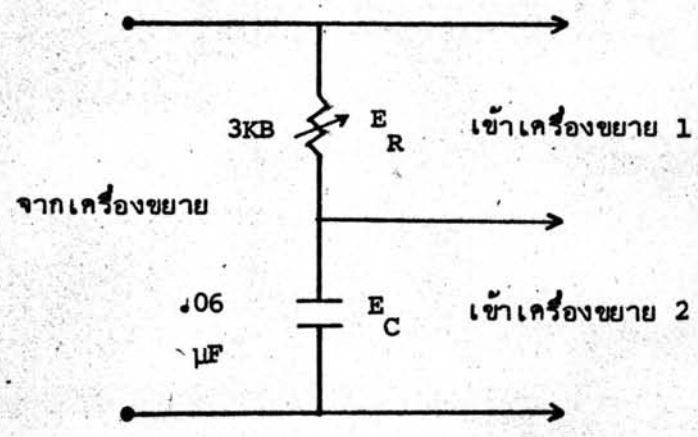
รูปที่ 4.3 เส้นวงกลมบนสโคปเมื่อ $R = \frac{1}{wc}$

เมื่อป้อนศักดาสลับเฟสเดียวให้ตัวต้านทานและตัวจุที่ต่ออนุกรมกัน จะได้ศักดาสลับออกมาเป็นสองพวกคือ E_R และ E_C ซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา และที่ความถี่ค่าคงที่ใด ๆ เมื่อจัดให้ความต้านทานตัวจุ (capacitive reactance) มีค่าเท่ากับความต้านทาน (reactance) หรือ $R = \frac{1}{wc}$ จะได้ขนาด (magnitude) ของ E_R เท่ากับ E_C เมื่อป้อน E_R และ E_C เข้าทางป้อนแนวตั้ง (vertical input) และป้อนแนวระดับ (horizontal input) ของออสซิลโลสโคปจะได้เส้นวงกลม (circular trace) ปรากฏบนจอออสซิลโลสโคป แต่ถ้า E_R ไม่เท่ากับ E_C จะได้รูปวงรี (ellipse)

นอกจากนี้เครื่องแยกเฟสอาจใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นอีกได้เช่น ใช้ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ แต่ไม่ค่อยนิยม เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำจะมีทั้งความต้านทานเหนี่ยวนำ (inductive reactance X_L) และความต้านทาน (reactance R) ทำให้เฟสที่แยกออกมาต่างกันน้อยกว่า 90 องศา

4.3.1 เครื่องแยกเฟสที่สร้างในงานวิจัย

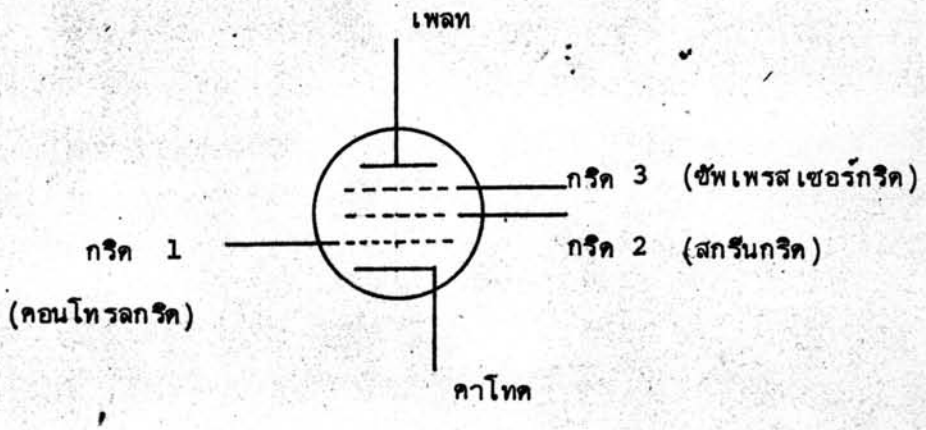
ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ (variable resistor) แบบถ่าน (carbon) ความต้านทาน 3 กิโลโอห์ม แบบ B และตัวจุใช้แบบไมลาร์ (mylar capacitor) ความจุ .06 ไมโครฟารัด จัดวงจรดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรเครื่องแยกเฟส

4.4 เครื่องขยาย 1 และเครื่องขยาย 2

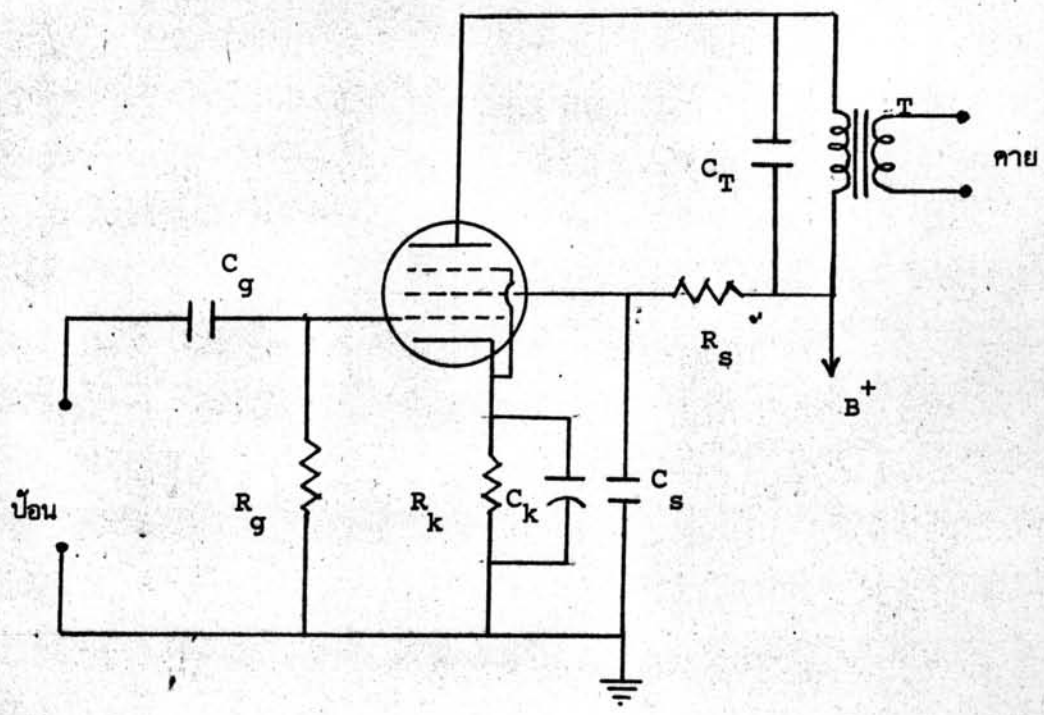
วงจรขยายส่วนนี้จะทำหน้าที่ขยายสัญญานจากเครื่องแยกเฟสให้แรงขึ้นจนเพียงพอแก่ความต้องการของวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายคือหลอดเพนโทด (pentode) ลักษณะแผนผังดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนผังหลอดเพนโทด

หลอดเพนโทนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (electrode) 5 ชนิด ประกอบด้วย

1. เพลทหรือแอโนด (plate or anode)
2. คาโทด (cathode)
3. คอนโทรลกริด หรือกริด 1 (control grid)
4. สกรีนกริด หรือกริด 2 (screen grid)
5. ซัพเพรสเซอร์กริดหรือกริด 3 (suppressor grid)



รูปที่ 4.6 วงจรขยายโดยใช้หลอดเพนโทด

จากรูปที่ 4.6 เป็นวงจรขยายโดยใช้หลอดเพนโทด หน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ

C_g ทำหน้าที่กั้นสัญญานไฟตรง (direct current) จากสัญญานป้อน แต่จะยอมให้เฉพาะสัญญานกระแสสลับ (alternating current) ผ่านไปได้

R_g ทำหน้าที่เป็นทางผ่าน (bypass) ของอิเลคตรอนที่มาสะสมที่กริด

R_k เรียกว่าตัวต้านทานคาโทด (cathode resistor) จะเกิดศักดาเมื่อมีกระแสเพลทไหลผ่าน

C_k เรียกว่าตัวจุทางผ่าน (bypass capacitor) ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสเพลทส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามสัญญานป้อน เพื่อให้ศักดาที่คร่อม R_k คงที่ ค่าความต้านทานตัวจุของที่สัญญานความถี่ป้อน จะต้องมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานของ R_k

R_s เรียกว่าตัวต้านทานสกรีน (screen grid resistor) เนื่องจากต้องใช้ไฟตรงป้อนเลี้ยงตัวสกรีนกริดและเพลทจากแหล่งจ่ายไฟตรงเดียวกัน ดังนั้นในวงจรสกรีนจึงต้องมี R_s ต่ออยู่ เมื่อมีกระแสสกรีนไหลผ่าน จะเกิดศักดาคร่อม R_s เป็นผลให้ศักดาที่สกรีนต่ำกว่าที่เพลท ส่วน C_s ช่วยรักษาศักดาที่สกรีนกริดให้คงที่

การนำสัญญาณจากเพลทเพื่อเป็นสัญญาณคาย ใช้หม้อแปลงคาย T (output transformer) โดยขดปฐมภูมิ (primary) ทำหน้าที่เป็นโหลดของวงจรเพลท การเปลี่ยนแปลงกระแสเพลท จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสทางขดทุติยภูมิ (secondary) ซึ่งเป็นส่วนคายของวงจรขยายนี้

C_T เป็นตัวจูนทำหน้าที่จูน (tune) ให้เกิดอภินาท (resonance) กับขดปฐมภูมิของ T ที่ความถี่ที่ต้องการ และเป็นทางผ่านของสัญญาณความถี่อื่นที่ไม่ต้องการ

4.4.1 <u>เครื่องขยายที่สร้างในงานวิจัย</u>

เครื่องขยายที่สร้างในงานวิจัยนี้ใช้หลอดเพนโทดเบอร์ EL 84 (power amp. pentode) จากสมุดคู่มือหลอดจะทราบคุณสมบัติประจำตัวของหลอดเบอร์นี้ตามตารางที่ 4.1

Type EL 84	Heater		Volt			Current (mA)		r_a	g_m	R_K	R_L	Power (w)	D %	Base
	Volt	Amp	Anode	Screen	Grid	Anode	Screen	Ω	mA/V	Ω	Ω	output		
(P)	6.3	.75	250	250	-7.3	48	5.5	38,000	11	135	5,200	5.7	10	B9A

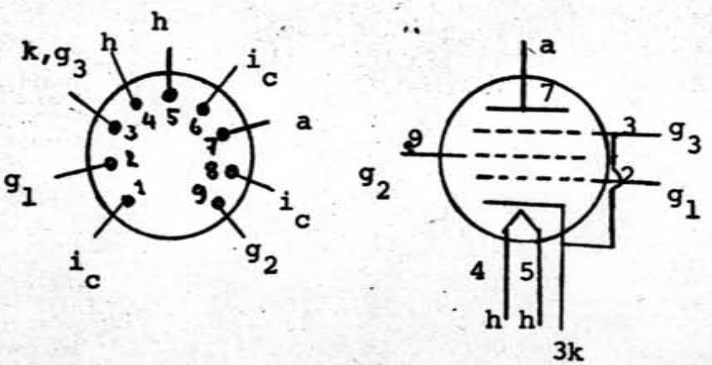
r_a = Anode a.c. resistor

g_m = Mutual conductance

R_k = Cathode bias resistor

R_L = Optimum load resistor

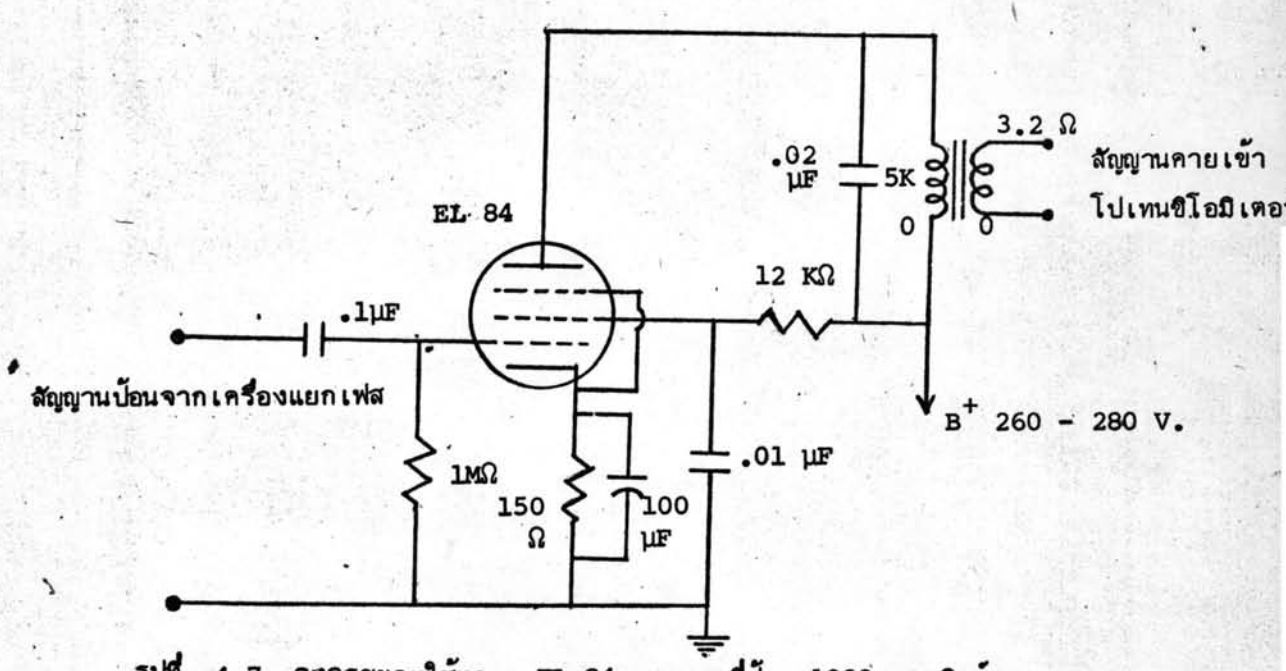
D = Distortion



Base B9A

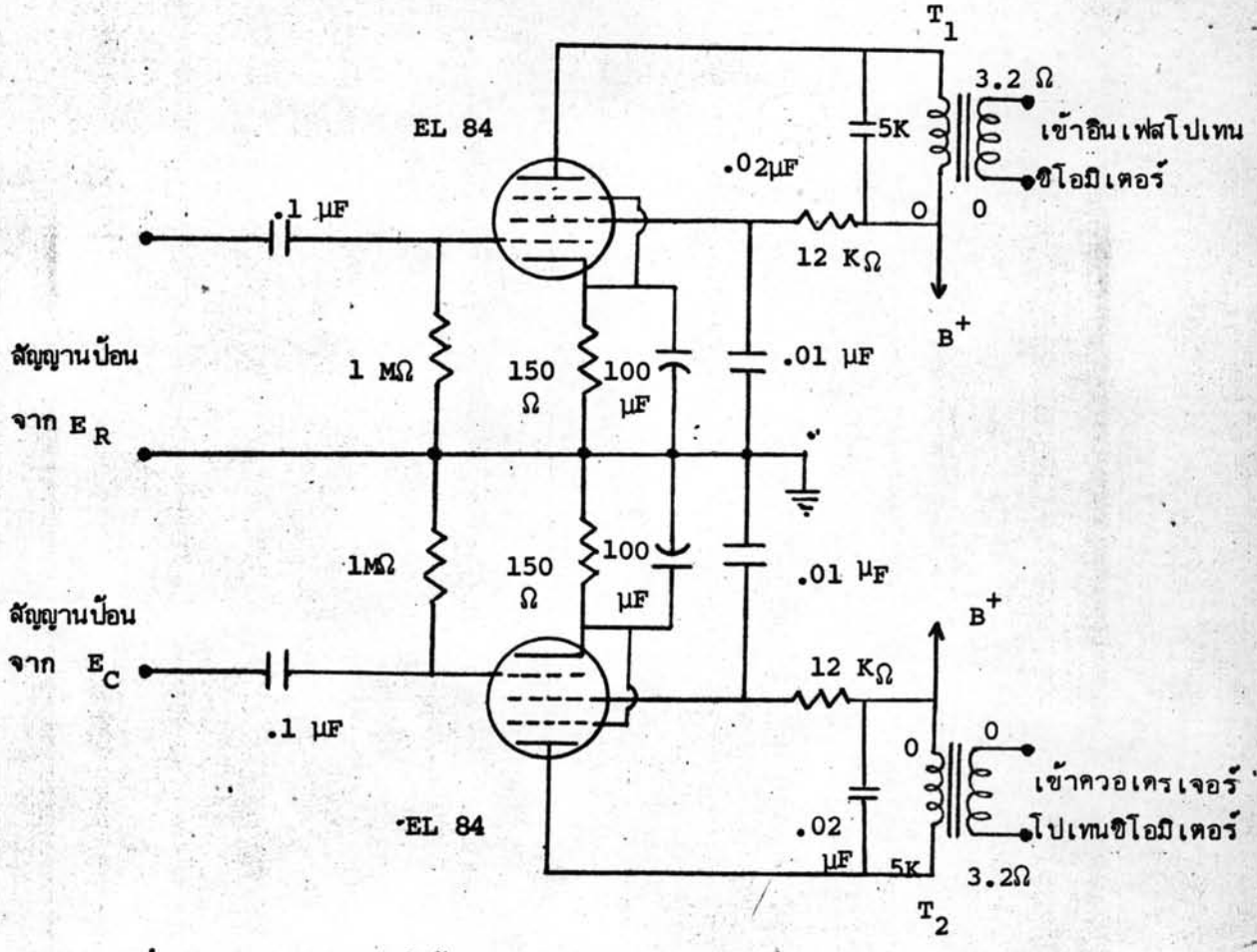
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติประจำตัวของหลอด EL 84

จากค่าต่าง ๆ ในตาราง เมื่อสร้างวงจรขยายโดยใช้วงจรขยายรูปที่ 4.6 โดยจัดค่า R T และ C ให้พอเหมาะ เพื่อให้หลอด EL 84 ทำหน้าที่ขยายโดยมีความเพี้ยนของสัญญานความถี่ 1000 เฮิทซ์น้อยที่สุด ทั้งนี้อาจมีการดัดแปลงบางส่วนบ้าง วงจรขยายที่สร้างขึ้นพร้อมค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วงจรขยายใช้หลอด EL 84 ความถี่ป้อน 1000 เฮิทซ์

เนื่องจากสัญญานป้อนมีสองพวกคือ E_R และ E_C จากเครื่องแยกเฟส ดังนั้นจึงต้องสร้างเครื่องขยายสองชุดเพื่อขยาย E_R และ E_C แยกจากกัน สวงจรที่สร้างเหมือนเดิมทุกประการ เมื่อเขียนวงจรทั้งคู่พร้อมกันจะได้ดังรูปที่ 4.8



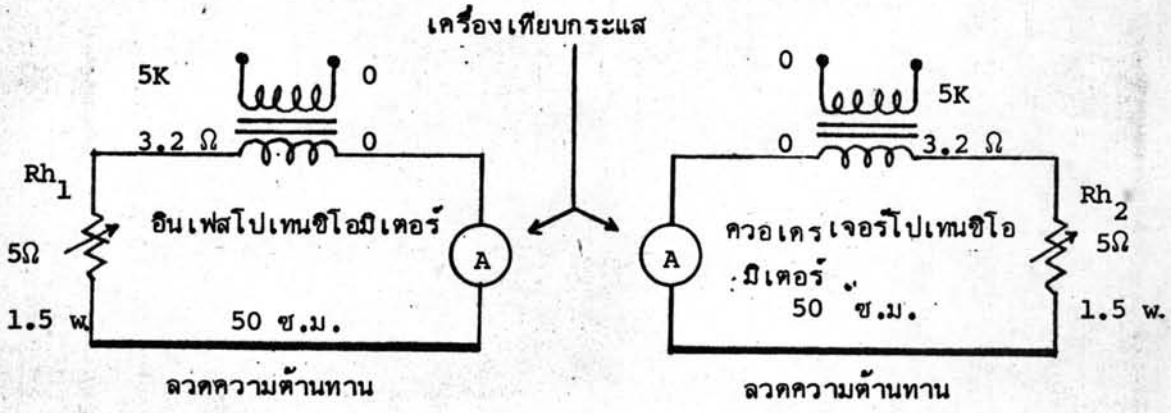
รูปที่ 4.8 วงจรขยายคู่ใช้หลอด EL 84

สัญญานคายที่ได้จากขดทุติยภูมิของหม้อแปลงคาย จะเป็นตัวเลี้ยงวงจรอินเฟสและควอเดรเจอร์โปเทนชิโอมิเตอร์ เนื่องจาก E_R และ E_C มีเฟสต่างกัน 90 องศา ดังนั้นสัญญานคายจากเครื่องขยายทั้งสองก็จะมีเฟสต่างกัน 90 องศาด้วย

4.5 วงจรโปเทนชิโอมิเตอร์

ทั้งอินเฟสโปเทนชิโอมิเตอร์และควอเดรเจอร์โปเทนชิโอมิเตอร์มีส่วนประกอบเหมือนกันทุกประการ คือประกอบด้วย ความต้านทานปรับค่าได้ Rh เครื่องเทียบกระแส A (current comparator) และลวดความต้านทาน (resistance wire) อุปกรณ์ทั้งสามต่ออนุกรมกัน ปลายทั้งสองของวงจรต่อเข้ากับขดทุติยภูมิของหม้อแปลงคายของเครื่องขยาย วงจรโปเทนชิโอมิเตอร์

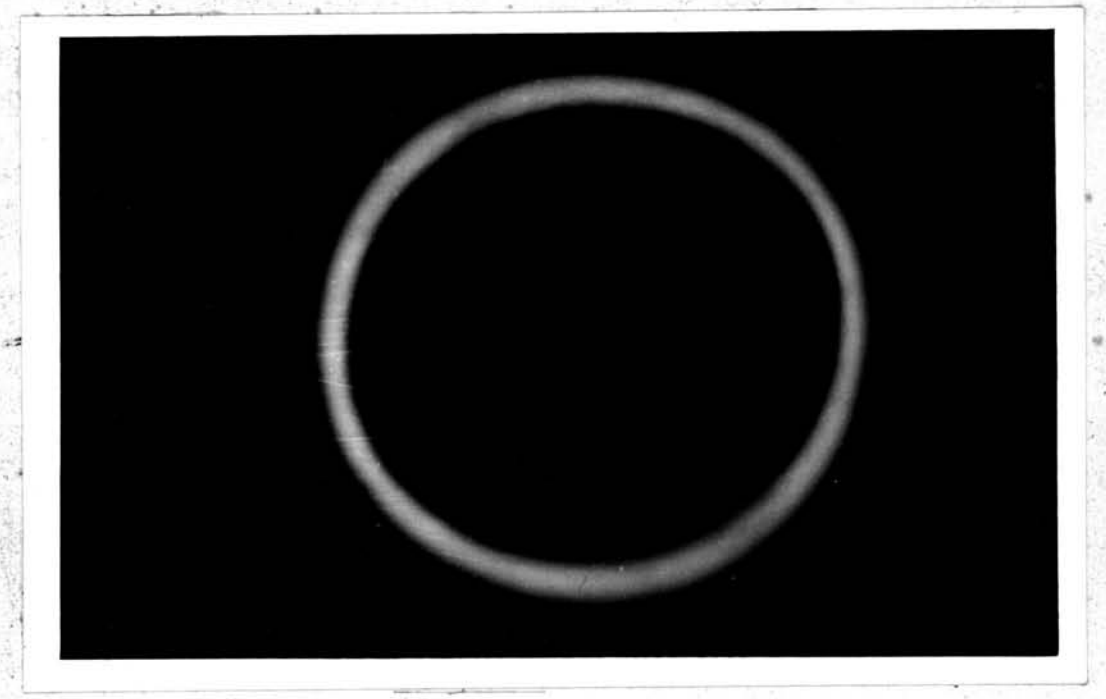
ที่สร้างขึ้นมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ทั้งสอง

เมื่อมีกระแสไหลในวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ จะมีศักดาสลับคร่อมลวดความต้านทานซึ่งมีค่าประมาณ 6 โอห์ม ในการสร้างใช้ลวดนิโครม (nichrome) เบอร์ 28 ยาว 50 เซ็นติเมตร Rh ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดกระแสในวงจร เมื่อกระแสเปลี่ยนไปทำให้ศักดาคร่อมลวดความต้านทานเปลี่ยนไปด้วย A คือเครื่องเทียบกระแสใช้ในการทำมาตรฐาน (standardization) เครื่องนี้จะทำหน้าที่เทียบกระแสตรง และกระแสสลับ อาร์.เอ็ม.เอส. (r.m.s. current) การทำมาตรฐานนี้จะใช้เซลมาตรฐาน (standard cell) เป็นตัวกำหนดศักดาสลับในวงจร ซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

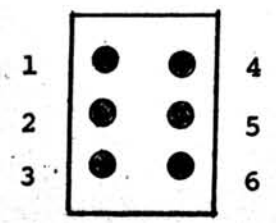
เมื่อใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดูเฟสของศักดาสลับที่คร่อมลวดความต้านทานของโปเทนชิโอมิเตอร์ทั้งสอง จะได้เส้น (trace) บนจอดังรูปที่ 4.10



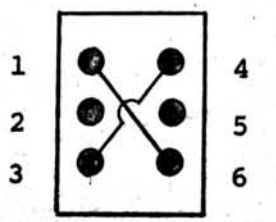
รูปที่ 4.10 เส้นบนจอออสซิลโลสโคปแสดงเฟสต่างกัน 90 องศา

4.6 การใช้สวิทช์ผันกลับ (reversing switch) เป็นตัวกลับเครื่องหมายศักดาสลับที่คร่อมลวดความต้านทานของโปเทนชิโอมิเตอร์

การสร้างสวิทช์ผันกลับทำได้โดยใช้สวิทช์สองขั้วสองทาง (DPDT = double pole double throw) ดังรูปที่ 4.11 ก.



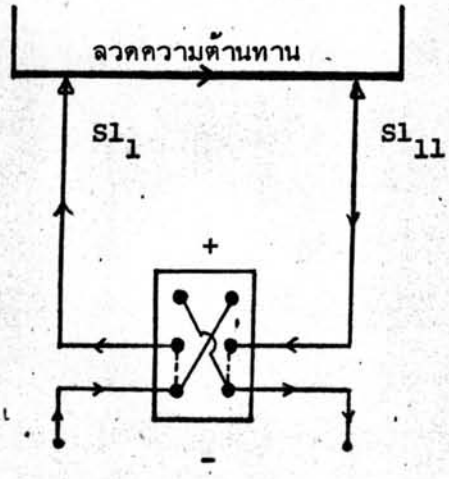
รูปที่ 4.11 ก. สวิทช์สองขั้วสองทาง



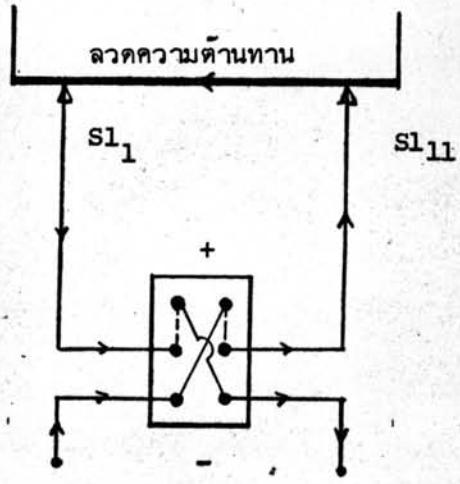
รูปที่ 4.11 ข. สวิทช์ผันกลับ

ปกติสวิทช์แบบสองขั้วสองทางมี 6 ขา คันโยกสวิทช์อยู่เหนือขา 2 และ 5 เมื่อโยกสวิทช์ขึ้น ขา 2 จะต่อกับขา 3 ขา 5 จะต่อกับขา 6 และเมื่อโยกสวิทช์ลง ขา 2 จะต่อกับขา 1 และขา 5 จะต่อกับขา 4 เมื่อนำมาทำเป็นสวิทช์ผันกลับ ทำได้โดยใช้สายไฟต่อขา 1 กับขา 6 และขา 3 กับขา 4 ดังรูปที่ 4.11 ข.

การนำไปใช้งานร่วมกับวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ให้ต่อดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ก. เมื่อโยกสวิทช์ขึ้น

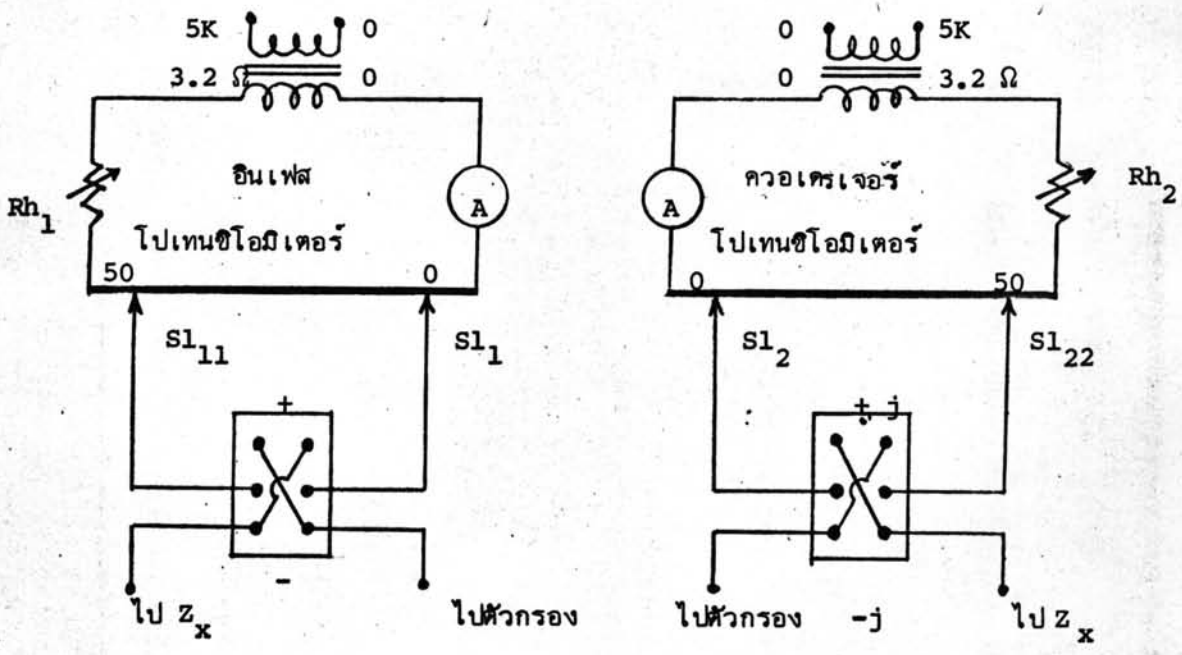


รูปที่ 4.12 ข. เมื่อโยกสวิทช์ลง

รูปที่ 4.12 ก. แสดงการโยกสวิทช์ขึ้นให้ศักดาสลับที่จุด Sl_1 เทียบกับ Sl_{11} โดยกำหนดให้เครื่องหมายของศักดาสลับเป็นบวกบนแกนพิกัดฉาก (coordinate axis)

รูปที่ 4.12 ข. แสดงการโยกสวิทช์ลงให้ศักดาสลับที่จุด Sl_{11} เทียบกับ Sl_1 โดยกำหนดให้เครื่องหมายของศักดาสลับเป็นลบบนแกนพิกัดฉาก (coordinate axis)

เมื่อนำสวิทช์ผันกลับประกอบเข้ากับวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์จะมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การใช้สวิทช์ผันกลับร่วมกับวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์

4.7 เครื่องเทียบกระแส (current comparator)

การเทียบกระแสตรงและกระแสสลับนั้น อาศัยหลักที่ว่า "ถ้ากระแสสลับไหลผ่านตัวต้านทานตัวหนึ่ง แล้วให้ความร้อนเท่ากับกระแสตรงที่ไหลผ่านตัวต้านทานตัวเดียวกันนั้น ให้ถือว่ากระแสสลับจำนวนนั้นมีค่าเท่ากับกระแสตรงจำนวนนั้น"

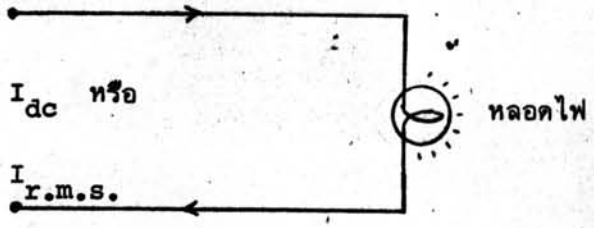
จาก 2.5.3 เขียนเป็นสมการได้ว่า $I_{dc} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

เมื่อ I_o เป็นค่าสูงสุดของกระแสสลับ $i = I_o \sin\theta$

$\frac{I_o}{\sqrt{2}}$ เรียกว่า $I_{r.m.s.}$ ของกระแส (r.m.s. = root mean square)

4.7.1 การเปลี่ยนความร้อนให้เป็นแสงสว่าง

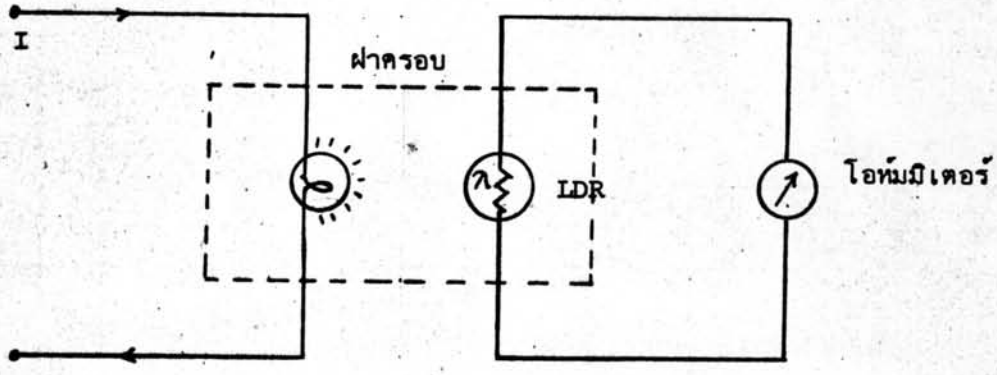
ทำได้โดยใช้หลอดไฟชนิดมีไส้ (incandescent lamp) เมื่อมีกระแสตรงหรือกระแสสลับไหลผ่านไส้หลอด ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีความต้านทานค่าหนึ่ง จะเกิดความร้อนทำให้ไส้หลอดแดง เกิดแสงสว่างออกมา ความเข้มแสงจะมากหรือน้อยขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่าน



รูปที่ 4.14 กระแสไหลผ่านไส้หลอดทำให้เกิดแสงสว่าง

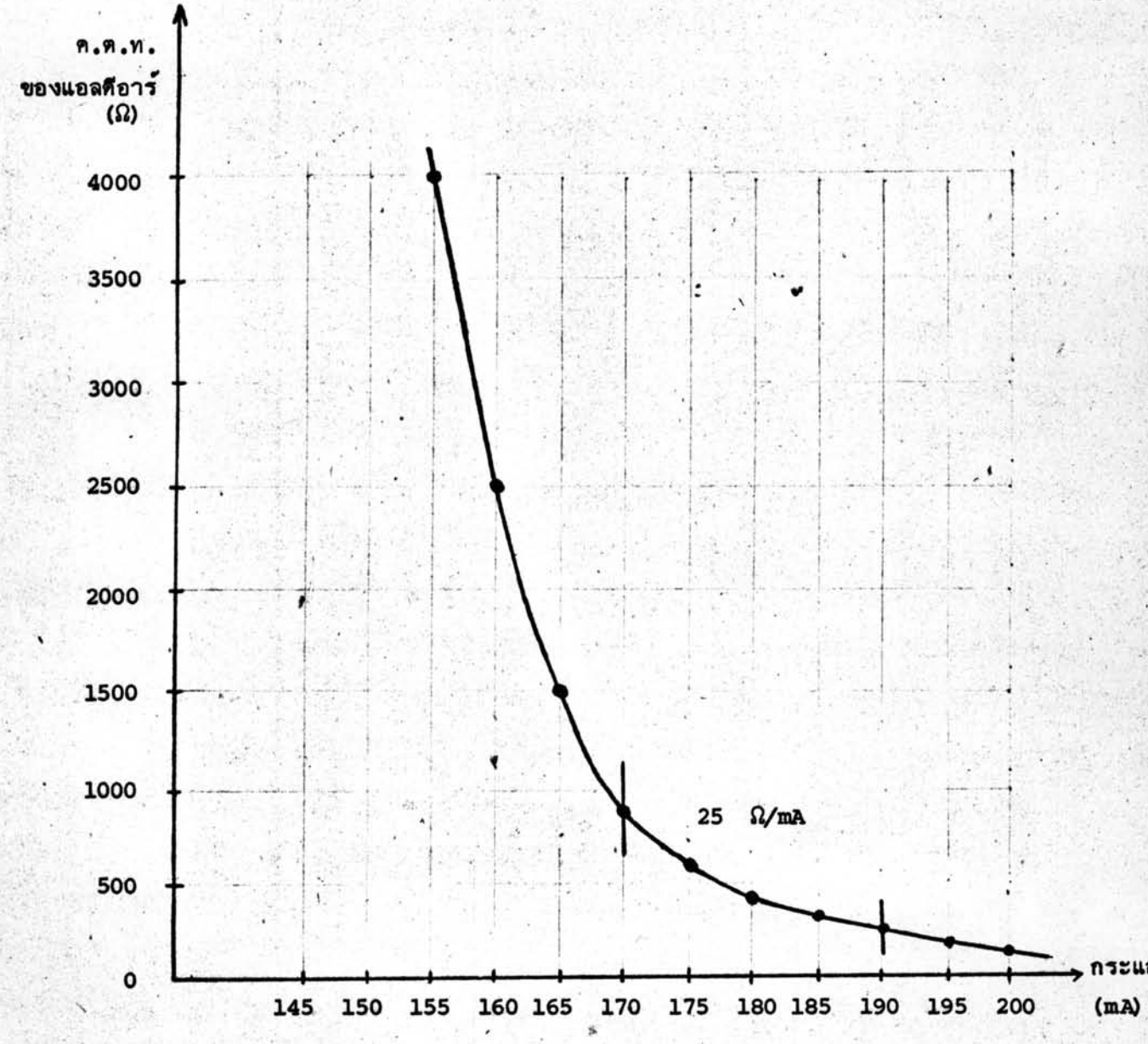
4.7.2 แอล ดี อาร์ (LDR = light dependent resistor)

เป็นตัวต้านทานที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำจำพวกแคดเมี่ยมซัลไฟด์ เมื่อแอล ดี อาร์ ได้รับพลังงานแสงสว่างจะทำให้วาเลนซ์อิเลคตรอนของสารกึ่งตัวนำเกิดการแตกของบอนด์ (bond) ได้อิเลคตรอน (electron) และโฮล (hole) เกิดขึ้น ทำให้ความต้านทานของแอล ดี อาร์ ลดลง จึงถือได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสว่างทำให้ความต้านทานของแอล ดี อาร์ เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.15 วงจรวัดกระแสโดยใช้แอล ดี อาร์ และโอห์มมิเตอร์

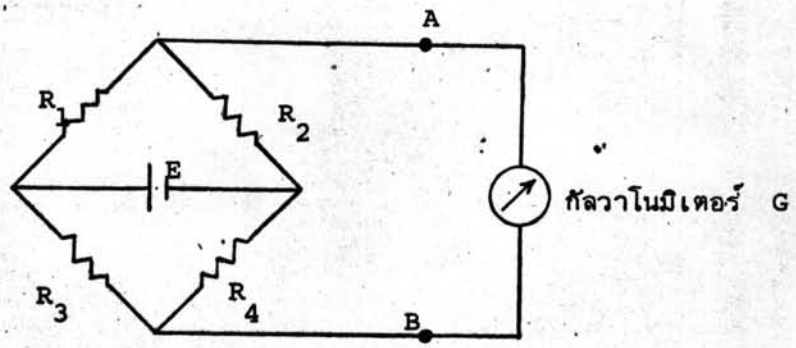
I 15579748



รูปที่ 4.16 กราฟระหว่างกระแสที่ผ่านหลอดกับความต้านทานของแอล ดี อาร์

4.7.3 วงจรวีทสโตนบริดจส์เมื่ออยู่ในภาวะไม่สมดุลย์

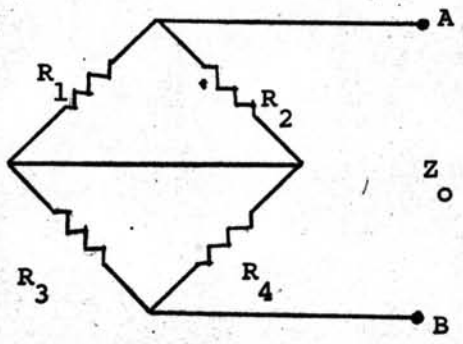
วงจรวีทสโตนบริดจส์ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัว มีความต้านทาน R_1 R_2 R_3 R_4 ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 วงจรวีทสโตนบริดจส์

กระแสที่ไหลผ่านกัลวาโนมิเตอร์ หาได้โดยใช้วงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin's equivalent circuit) ตามขั้นตอนดังนี้

1. หาความขัด (impedance) Z_o ของวงจรบริดจส์เมื่อมองจาก AB เข้าไป เทคนิคการหาให้ตัด E ออกแล้วลัดวงจรดังรูปที่ 4.18

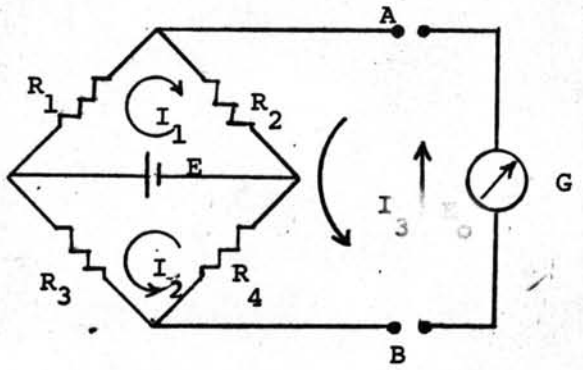


รูปที่ 4.18 วงจรวีทสโตนบริดจส์เมื่อใช้หาความขัด

จะได้ว่า $Z_o = R_1 // R_2 + R_3 // R_4$

$$= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

2. หาแหล่งจ่ายไฟสมมูล (equivalent source) E_o ระหว่างจุด A B โดยใช้วิธีแมกซ์เวลล์เมส (Maxwell's mesh method)



รูปที่ 4.19 วงจรวีทสโตนบริดจ์เมื่อใช้หา E_o

ในวง (loop) 1, $E = I_1 (R_1 + R_2) + I_3 R_2$

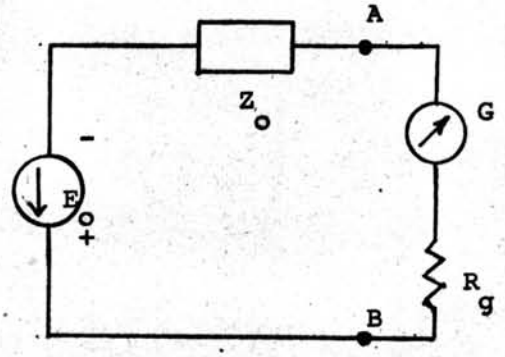
ในวง (loop) 2, $E = I_2 (R_3 + R_4) - I_3 R_4$

ในวง (loop) 3, $0 = I_1 R_2 + I_3 (R_2 + R_4) - I_2 R_4 + E_o$

เนื่องจากวง 3 เป็นวงเปิด (open loop) $I_3 = 0$

ดังนั้น $E_o = \frac{R_4 E}{R_3 + R_4} - \frac{R_2 E}{R_1 + R_2}$

วงจรสมมูลจึงเขียนได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของวีทสโตนบริดจ์

กระแสที่ผ่าน G $I_g = \dfrac{E_o}{Z_o + R_g}$

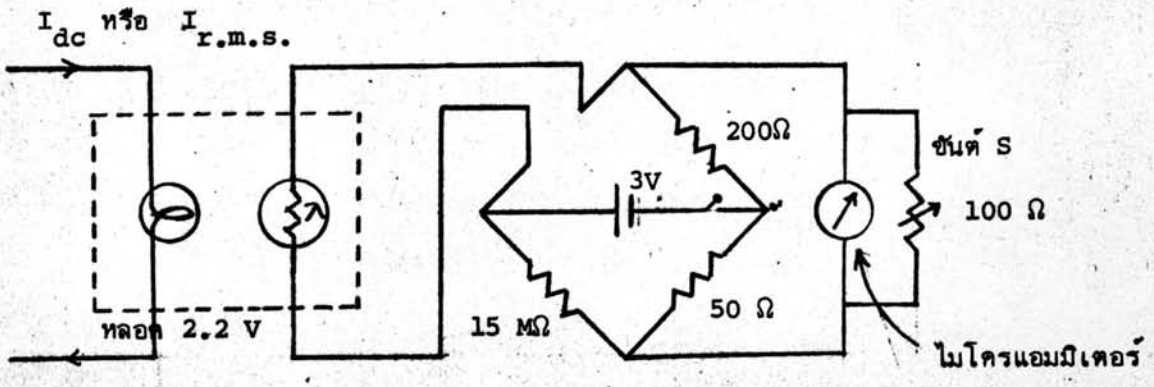
$$= \frac{(R_1R_4 - R_2R_3)\,E}{R_1R_2R_3 + R_2R_3R_4 + R_4R_1R_2 + R_g(R_1+R_2)(R_3+R_4) + R_3R_4R_1}$$

เมื่อบริดจ์อยู่ในสมดุลคือ $I_g = 0$

หรือ $R_1R_4 = R_2R_3$

จะเห็นว่า ถ้าความต้านทานค่าใดค่าหนึ่งเปลี่ยนไป จะทำให้บริดจ์ไม่สมดุลย์ มีกระแสไหลผ่าน G

4.7.4 การใช้หลอดไฟ - แอล ดี อาร์ - และวงจรวีทสโตนบริดจส์ ทำเป็นเครื่องเทียบกระแส



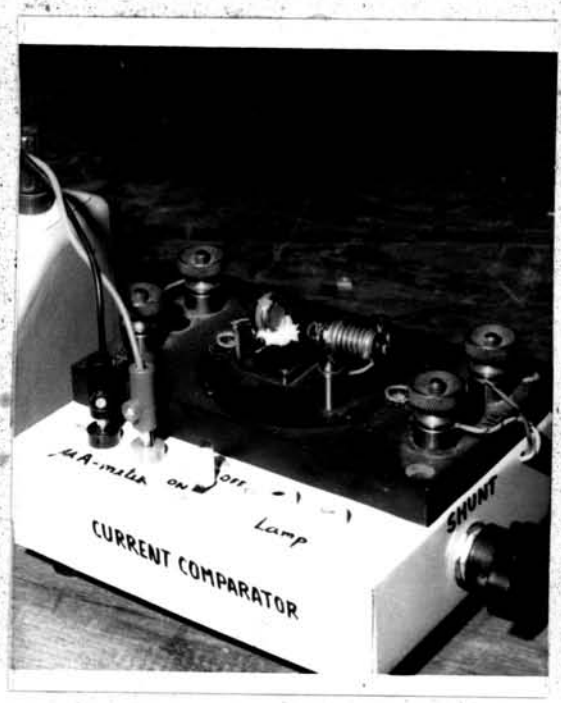
รูปที่ 4.21 วงจรเครื่องเทียบกระแส

รายละเอียดวงจรเครื่องเทียบกระแส ดังรูปที่ 4.21 ในวงจรบริดจส์แทนความต้านทาน R_1 ด้วย แอล ดี อาร์ ของฟิลลิปส์ หลอดไฟและแอล ดี อาร์ อยู่ในที่มืดโดยมีฝาครอบไว้ เพื่อป้องกันแสงสว่างจากภายนอกรบกวน ดังนั้นแอล ดี อาร์ จึงได้รับความเข้มแสงจากหลอดไฟแต่เพียงอย่างเดียว

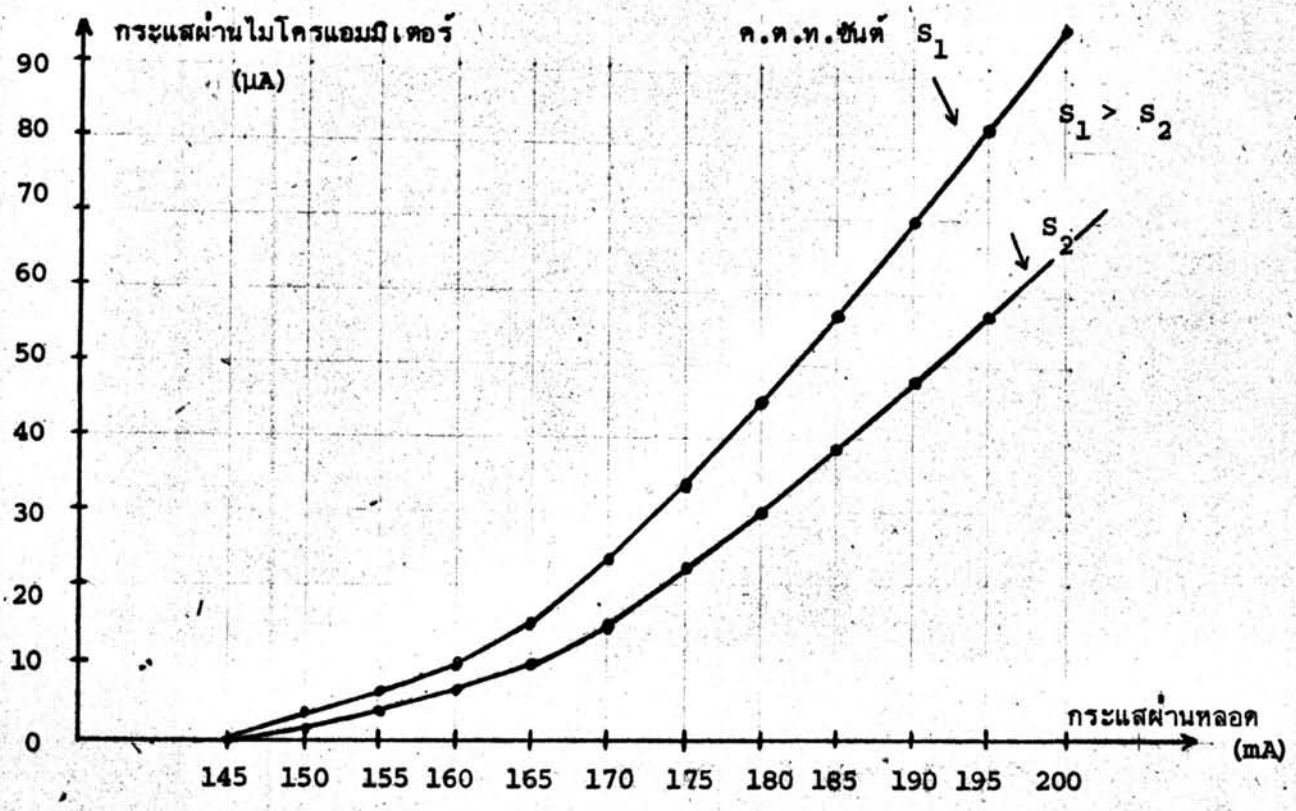
การใช้เครื่องมือนี้ ขั้นแรกเมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านหลอดไฟ หลอดจะมืด วงจรบริดจส์อยู่ในภาวะสมดุลย์ ดูได้จากไมโครแอมมิเตอร์ เมื่อปล่อยกระแสที่ต้องการเปรียบเทียบผ่านไส้หลอด หลอดจะสว่าง ความเข้มแสงทำให้ความต้านทานของแอล ดี อาร์ เปลี่ยนไป บริดจส์จึงไม่สมดุลย์ มีกระแสไหลผ่านไมโครแอมมิเตอร์

การเทียบกระแสตรงและกระแสสลับว่าเท่ากันหรือไม่ โดยปล่อยกระแสแต่ละชนิดผ่านหลอดไฟทีละครั้ง ถ้าเข็มของไมโครแอมมิเตอร์ชี้ที่ตำแหน่งเดียวกัน แสดงว่า กระแสตรงและกระแสสลับมีค่าเท่ากัน

รูปที่ 4.22 เครื่องเทียบกระแสภายนอก



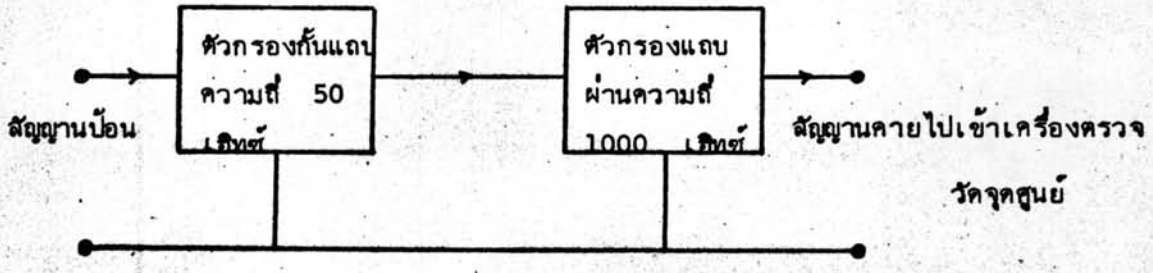
รูปที่ 4.23 เปิดให้เห็นแอล ดี อาร์ และหลอดไฟ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงกระแสที่ผ่านหลอดกับกระแสที่ผ่านไมโครแอมมิเตอร์

4.8 ตัวกรอง (filter)

เนื่องจากศักดาสลับในวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ทั้งสองกับศักดาสลับของวงจรที่จะวัดมีความถี่เดียวกัน ในการทำศักดาสลับให้สมดุลย์ จึงทำแต่เฉพาะความถี่ 1000 เฮิทซ์เท่านั้น แต่จริง ๆ แล้ว จะมีความถี่อื่น ๆ มารบกวน เช่นความถี่ 50 เฮิทซ์ และความถี่ฮาร์โมนิค (harmonic) ดังนั้น จึงต้องใช้ตัวกรองเพื่อตัดสัญญานรบกวน ซึ่งจะปรากฏชัดในขณะที่ใกล้จุดสมดุลย์



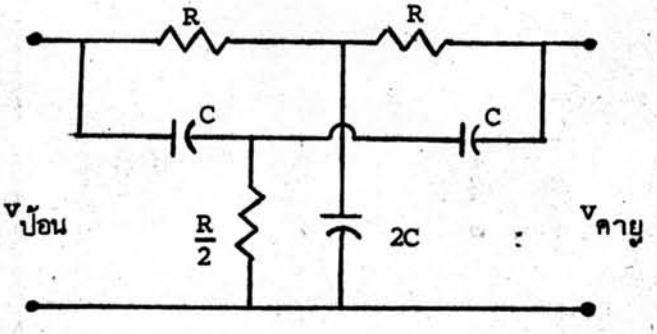
รูปที่ 4.25 แผนผังตัวกรอง

ตัวกรองที่จะสร้างมี 2 พวกคือ

1. ตัวกรองกันแถบ (band reject filter) ที่ความถี่ศูนย์กลาง 50 เฮิทซ์
2. ตัวกรองแถบผ่าน (band pass filter) ที่ความถี่ศูนย์กลาง 1000 เฮิทซ์

ตัวกรองทั้งสองแบบสามารถสร้างขึ้นได้จากการใช้ ไอซี ออปแอมป์ (IC op-amp) และตัวกรองทวินที (twin-t filter) ประกอบกันโดยที่ทวินทีจะทำหน้าที่เป็นตัวป้อน (input) หรือตัวป้อนกลับ (feedback) ของออฟแอมป์ และความชัดจะเปลี่ยนไป เมื่อความถี่เปลี่ยนไป เป็นผลให้อัตราขยายเมื่อวงปิด (closed loop gain) เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสัญญานที่ความถี่ค่าหนึ่งอาจถูกขยายมากน้อย หรือไม่ถูกขยายเลย ตัวกรองแบบนี้ เรียกว่า ตัวกรองแบบกัมมันต์ (active filter)

4.8.1 ตัวกรองทวินที (twin - t filter)



รูปที่ 4.26 วงจรกรองทวินที

ทวินทีมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 4.26 ประกอบด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter) (C, C, $\frac{R}{2}$) ต่อขนานกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) (R, R, 2C) ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณป้อนและสัญญาณคายคือ

$$\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}} = \frac{1 - w^2R^2C^2}{1 - w^2R^2C^2 + j\,4\,wRC}$$

ถ้าให้ $w_o = \frac{1}{RC}$ หรือ $f_o = \frac{1}{2\pi RC}$ จะได้ว่า

$$\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}} = \frac{1 - (\frac{w}{w_o})^2}{1 - (\frac{w}{w_o})^2 + j4(\frac{w}{w_o})} = \frac{1 - (\frac{f}{f_o})^2}{1 - (\frac{f}{f_o})^2 + j4\,(\frac{f}{f_o})}$$

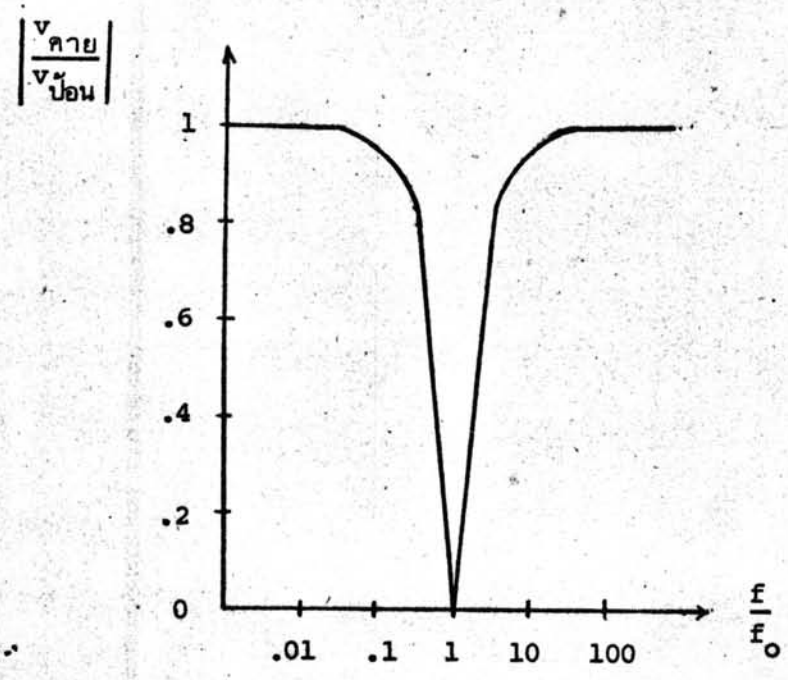
จะเห็นว่าที่ความถี่อนินาท f_o (resonance frequency) $v_{คาย} = 0$ นั่นคือ ค่าความขัด (impedance) ของทวินทีมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ f_o

ดังนั้นเมื่อเราทวินดีไปใช้เป็นตัวป้อนกลับ (feedback) ของออปแอมป์ จึงได้อัตราขยาย (gain) สูงสุดที่ความถี่ f_o และเริ่มลดลงที่ความถี่ใกล้ ๆ f_o เนื่องจากความชัดลดลง

แต่ถ้าใช้ทวินดีเป็นตัวป้อน (input) ของออปแอมป์ จะได้อัตราขยายต่ำสุดที่ความถี่ f_o ทั้งนี้เพราะอัตราส่วนของความชัดป้อนกลับต่อความชัดป้อนมีค่าต่ำสุด

รูปที่ 4.27 แสดงขนาดของ $\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}}$ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป โดยที่

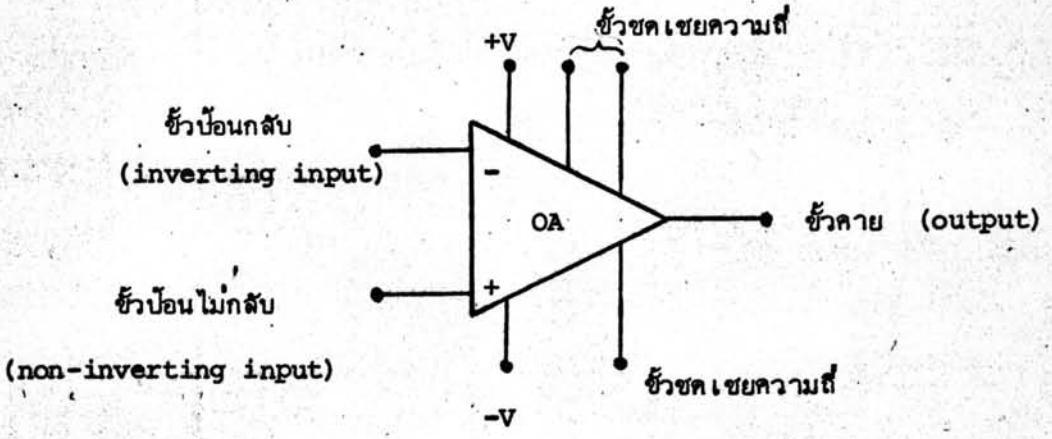
$$\left|\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}}\right| = \left|\frac{1-\left(\frac{f}{f_o}\right)^2}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{f}{f_o}\right)^2\right]^2+\left[4\left(\frac{f}{f_o}\right)\right]^2}}\right|$$



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองต่อความถี่ของทวินดี

4.8.2 ไอซีออปแอมป์ (IC op-amp)

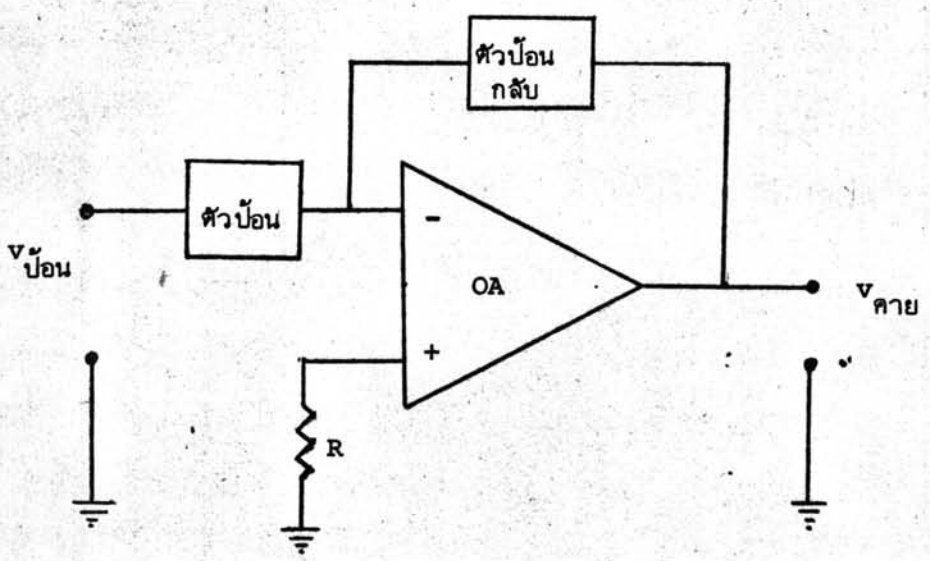
เป็นวงจรขยายสัญญาณประเภทวงจรรวม (integrated circuit) ที่มีอัตราขยายสูง ตั้งแต่ 20,000 ถึง 1,000,000 ความชัดป้อน (input impedance) สูงมาก ความชัดคาย (output impedance) ต่ำ มีผลตอบสนองต่อความถี่ตั้งแต่ไฟตรงถึงความถี่เป็นล้านเฮิทซ์ แต่ข้อดีเด่นที่สำคัญคือ สามารถกำหนดอัตราขยายให้กับออปแอมป์ได้ ด้วยการต่อวงจรในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback)



รูปที่ 4.28 สัญญลักษณ์ของออปแอมป์

4.8.3 ออปแอมป์กับการป้อนกลับแบบลบ

วงจรออปแอมป์ที่ใช้งานประกอบด้วยวงจรภายนอกสองส่วนคือ ตัวป้อน (input) กับตัวป้อนกลับ (feedback)



รูปที่ 4.29 วงจรขยายออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับแบบลบ

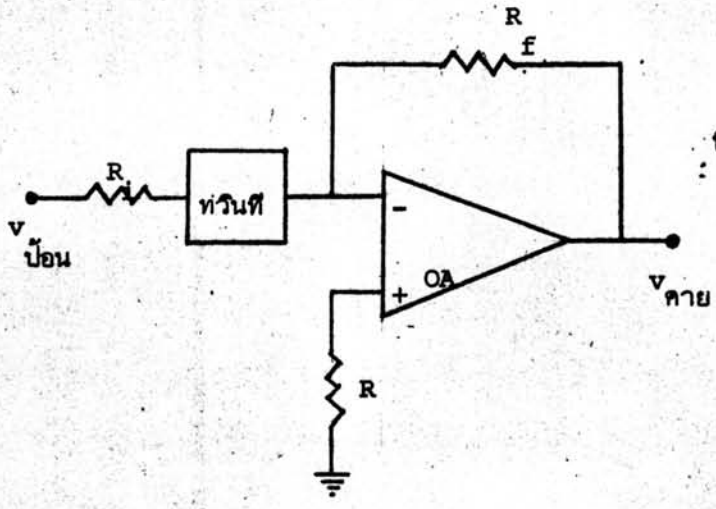
อัตราขยายวงจรสามารถกำหนดได้ด้วยค่าอัตราส่วนของความชัดของตัวป้อนกลับต่อความชัดของตัวป้อน

ตัวต้านทาน R ที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วป้อนไม่กลับ (non inverting input) กับดิน (ground) ทำหน้าที่ชดเชยการผิดพลาดของศักดาคายออฟเซท (output offset voltage) ที่เกิดขึ้นจากกระแสลำเอียง (bias current)

4.8.4 ตัวกรองกั้นแถบ ตัวกรองแถบผ่าน

จากหัวข้อ 4.8.1 เนื่องจากตัวกรองทวินที่จะมีค่าความชัดมากที่สุดที่ความถี่มินาท f_o ดังนั้นเมื่อนำเอาทวินที่เป็นตัวป้อนของวงจรขยายออปแอมป์ในหัวข้อ 4.8.3 อัตราขยายจะมีค่าต่ำสุดที่ความถี่ f_o ตัวกรองที่ได้เรียกว่า ตัวกรองกั้นแถบ (band reject filter) ทั้งนี้เพราะตัวกรองนี้จะไม่ขยายสัญญาณที่ความถี่ f_o ของทวินที่ แต่จะขยายสัญญาณนอกความถี่ f_o ซึ่งสามารถกำหนดอัตราขยายได้ ในทางตรงข้าม ถ้านำเอาทวินที่เป็นตัวป้อนกลับของวงจรขยายออปแอมป์ จะได้อัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ f_o ตัวกรองที่ได้เรียกว่า ตัวกรองแถบผ่าน

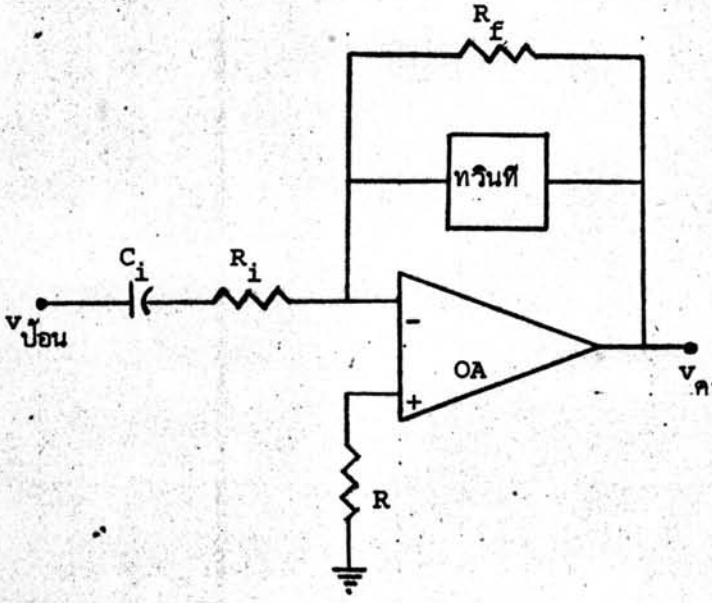
(band pass filter) เพราะตัวกรองนี้จะขยายสัญญาณที่ความถี่ f_o และความถี่ใกล้เคียง แต่จะไม่ขยายสัญญาณที่ความถี่อื่น



ที่ความถี่นอกความถี่อภินาท

$$\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}} = \frac{R_f}{R_i}$$

รูปที่ 4.30 ตัวกรองกั้นแถบ

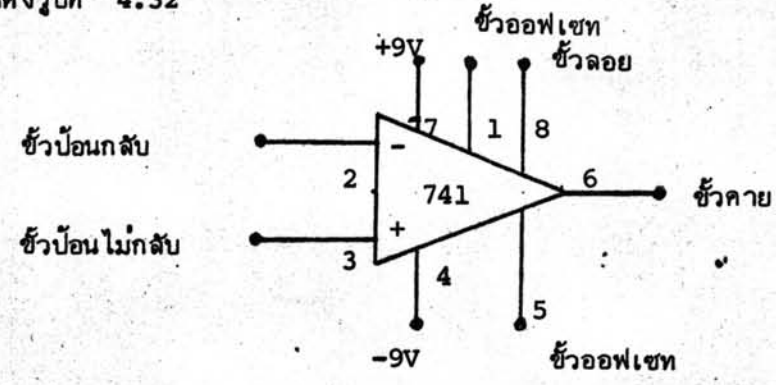


ที่ความถี่อภินาท

$$\frac{v_{คาย}}{v_{ป้อน}} = \frac{R_f}{R_i}$$

รูปที่ 4.31 ตัวกรองแถบผ่าน

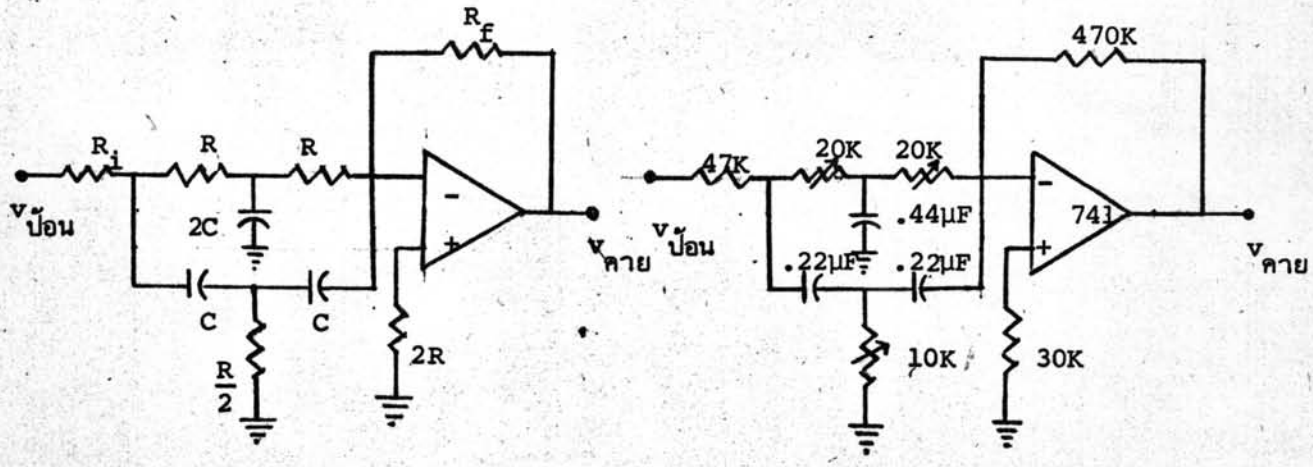
ชนิดของออปแอมป์ที่ใช้ในการสร้างตัวกรองทั้งสองคือ เบอร์ μA 741 มีสัญญลักษณ์และขาดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ตำแหน่งขาของ 741

<u>ตัวกรองกั้นแถบ</u> (band reject filter) โดยนำเอา 741 มาใช้กับทวินที เพื่อสร้างตัวกรองกั้นแถบที่ความถี่กึ่งกลาง 50 เฮิทซ์ โดยการจัดค่า R C ตามความสัมพันธ์

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

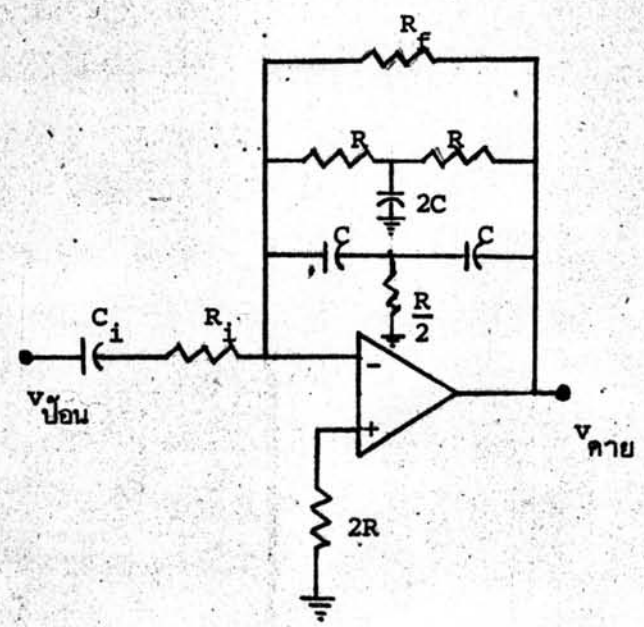


รูปที่ 4.33 ก. วงจรกรองกั้นแถบแสดงความสัมพันธ์ของ R C

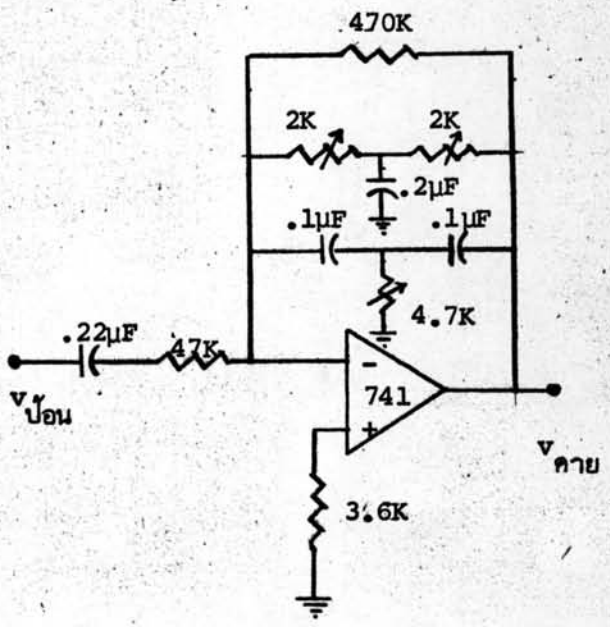
รูปที่ 4.33 ข. แสดงค่าอุปกรณ์ที่ใช้เมื่อ f_o = 50 เฮิทซ์

วงจรนี้จะทำงานได้ดีที่สุด เมื่อค่า R และ C ผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวต้านทานทริมเมอร์ซึ่งปรับค่าได้ การปรับวงจรโดยการใส่สัญญาณความถี่ 50 เฮิทซ์ แล้วปรับค่า R ทั้งสาม จนมีสัญญาณคายน้อยที่สุดโดยดูได้จากออสซิลโลสโคป

<u>ตัวกรองแถบผ่าน</u> (band pass filter) โดยนำเอา 741 มาใช้ร่วมกับทวินที จัดค่า R C ให้ได้ความถี่กึ่งกลาง 1000 เฮิทซ์

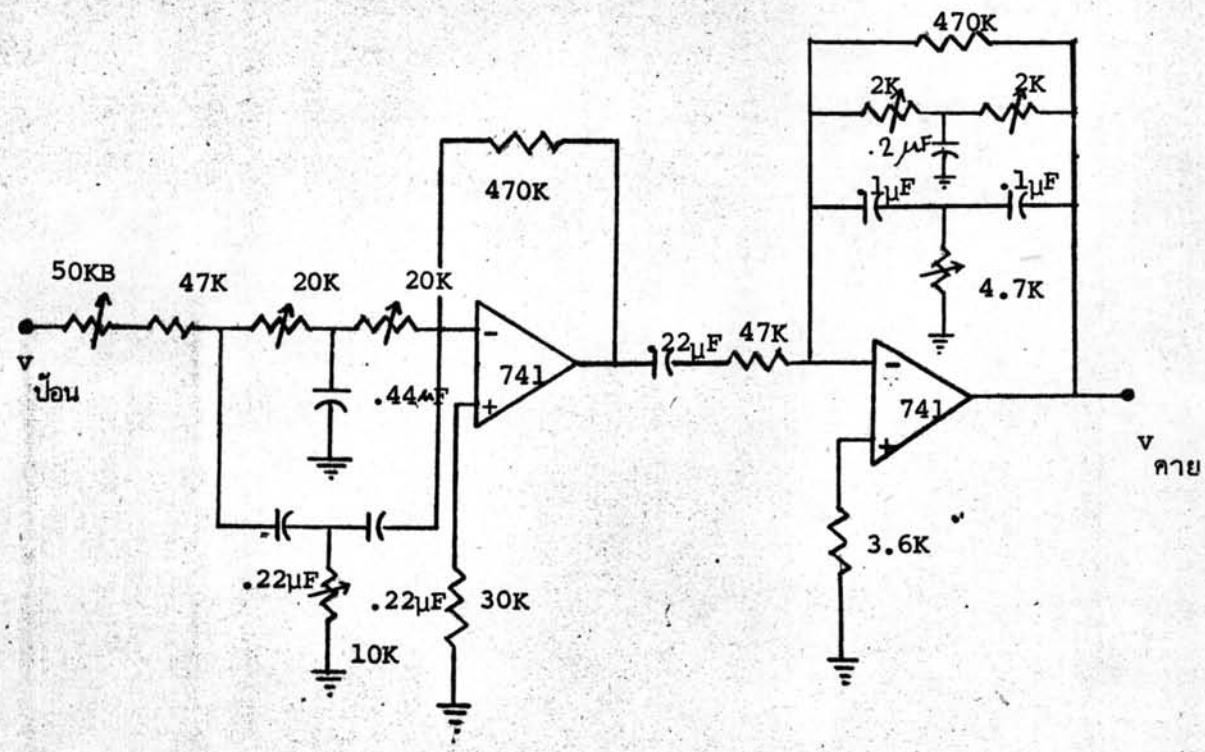


รูปที่ 4.34 ก. วงจรกรองแถบผ่านแสดงความสัมพันธ์ของ R C

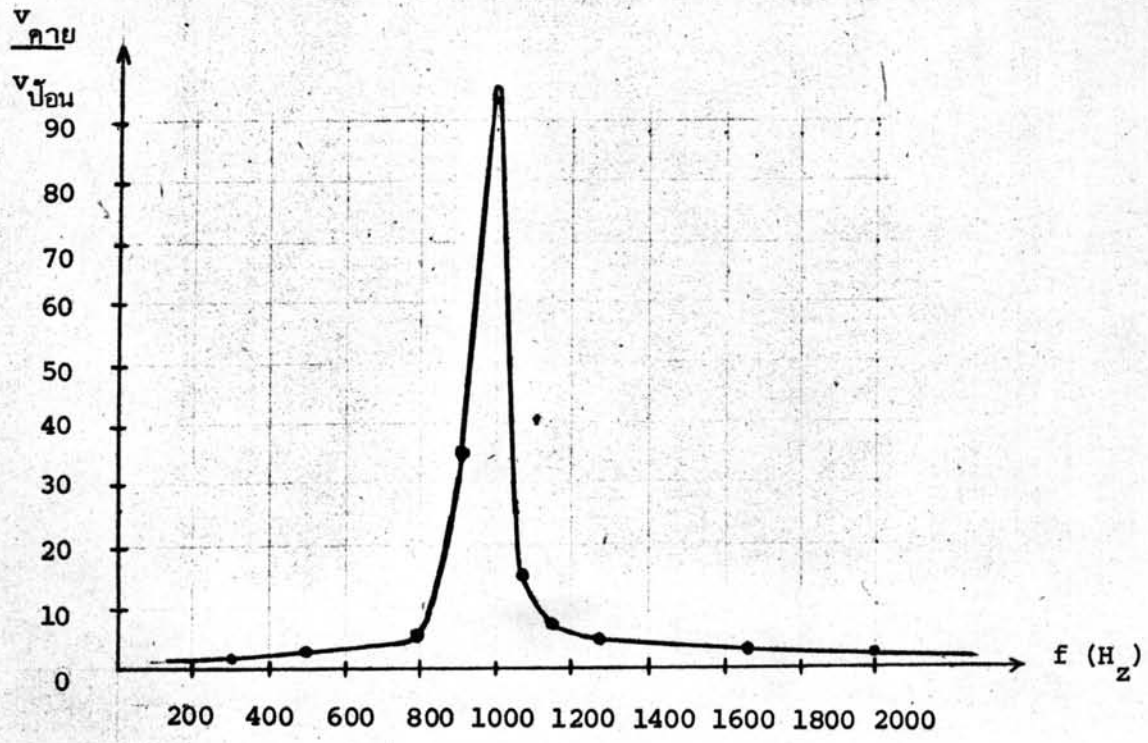


รูปที่ 4.34 ข. แสดงค่าอุปกรณ์ที่ใช้เมื่อ f_o = 1000 เฮิทซ์

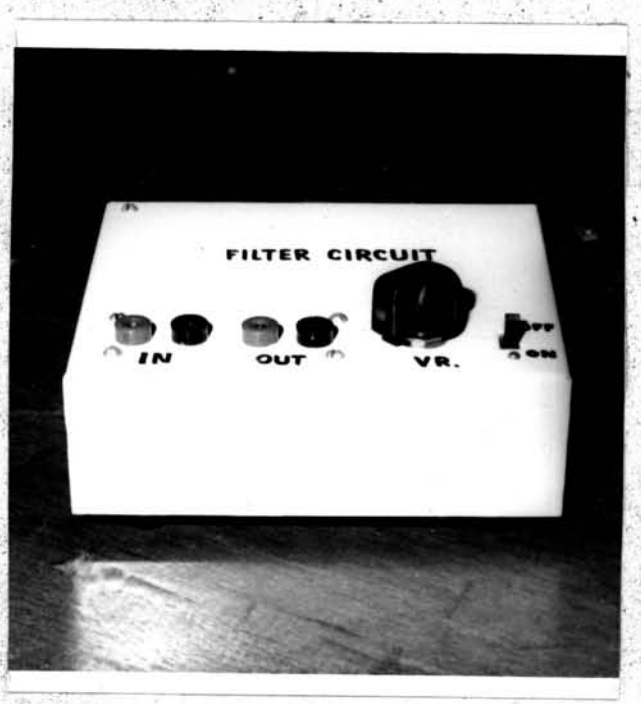
การปรับวงจรโดยการใส่สัญญาณความถี่ 1000 เฮิทซ์ ปรับค่า R ทั้งสามจนมีสัญญาณคายแรงที่สุด โดยดูจากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.35 ตัวกรองทั้งสองต่อร่วมกันเพื่อใช้งาน



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงสัญญาณคายต่อสัญญาป้อนของตัวกรอง ในรูปที่ 4.35 ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 4.37 ก. รูปถ่ายตัวกรองภายนอก

รูปที่ 4.37 ข. ตัวกรองเปิดให้เห็นอุปกรณ์ภายใน

4.9 ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหรือทดสอบสัญญาณไฟฟ้า จัดเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในทางอิเลคทรอนิคส์ ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าจะเห็นได้ทางจอของหลอดรังสีคาโถด (cathode ray tube)

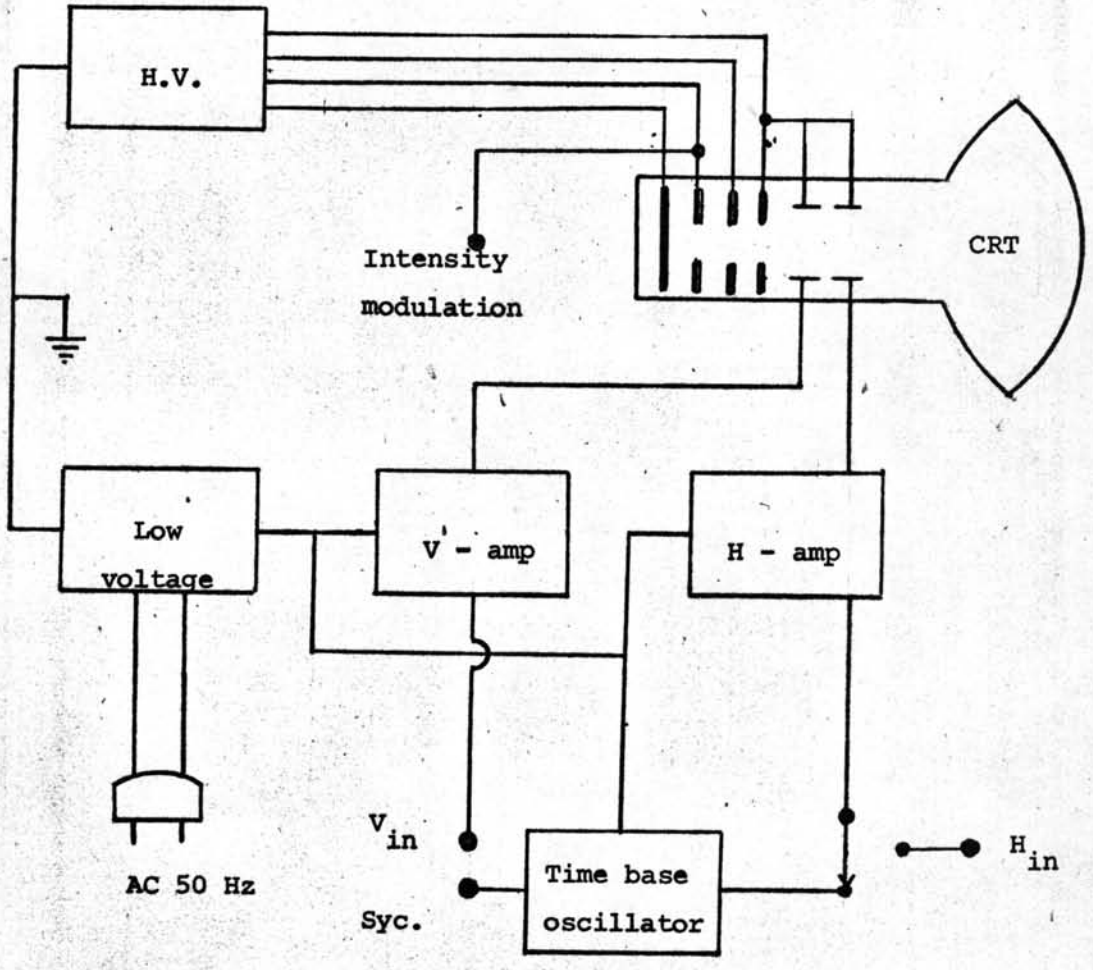
ในงานวิจัยนี้จะใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องตรวจวัดจุดศูนย์ (null detector) สำหรับกระแสสลับ เพื่อดูการสมดุลย์ของศักดาสลับ

ส่วนประกอบที่สำคัญของออสซิลโลสโคปที่สำคัญประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 5 ส่วนคือ

1. หลอดรังสีคาโถด (C R T)
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้า
3. วงจรขยายการหักเหตามแนวระดับ (hor. deflection amp.)

4. วงจรขยายการหักเหตามแนวดิ่ง (ver. deflection amp.)

5. วงจรกำเนิดความถี่เวลามูลฐาน (time base oscillator)

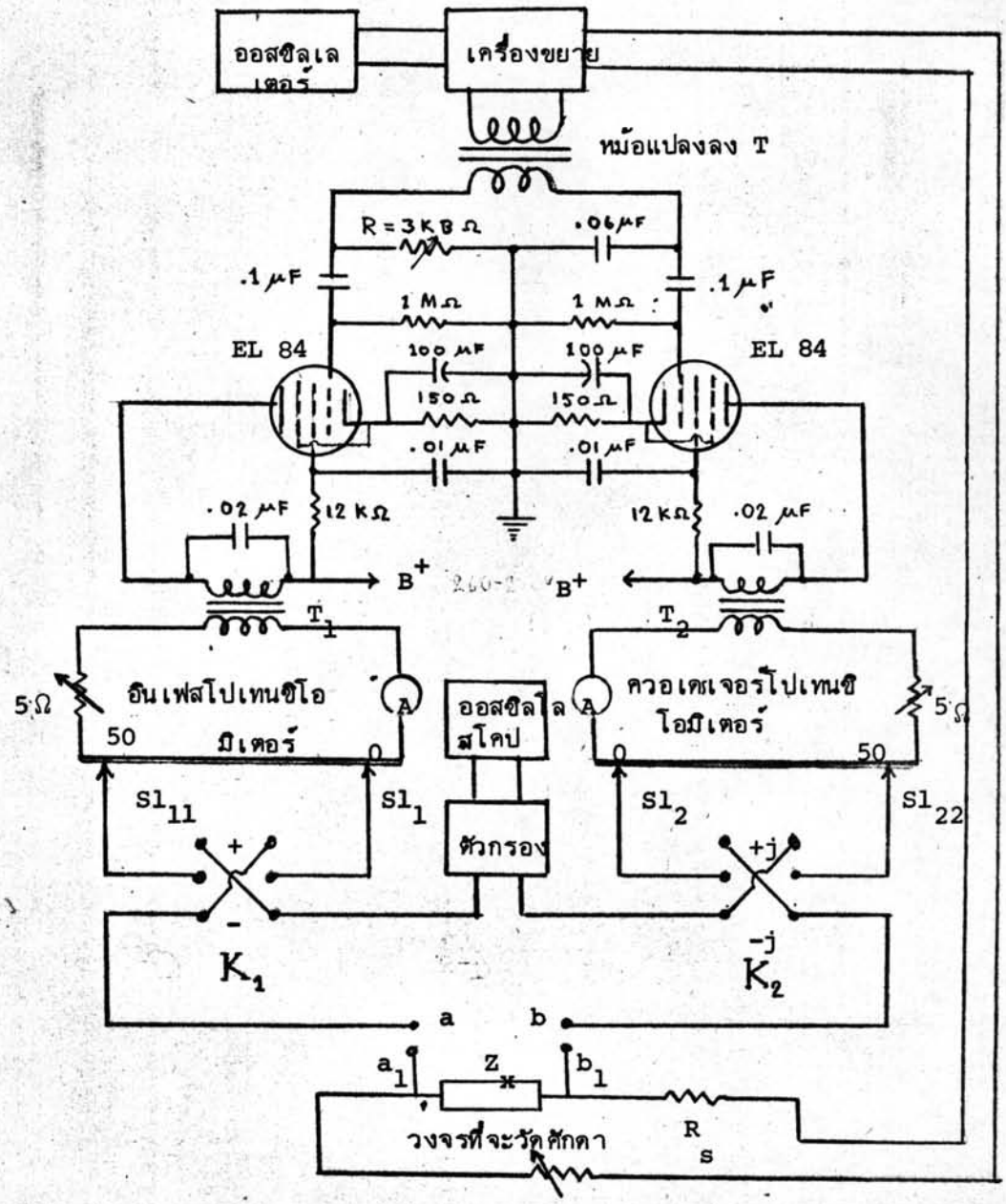


รูปที่ 4.38 แผนผังส่วนประกอบของออสซิลโลสโคป

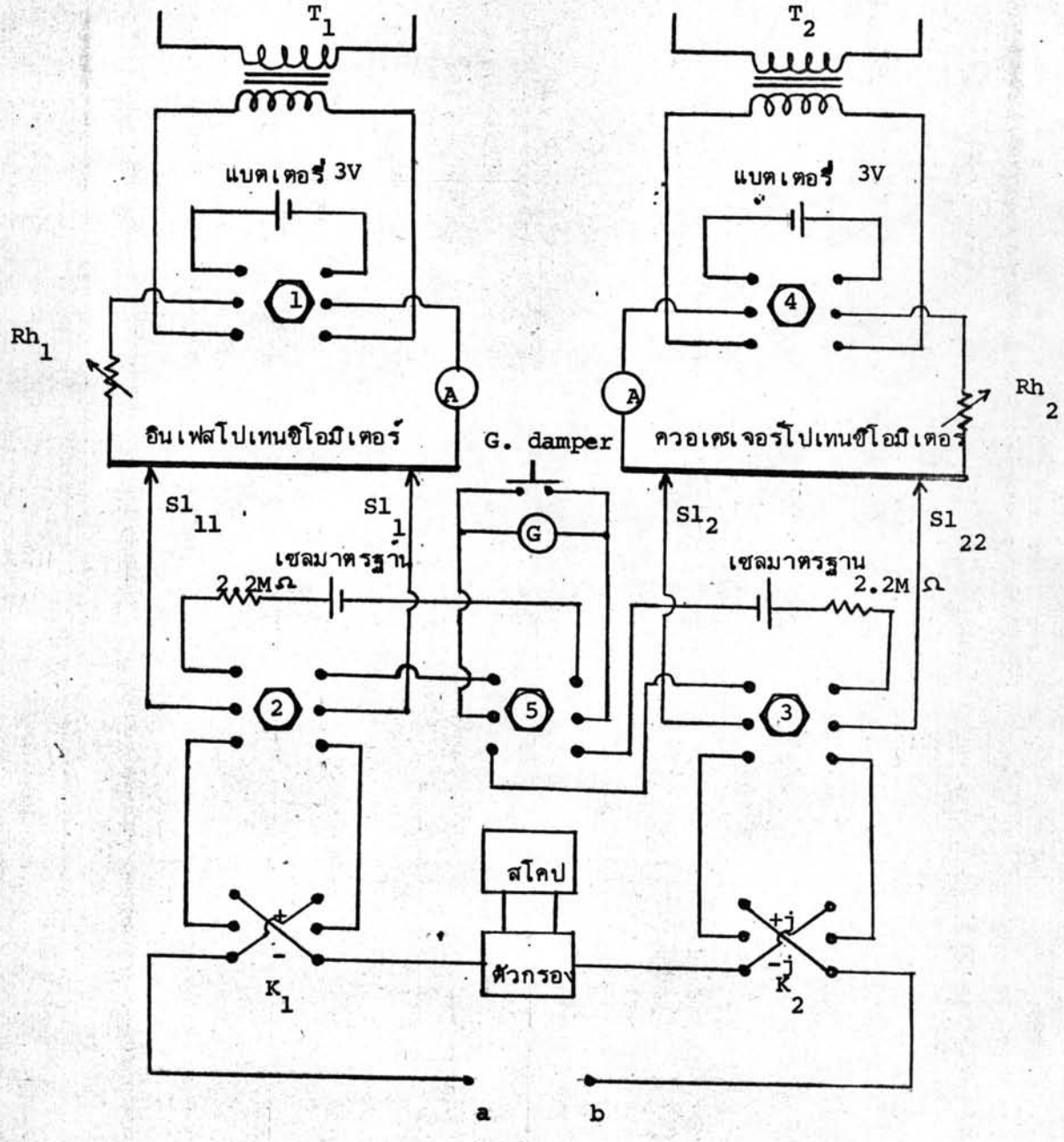
4.10 วงจรรวมทั้งหมดของโปเทนชิโอมิเตอร์

เมื่อนำวงจรจากหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.9 มาเขียนรวมกันจะได้วงจรรวมทั้งหมด ดังรูปที่ 4.39

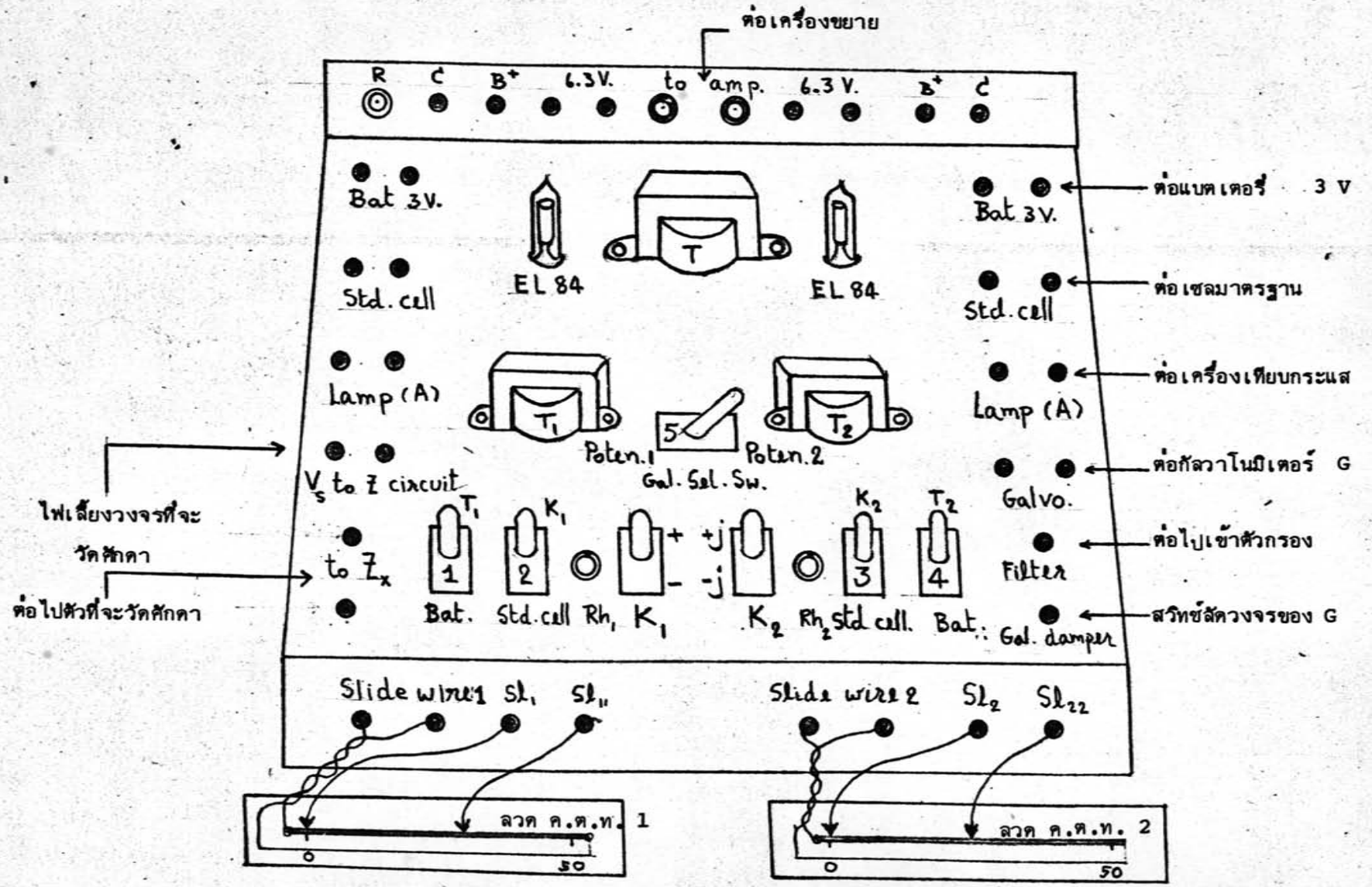
และเพื่อความสะดวกเวลาทำมาตรฐาน (standardization) ซึ่งจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ เซลมาตรฐาน และกัลวาโนมิเตอร์ (G) ต่อเข้าไปในวงจรโปเทนชิโอมิเตอร์ด้วย จึงได้เพิ่มสวิทช์สองขั้วสองทางในวงจรรูปที่ 4.39 อีก 5 ตัว (หมายเลข 1 2 3 4 และ 5) ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 วงจรโปเทนชิโอมิเตอร์รวมจากหัวข้อ 4.1 ถึง 4.9



รูปที่ 4.40 วงจรโปเทนชิโอมิเตอร์เมื่อเพิ่มสวิทช์หมายเลข 1 ถึง 5



รูปที่ 4.41 แสดงตำแหน่งสวิทช์และขั้วต่าง ๆ ของรูปที่ 4.40

รูปที่ 4.42 รูปถ่ายของจริงในรูปที่ 4.41

รูปที่ 4.43 รูปถ่ายเครื่องมือทั้งหมดขณะทำงาน