การสร้างเครื่องมือวัด

ตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ 2

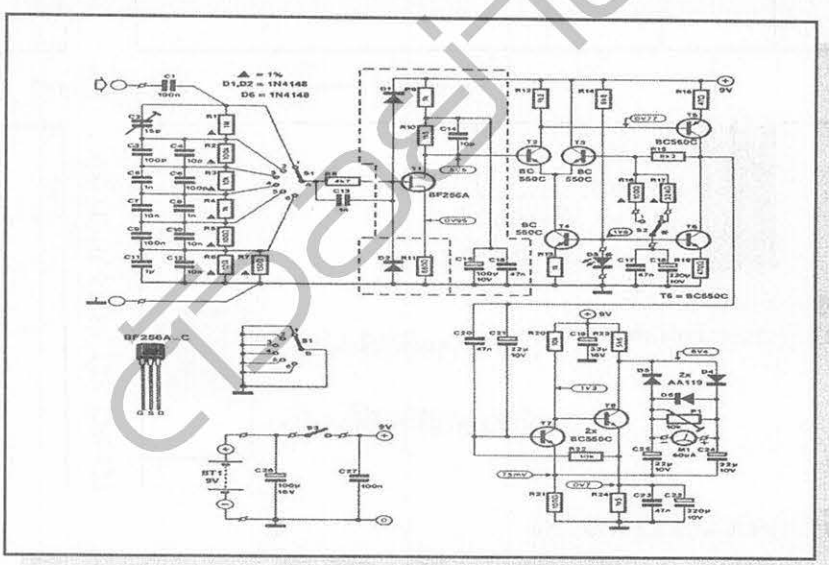
ELECTRONICS

ปราโมทย์ จามรวิเชียร

* มาตรวัดค่าวัตต์
* เอซีมิลลิโวลท์มิเตอร์
* ชุดตรวจสอบแรงดันต่ำ
* แหล่งกำเนิดคลื่นออดิโอ
* มาตรวัดค่าความนำไฟฟ้า
* โวลท์มิเตอร์ อิมพีแดนซ์สูง
* สวีพฟังค์ชั่น เกบเบอร์เรเดอร์
* แหล่งกำเนิดสัญญาณ FM สเตอริโอ

การสร้าง

เครื่องมือวัด/ ตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ 2



ปราโมทย์ จามรวิเชียร

คำนำ

ไม่ว่าโดยส่วนตัวของผู้อ่านจะสนใจวิชาการอิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อกหรือดิจิตอลหรือโครงงานแบบใด ๆ สิ่งหนึ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งคือ อุปกรณ์ทดสอบและตรวจวัดต่าง ๆ ในทางทฤษฎีอาจไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดใด ๆ โครงงานต่าง ๆ ควรสามารถทำงาน ได้ทันทีที่สร้างเสร็จและใช้งานได้ต่อเนื่องไม่มีที่สิ้นสุด แต่ในโลกความเป็นจริงมักมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้เสมอ ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบวงจรตลอดจนการประกอบโครงงาน โดยเฉพาะนักอิเล็กทรอนิกส์สมัครเล่นที่เริ่มศึกษาได้ไม่มากนัก นอกจากนี้อุปกรณ์ที่มีขายในบ้านเราส่วนมากไม่มีใครบอกได้ว่ามีคุณภาพดีเพียงใด หรือแม้กระทั่งใช้งานได้หรือไม่ ดังนั้นหากประสงค์จะเป็นนักเล่นวงจรที่มีคุณภาพจำเป็นต้องเริ่มจากการสร้างโครงงานเกี่ยวกับเครื่องมือวัดต่าง ๆ ก่อน

โครงงานเหล่านี้ได้แก่

- แหล่งกำเนิดคลื่นออดิโอ
- วงจรขยายประจำห้องทดลอง
- ออดิโอมิลลิโวลท์มีเตอร์
- โวลท์มีเตอร์แบบความต้านทานสูง
- ชุดตรวจสอบทรานซิสเตอร์
- คาพาซิแตนซ์มีเตอร์

ด้วยความปรารถนาดี
ปราโมทย์ จามรวิเชียร

CONTENTS

เอซี มิลลิโวลท์มีเตอร์	5
มาตรวัดค่า แอล-ซี	11
มาตรวัดความถี่ขนาดเล็ก	20
มาตรวัดค่าคิว Q	25
มาตรวัดค่าความนำไฟฟ้า	32
มาตรวัดค่าวัตต์	35
แหล่งกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	41
ซิกแนล เทรซเซอร์	44
สวีพ ฟังก์ชั่น เจนเนอร์เรเตอร์	48
แหล่งกำเนิดสัญญาณ FM สเตอริโอ	54
แหล่งกำเนิดสัญญาณ PAL	64
ชุดตรวจสอบแรงดันต่ำ	70
ชุดทดสอบเพาเวอร์ มอสเฟ็ท	74
ชุดตรวจจับจุด ครอสส์โอเวอร์	81
แหล่งกำเนิดคลื่นออดิโอ	85
ขยายเสียงประจำห้องทดลอง	91
ออดิโอ มัลติโวลท์มีเตอร์	94
โวลท์มีเตอร์ อิมพีแดนซ์สูง	99
วงจรตรวจสอบทรานซิสเตอร์	103
คาพาซิแตนซ์มีเตอร์	106

เอซี มิลลิโวลท์มีเตอร์

การมีเอซี. มิลลิโวลท์มีเตอร์ชนิดความไวสูงจะเป็นประโยชน์มากพอ ๆ กับการมีออสซิลโลสโคป เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะสามารถอ่านระดับสัญญาณจากหน้าปัดมีเตอร์ทำได้สะดวกกว่าการดูรูปคลื่นบนจอสโคป ปกติจากจอสโคปจะอ่านได้เพียงค่าพีค-พีค ไม่ใช่ค่า rms โดยตรงทันที นอกจากนี้ การใช้เอซีมิลลิโวลท์มีเตอร์ซึ่งมีขนาดกระทัดรัดและความไวสูงกว่าสโคปทั่ว ๆ ไป และใช้พลังงานไฟฟ้าจากถ่านไฟฉาย อุปกรณ์แบบนี้ยังมีแบนด์วิธกว้าง ในขณะที่ DMM ส่วนมากจะมีช่วงผลตอบเชิงความถี่ประมาณ 400 Hz แต่เอซีมิลลิโวลท์มีเตอร์ตัวนี้จะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ 20 Hz → 2MHz

อุปกรณ์นี้จะแบ่งช่วงการวัดเป็น 12 ช่วงจาก 0.2 mV ถึง 60 V และมีอิมพีแดนซ์ทางอินพุทสูงถึง 1 M โอห์ม ช่วงวัดสูงสุด 60 V นี้ทำให้วัดสัญญาณเอาท์พุทจากเพาเวอร์แอมป์ได้ ในขณะที่ช่วงไวสุดคือ 0.2 mV เหมาะกับการวัดสัญญาณขนาดเล็กจากไมโครโฟนและหัวเข็มพิคอัพ

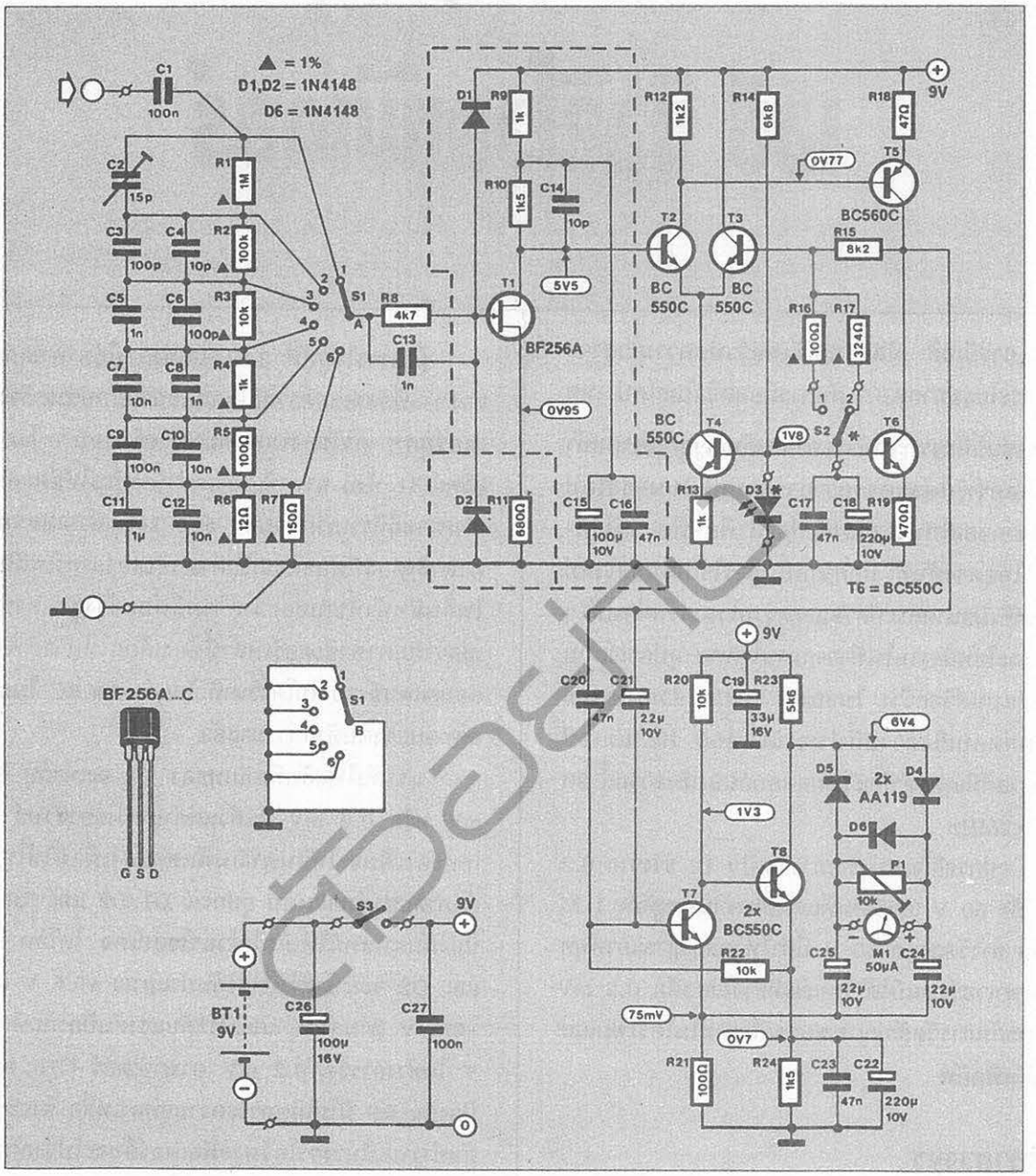
อธิบายวงจร

โดยที่อุปกรณ์นี้เน้นการวัดด้านไฟสลับอย่างเดียว ปัญหาเกี่ยวกับออฟเซ็ทจึงไม่มี จึงไม่มีความจำเป็นใด ๆ ต้องใช้ออพแอมป์คุณภาพดี แต่สามารถใช้วงจรทรานซิสเตอร์ซึ่งออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงและแบนด์วิธกว้าง มีวงจรแบ่งผ่านแรงดันทางอินพุท และออกแบบแผ่น PCB ที่มีการป้องกันความจุไฟฟ้าจากการเดินสายไฟ โดยการติดตั้งสวิทช์เลือกช่วงวัดให้อยู่บนแผ่น PCB โดยตรง ทำให้ไม่มีการรบกวนใด ๆ เกิดขึ้น

ผังวงจรในรูปที่ 2.81 แสดงการใช้คาพาซิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อชดเชยความถี่โดยต่อขนานกับบรรดารีซิสเตอร์ทุก ๆ ตัวในวงจรลดทอนแรงดันรอบ ๆ โรตารี่สวิทช์ S1 ทั้งนี้ คาพาซิเตอร์เหล่านี้จะช่วยให้มีผลตอบเชิงความถี่ที่ราบเรียบจนถึง 500 kHz ส่วนเซอรามิกคาพาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับคาพาซิเตอร์แบบโพลีโพรไพลีนมีหน้าที่ชดเชยช่วงความถี่ค่อนข้างสูง ค่าของเซอรามิกคาพาซิเตอร์เหล่านี้ต้องเลือกให้เกิดค่าไทม์คอนสแตนซ์ 10 ไมโครวินาที ในแต่ละชุด RC ในภาคลดทอนแรงดันดังกล่าวมาแล้ว

แรงดันไฟสลับที่ขาเกทของ T1 จะเท่ากับ 0.2 mV หรือ 0.6 mV ก็แล้วแต่ตำแหน่งของสวิทช์ S2 เกทของเฟ็ทจะให้อินพุทอิมพีแดนซ์สูงเพื่อมิให้โหลดต่อภาคแบ่งผ่านแรงดัน อุปกรณ์ D1/D2 และ R8 จะป้องกันขาเกทมิให้เกิดโอเวอร์โวลท์เตจ ไดโอด D1 และ D2 จะนำไฟฟ้าที่แรงดันประมาณ +9.6 V และ -0.6 V ตามลำดับ และมีระดับแรงดันป้องกันที่ 50 V ในช่วงการวัด 0.2 mV คาพาซิเตอร์ C13 จะใช้ป้องกัน R8 มิให้เกิดภาวะความจุหลงเหลือ ซึ่งจะร่วมกันทำงานเป็นวงจรโลว์พาสฟิลเตอร์อันจะไปจำกัดช่วงแบนด์วิธของมิลลิโวลท์มีเตอร์ สังเกตว่า C13 จะมีค่าลดลงหากความถี่สูงขึ้น ค่าของ R18 และ C13 จึงต้องเลือกค่าให้เหมาะระหว่างแบนด์วิธกับการป้องกันแรงดันสูงเกินในแต่ละช่วงการวัด

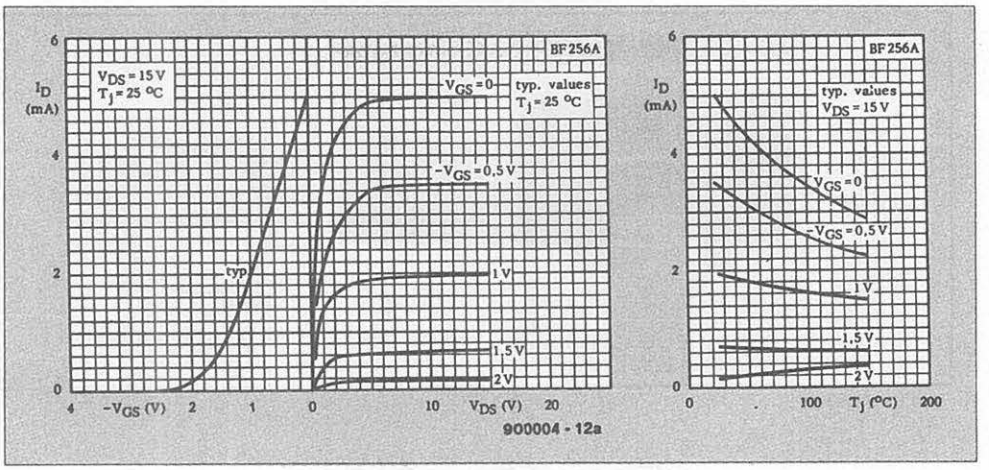
เฟ็ท T1 ไม่ได้อยู่ในวงจรป้อนกลับของภาคขยายซึ่งจะมี R11 เป็นตัวป้อนกลับ ทำให้วงจรขยายที่อัตราขยาย 1.5 เท่า ส่วนความต้านทาน R9 ต่อกับขาเดรนเพื่อไบอัสเชิงไฟตรงเท่านั้น สำหรับสัญญาณไฟ



รูปที่ 2.81 ผังวงจรของเอซี มิลลิโวลท์มีเตอร์

สลับจะมีการดีคัพปลิ้งด้วย C15 และ C16 แก่ชุดจ่ายไฟตรง ทำให้ภาคขยายทางอินพุทมีเสถียรภาพการทำงานดีขึ้น การกำหนดกระแสไฟตรงของเฟ็ททำได้ด้วยการกำหนดค่าความต้านทานที่ขาซอร์ส เนื่องจากขาเกทจะต่อลงกราวด์ผ่านกลุ่มความต้านทานที่ต่อแบบขั้นบันได แรงดันตกคร่อมความต้านทานที่ขาซอร์สจะทำให้เกิดแรงดันลบที่ขาเกท (U_{GS}) ซึ่งจะไปกำหนดกระแสที่ไหลผ่านเดรนและซอร์ส ผลการไบอัสในเฟ็ท

eBook



รูปที่ 2.82 ข้อมูลการออกแบบของอุปกรณ์เฟ็ท

พิจารณาดูได้ในรูปที่ 2.82 สำหรับแรงดันเดรนที่ +5.6 V และมี R11 = 680 โอห์ม จะเกิดกระแสเดรน 1.5 mA ที่ $-U_{GS}$ = 1 V เฟ็ทที่ใช้คือเบอร์ BF256

วงจรขยายหลักประกอบด้วยดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมปลิฟายเออร์ (T2-T3) ตามด้วยวงจรขยายเอาท์พุททำงานในคลาส A กระแสอีมิตเตอร์ของดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมปลิฟายเออร์จะกำหนดด้วยแหล่งจ่ายกระแสใน T4 ซึ่งใช้ LED (D3) เป็นแหล่งไฟอ้างอิงที่ 1.8 V LED สีแดงโดยทั่วไปจะมีแรงดันตกคร่อมตัวมันประมาณ 1.5 V จึงไม่เหมาะกับการใช้ในวงจรนี้ LED ที่ใช้ควรเป็นแบบแสงจ้ามีประสิทธิภาพสูงหรือแบบให้แสงสีน้ำเงิน ซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อมราว 1.8 V

หาก R13 = 1 k โอห์ม T4 จะดึงกระแสคงที่ที่ 1.2 mA ที่ภาคขยายเอาท์พุทจะมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (T6) ส่วน D3 ก็เป็นแหล่งจ่ายกระแสอีกชุดให้กระแสคงที่ประมาณ 2.5 mA (เท่ากับ 1.2 V/R19)

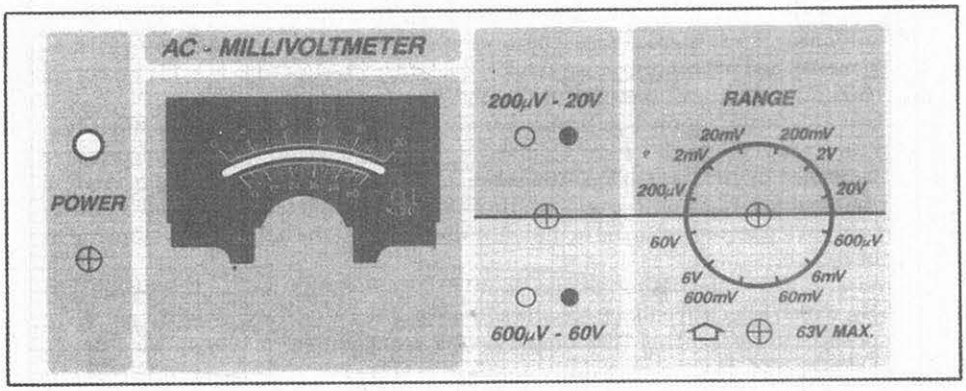
อินพุทของเฟ็ทจะเชื่อมโยงเชิงไฟตรงเข้ากับภาคขยายหลัก การไบอัสกำหนดจากแรงดันขาเดรนในระหว่าง 4→5 V ขาอินพุท (-) ของออพแอมป์แบบใช้ทรานซิสเตอร์นี้ได้แก่ T2-T6 จะมาจากขาเบสของ T3 โดยมีการเชื่อมโยงเชิงไฟตรงผ่านทางความต้านทานป้อนกลับ R15 ทำให้วงจรดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมป์จะรักษาระดับแรงดันไฟตรงที่ขาเอาท์พุท (ตรงขาคอลเล็คเตอร์ของ T5.T6) ส่วนขาอินพุท (-) จะตรงกับขาเบสของ T2

อัตราขยายรวมของการขยายสัญญาณไฟสลับจะเท่ากับ x83 หรือ x26 เท่า ขึ้นกับสวิทช์ S2 ซึ่งทำหน้าที่เลือกความต้านทานป้อนกลับ R15-R16 หรือ R15-R17 ที่ต่ออนุกรมกับคาพาซิเตอร์ C17-C18

โดยสรุปแล้ว วงจรขยายแบบใช้ทรานซิสเตอร์จะทำงานได้ดีที่ช่วงความถี่สูง ดังนั้น วงจรชดเชยความถี่จึงไม่จำเป็นต้องใช้เซอรามิกคาพาซิเตอร์ในภาคป้อนกลับ ใช้เพียง C14 ก็พอเพียงแล้ว

ชุดซิกแนลเร็กติฟายเออร์จะเชื่อมโยงเชิงคาพาซิตีฟด้วย C20 และ C21 ไปยังวงจรขยายภาคถัดมา คือ T7-T8 ซึ่งมีชุดเร็กติฟายเออร์และมีเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่เป็นส่วนหนึ่งของภาคป้อนกลับ เพื่อให้เกิดการขยายอย่างเป็นเชิงเส้น ทำให้ภาคอินพุทมีความไวสูง คือ 21 mV จะทำให้เข็มมีเตอร์ชี้เต็มสเกล รูปแบบหน้าปัดมีเตอร์แสดงในรูปที่ 2.83

ดังนั้น ที่ช่วงการวัดต่ำสุด จึงมีความไวทางอินพุทที่ 220 ไมโครโวลท์ (0.2 mV) ก็ทำให้มีเตอร์ชี้เต็มสเกล C26 กับ C27 จะลดสัญญาณรบกวนในสายจ่ายไฟตรง



รูปที่ 2.83 หน้าปัดของเครื่องต้นแบบ

ปรีเซ็ท P1 กำหนดค่าฟอร์มแฟคเตอร์เพื่อแปลงค่าพีค-พีคเป็นค่า rms ทั้งนี้ ใช้เฉพาะกับคลื่นซายน์

วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงประกอบด้วยเยอร์มาเนียมไดโอด D4/D5 ส่วนซิลิกอนไดโอด D6 จะใช้ป้องกันมีเตอร์จากการเกิดโอเวอร์โหลด

การสร้าง

แผ่นวงจรพิมพ์ดูในรูปที่ 2.84 แผ่นหน้าปัดของเครื่องต้นแบบดูได้ในรูปที่ 2.83

โรตารี่สวิทช์ทั้งสองตัวเป็นแบบหกตำแหน่ง (S1 และ S2) แผ่น PCB ที่ใช้เป็นแบบหน้าเดียว เมื่อประกอบวงจรพิมพ์แล้วใส่โรตารี่สวิทช์ทั้งสอง จากนั้นใช้แผ่นดีบุกบัดกรีไว้รอบๆ แผ่นวงจร ดังในรูปบนซ้าย แล้วบรรจุลงในกล่องให้เรียบร้อย

การปรับแต่ง

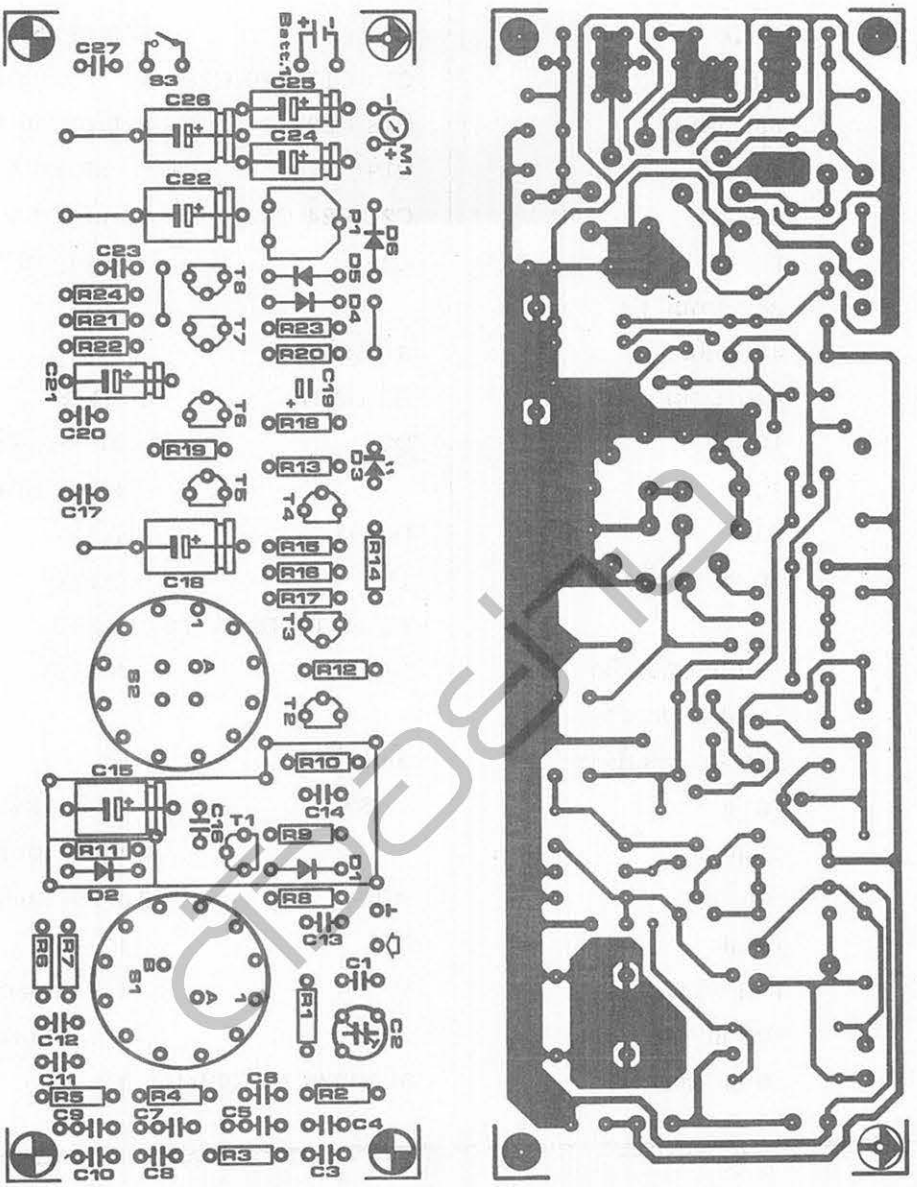
ที่หน้าปัดของกล่องประกอบด้วยมีเตอร์ สวิทช์ On/Off LED และซ็อคเกต BNC ตลอดจนลังถ่าน 9 V จะอยู่ภายนอกแผ่น PCB

เปิดไฟเข้าเครื่อง ตรวจวัดกระแสในวงจรจะมีประมาณ 7→8 mA ใช้ DVM วัดแรงดันที่ขาอาโนดของ D3 (+1.8 V) กับขั้วบวกของ C21 (อยู่ระหว่าง +5 กับ +6 V) แรงดันอันหลังจะต้องเท่ากับที่ปรากฏที่ขาเดรนของเฟ็ท T1 หากไม่เป็นไปตามนี้ให้เปลี่ยนเฟ็ทใหม่ หรือลองเปลี่ยนค่า R11 ใหม่ จากนั้นตรวจสอบขาคอลเล็คเตอร์ของ T8 จะอ่านแรงดันได้ +6.4 V

ตั้งวงจรนี้ไปที่ช่วงการวัด 60 V ปรับเข็มมีเตอร์ด้วยสกรูทางหน้าปัดมีเตอร์เองให้เข็มตรงเลข 0 พอดี ต่อแหล่งกำเนิดคลื่นซายน์เข้ากับ DVM แล้ววัดแรงดันไฟสลับ ตั้งความถี่ซายน์ดังกล่าวในช่วง 100→200 Hz ต่อชุดแบ่งผ่านแรงดัน 1,000 : 1 เข้าระหว่างอินพุทของ DVM กับอินพุทของเอซีมิลลิโวลท์มีเตอร์นี้ ชุดแบ่งผ่านแรงดันนี้จะประกอบด้วยรีซิสเตอร์ 10 kΩ กับ 10 โอห์ม (1% ทั้งคู่) ตั้งมิลลิโวลท์มีเตอร์ไปที่ช่วงวัด 0.6 V และตั้ง DVM ไปที่ช่วงวัด 1 V หรือ 3 V ปรับปรีเซ็ท P1 จนมีเตอร์อ่านตรงกับ DVM พอดี หากเข็มมีเตอร์สั่นไปมา ให้เปลี่ยนไดโอด D4 และ D5 (อาจเปลี่ยนไปใช้เบอร์ BAT 85 หากหาเยอร์มาเนียมไดโอดยาก)

ต่อไปคือการปรับทริมเมอร์ C2 ให้มีการชดเชยความถี่ที่ดีเมื่ออินพุทมีความถี่ 200 kHz โดยใช้สโคปและแหล่งกำเนิดคลื่นซายน์ โดยตั้งวงจรไปที่ช่วงวัด 200 mV หากไม่มีอุปกรณ์ใดๆ ในการทดสอบ ให้ปรับ C2 จนมีค่าราว 2/3 ของค่าทั้งหมด (10→12

ตัวอย่าง



รูปที่ 2.84 แผ่นวงจรพิมพ์

pF)

ในเครื่องต้นแบบจะมีแบนด์วิธมากกว่า 4 MHz และมีความผิดพลาดในการอ่านค่าแรงดันเพียง 5% ที่ความถี่ 2 MHz

รายการอุปกรณ์

ความต้านทาน

R1	1 MΩ 1%
R2	100 kΩ 1%
R3	10 kΩ 1%
R4	1 kΩ 1%
R5 R16	100 โอห์ม 1%
R6	12 โอห์ม 1%
R7	150 โอห์ม 1%

R8	4.7 kΩ
R9 R13	1 kΩ
R10 R24	1.5 kΩ
R11	680 โอห์ม
R12	1.2 kΩ
R14	6.8 kΩ
R15	8.2 kΩ
R17	342 โอห์ม 1%
R18	47 โอห์ม
R19	470 โอห์ม
R20 R22	10 kΩ
R21	100 โอห์ม
R23	5.6 kΩ
P1	10 kΩ ปรีเซ็ท วางนอน
คาพาซิเตอร์	
C1 C27	100 nF เซอรามิก
C2	15 pF ทริมเมอร์
C3	100 pF โพลีสไตรีน
C4 C14	10 pF
C5	1 nF
C6	100 pF
C7	10 nF
C8 C13	1 nF เซอรามิก
C9	100 nF
C10 C12	10 nF เซอรามิก
C11	1 µF
C15	100 µF/10 V
C16 C17 C20 C23	47 nF เซอรามิก
C18 C22	220 µF/10 V
C19	33 µF/16 V แทนทาลัม
C21 C24 C25	22 µF/10 V
C26	100 µF/16 V
สารกึ่งตัวนำ	
D1 D2 D6	1N4148
D3	LED ความเข้มสูงสีน้ำเงิน (แรงดันตกคร่อม 1.8 V)
D4 D5	AA119
T1	BF256A
T2 T3 T4 T6 T7 T8	BC550C
T5	BC560C
เบ็ดเตล็ด	
S1 S2	โรตารี่สวิทช์ 2 ชั้น 6 ตำแหน่ง แบบติดตั้งบนแผ่น
PCBS3	สวิทช์ขนาดเล็ก SPDT
BT1	ถ่าน 9 V
M1	มีเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่ 50 ไมโครแอมป์
กล่องโลหะ 80x200x180 มม.	

ชุดคิทเพื่อการศึกษา

ศูนย์บริการไฟฟ้า - อิเล็กทรอนิกส์

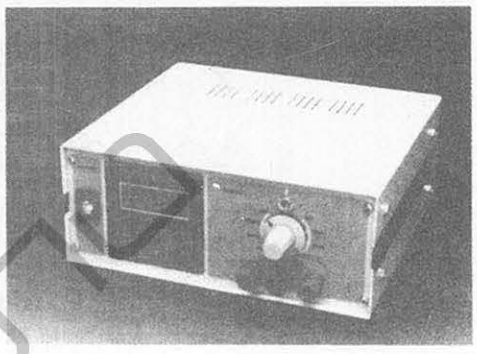
1786/8 ถนนกรุงเทพ - นนทบุรี ตลาดบางซ่อน เขตดุสิต กรุงเทพ ฯ

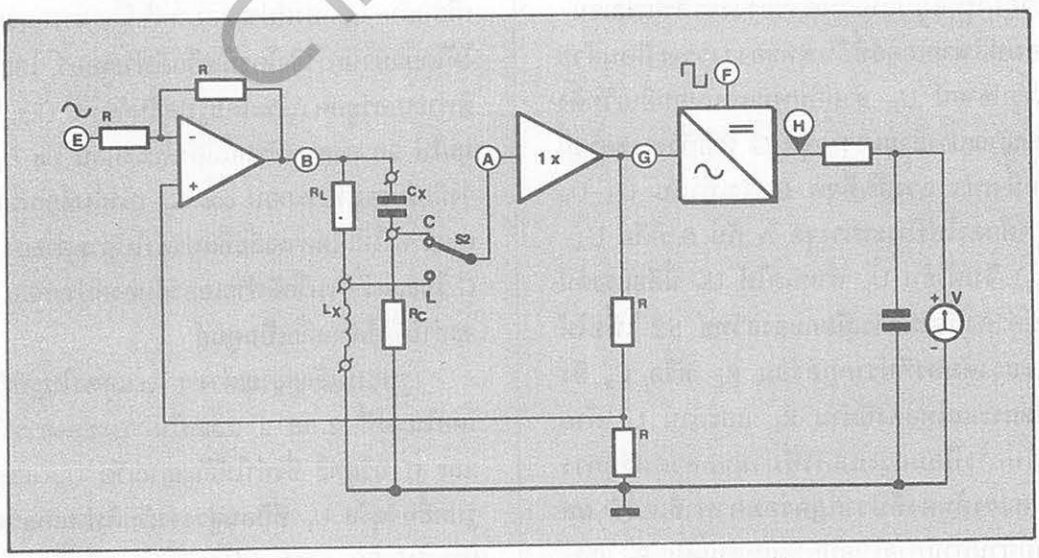
โทร. 585 - 9533

มาตรวัดค่า แอล-ซี

โดยหลักการแล้ว มีความยุ่งยาก 2 ประการ ในการสร้างเครื่องวัด L หรือ C ทั้งนี้ เพราะอุปกรณ์ L หรือ C จะมีการสูญเสียกำลังไม่มากก็น้อย และยังมีการทำงานขึ้นกับความถี่ ในการออกแบบนี้ ถือว่าการสูญเสียกำลังมีค่าต่ำจนละทิ้งได้ ส่วนความถี่การทำงานจะจำกัดเฉพาะช่วงความถี่เสียง

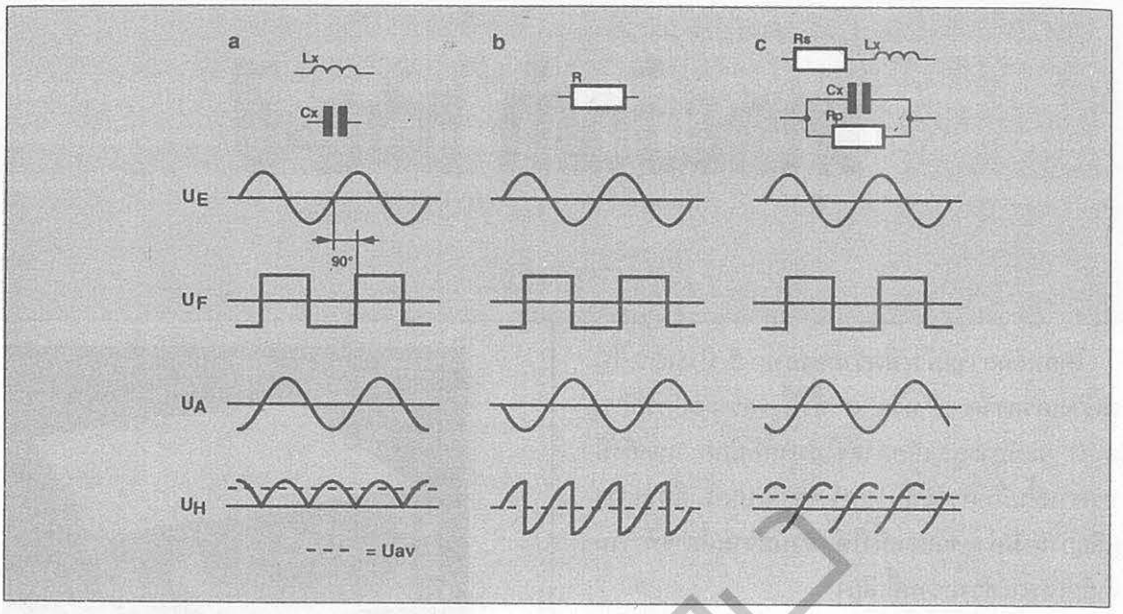
หลักการออกแบบระบบวัด L และ C แสดงดังในรูปที่ 2.97 ค่าของอินดัคแตนซ์ (Lx) หาค่าได้โดยการจ่ายกระแสรูปคลื่นซายน์ผ่านขดลวดซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันคร่อมขดลวดขึ้น ส่วนค่าของ Cx ได้จากการป้อนแรงดันซายน์คงที่คร่อมคาพาซิเตอร์ แล้วตรวจวัดผลเชิงกระแสด้วยแรงดันตกคร่อม Rc ไม่ว่าจะเป็นกรณีใด แรงดันที่จุด A จะแปรค่าโดยตรงกับค่าอินดัคแตนซ์หรือค่าคาพาซิเตอร์รวมกับความต้านทานในตัวอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าความต้านทานในอุปกรณ์ L หรือ C จะเป็นตัวทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในอุปกรณ์





รูปที่ 2.97 ระบบหลักการทำงานของ LC มีเตอร์

CDDJ



รูปที่ 2.98 รูปแบบสัญญาณต่าง ๆ ในการวัด

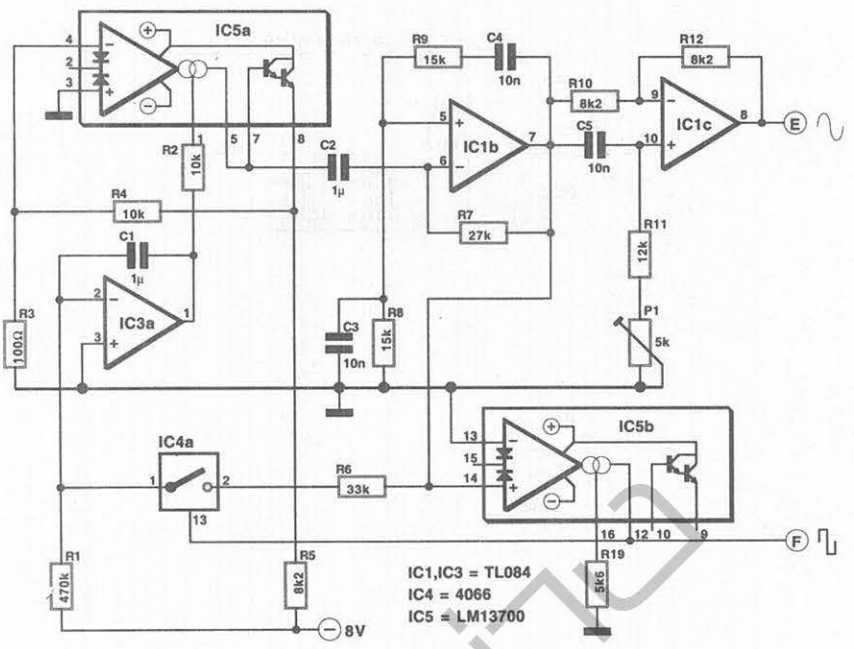
เหล่านั้น

มาเริ่มพิจารณาถึงกระแสไหลผ่านขดลวดหรือแรงดันที่ตกคร่อมคาพาซิเตอร์ให้มีค่าคงที่จะทำได้อย่างไร

ขาอินพุทแบบอินเวิทติ้งของวงจรดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมปลิฟายเออร์ที่อินพุทของวงจรจะป้อนด้วยสัญญาณรูปซายน์ U_E ส่วนอินพุทแบบนอนอินเวิทติ้งซึ่งรับสัญญาณบางส่วนมาจากจุด G โดยที่วงจรขยายนี้เท่ากับหนึ่งเท่า แรงดันที่จุด B จึงเท่ากับ U_A-U_E ความต่างศักดาไฟฟ้าระหว่างจุด A กับ B ก็คือ U_A-(U_A-U_E) จึงเท่ากับ U_E กำหนดให้ U_E นี้คือแรงดันรูปซายน์ค่าคงที่ตามการเลือกของสวิทช์ S2 เพื่อให้เกิดภาวะแรงดันคงที่ปรากฏคร่อม R_L หรือ C_x จึงทำให้เกิดกระแสไหลคงที่ผ่าน R_L และผ่าน L_x ด้วย โดยที่เป็นการป้อนกระแสคงที่ผ่านขดลวดหรือการทำให้เกิดแรงดันคงที่ปรากฏคร่อมคาพาซิเตอร์ ผลของความต้านทานภายในอุปกรณ์เหล่านี้คือ R_L และ R_C จึงไม่มีผลต่อการวัดแบบนี้

สัญญาณที่จุด G จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ แรงดันรูปซายน์ที่มีเฟสตรงกันกับ U_E และแรงดันรูปซายน์ที่เฟสเปลี่ยนไป 90 องศา เทียบกับ U_E (เกิดองค์ประกอบ cos U_E) เมื่อรวมองค์ประกอบทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน ก็จะได้รูปคลื่นซายน์ที่เบี่ยงไป X องศา เทียบกับ U_E องค์ประกอบเหล่านี้สามารถแยกจากกันได้โดยขบวนการซิงโครนัสเร็กติฟายเออร์ โดยชุดเร็กติฟายเออร์ถูกควบคุมโดยรูปคลื่นจัตุรัส (F) ซึ่งเลื่อนมุมไป 90 องศา เทียบกับองค์ประกอบ sin U_E ดังนั้นจึงมีเพียงองค์ประกอบ cos U_E เท่านั้นที่ถูกเร็กติฟายเออร์ ทำให้เกิดค่าเฉลี่ยที่แปรค่าไปตามค่าของ L และ C ในขณะที่การเร็กติฟายเออร์กับองค์ประกอบ sin U_E จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

รูปแบบสัญญาณต่าง ๆ จะแสดงในรูปที่ 2.98 โดยในรูปที่ 2.98 a แสดงในภาวะของการวัดค่า L และ C บริสุทธิ์ ซึ่งทำให้สัญญาณวัด U_A และแรงดันรูปคลื่นจัตุรัส U_F ที่ป้อนสู่วงจรเร็กติฟายเออร์จะมีเฟสเบี่ยงไป 90 องศา เทียบกับ U_E ดังนั้น ชุดเร็กติฟายเออร์จึงปิดเปิดวงจรเฉพาะที่จุดศูนย์โวลท์ของสัญญาณ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันแปรตามค่า



รูปที่ 2.99 วงจรออสซิลเลเตอร์

รีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ที่จะตรวจวัด

ในกรณีแทน L และ C ด้วย R ดังในรูปที่ 2.98 b สัญญาณจะมีเฟสเดียวกับ U_E ชุดเร็กติฟาย-เออร์จะสวิทชิ่งค่าพีคของแรงดัน ส่งผลให้มีค่าแรงดันเฉลี่ยเป็นศูนย์

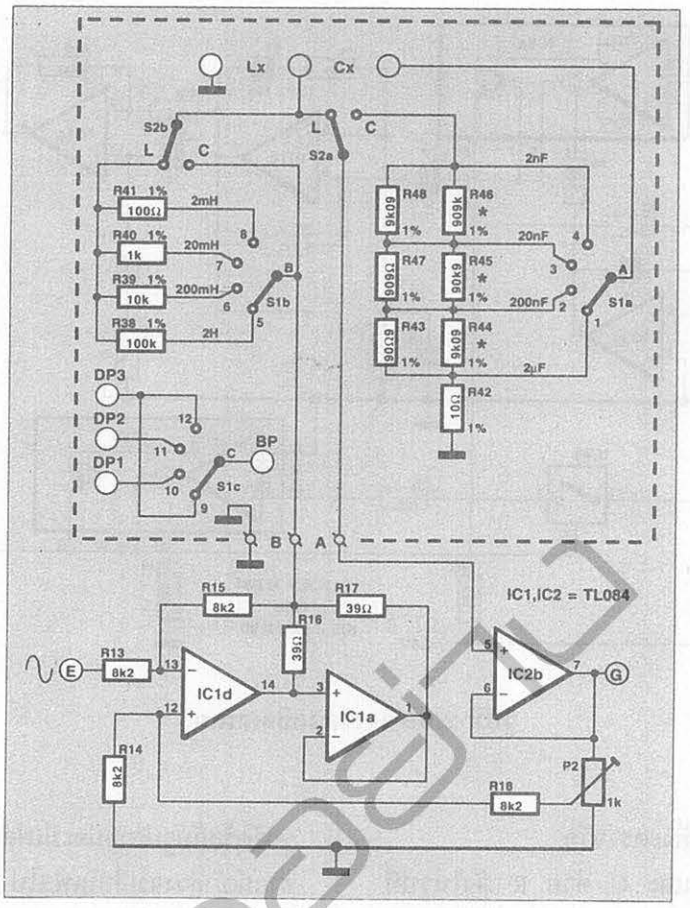
แม้ว่าในทางปฏิบัติ อุปกรณ์ L และ C อาจมีความจุไฟฟ้าหรือความเหนี่ยวนำปะปนมาบ้าง แต่ผลอันนี้จะหายไปในขบวนการซิงโครนัสเร็กติฟายเออร์ ทำให้การวัดค่า L และ C โดยวิธีนี้ให้ค่าถูกต้องแท้จริงเสมอ

วงจรออสซิลเลเตอร์

สัญญาณวัด U_E กับแรงดันรูปคลื่นจัตุรัส U_F ที่จะส่งเข้าสู่ภาคเร็กติฟายเออร์จะมาจากวงจรเวียนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ IC1b ดังในรูปที่ 2.99 สัญญาณทางเอาท์พุทจากวงจรนี้จะถูกแปลงเป็นรูปคลื่นจัตุรัสโดย IC5b ซึ่งเป็นออพแอมป์แบบทรานสคอนดัค-แตนซ์ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยที่สัญญาณรูปจัตุรัสกับรูปซายน์จะมีเฟสเดียวกัน จึงป้อนสัญญาณซายน์เข้าสู่วงจรเลื่อนเฟสไป 90 องศา ในวงจรเลื่อนเฟส IC1c โดยมีการปรับมุมเลื่อนเฟส 90 องศา นี้ด้วยปรีเซ็ทพ็อท P1

วงจรส่วนที่เหลือในรูปที่ 2.99 ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพทางเอาท์พุทของวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยทางด้านเอาท์พุท (ขา 5) ของ IC5a จะทำงานเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานในวงรอบป้อนกลับ ของ IC1b ค่าความต้านทานนี้กำหนดด้วยกระแสที่ไหลผ่านขาควบคุม (ขา 1) กระแสจากวงจรอินติเกรท IC3a จะใช้ในการควบคุมอัตราขยายใน IC1b ซึ่งก็คือการควบคุมขนาดของรูปคลื่นซายน์เฉพาะครึ่งไซเกิ้ลบวก ส่วนช่วงไซเกิ้ลลบจะไม่ผ่านไปได้เพราะสวิทช์ IC4a จะเปิดวงจรไว้

การรักษาระดับสัญญาณซายน์ให้คงที่ก็คือการควบคุมอัตราขยายใน IC1b หากแอมปลิจูดสูงก็จะไปลดอัตราขยายโดยอัตโนมัติ ขนาดสัญญาณคือ 1.2 V



รูปที่ 2.100 ไดอะแกรมของวงจรการวัด

วงจรวัดค่า

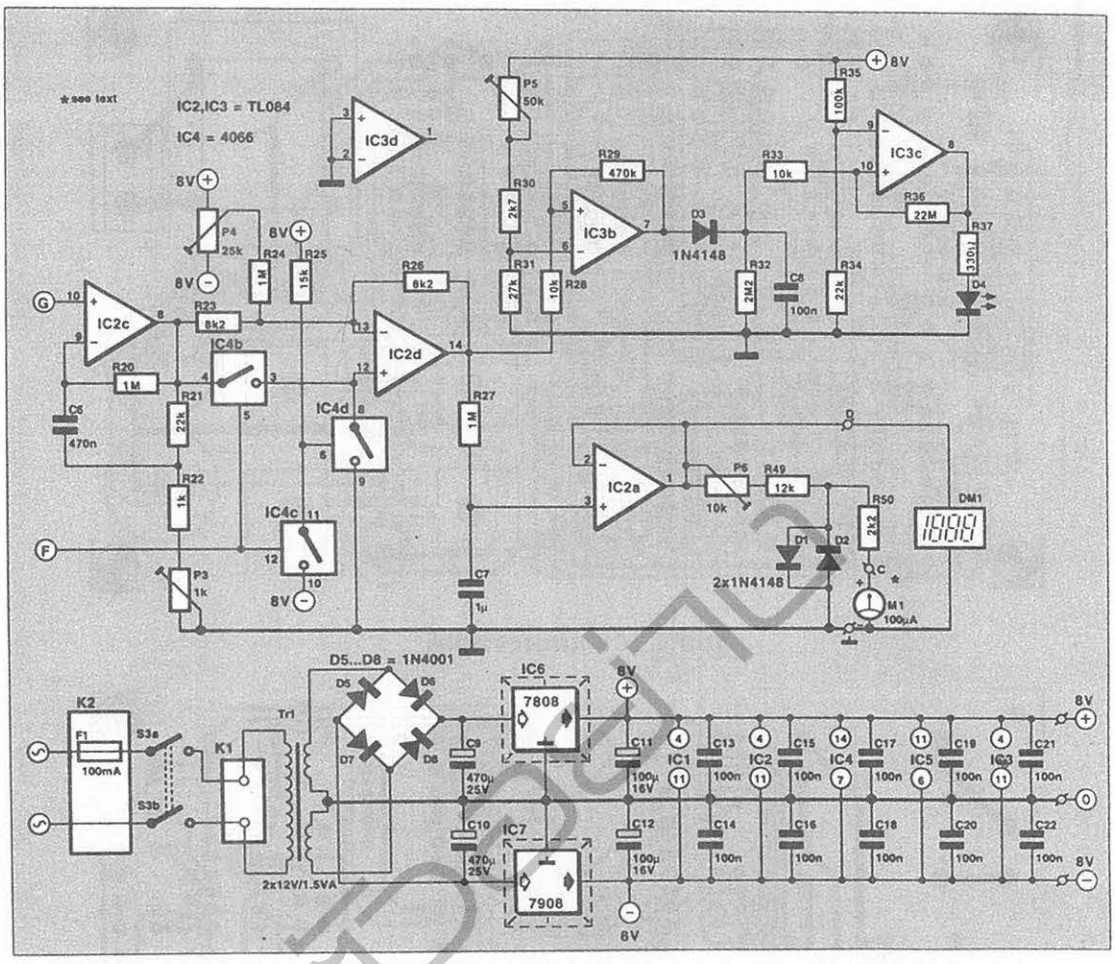
ในรูปที่ 2.100 ทางอินพุทใช้ดิฟเฟอเรนเชี่ยลแอมปลิฟายเออร์ (IC1d) โดยกระแสเอาท์พุทของมันจะเพิ่มอีกเท่าตัวใน IC1a โดยมีระดับกระแสพีคที่ 15 mA ซึ่งหากใช้ออพแอมป์ TL084 เพียงตัวเดียวก็ไม่อาจได้กระแสสูงขนาดนี้ ในการออกแบบจะเน้นระดับแรงดันที่ปรากฏคร่อม R17 ให้เท่ากับที่คร่อม R16 ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานเหล่านี้จึงเท่ากัน ดังนั้น แต่ละครึ่งไซเกิ้ลของกระแสที่ใช้ในวงจรวัดจึงมาจาก IC1d และ IC1a ตามลำดับ

สวิทช์กำหนดช่วงวัด (S1) ดูที่ S1c ซึ่งใช้กำหนดจุดทศนิยมของแผงตัวเลข ในกรณีใช้ตัวเลขแบบ LCD ขั้วของ S1c จะต้องต่อกับสัญญาณแบคเพลน (BP) แต่หากแผงตัวเลขเป็นชนิด LED ใช้ลอจิก 1 หรือ 0 ก็แล้วแต่ชนิดแผงตัวเลขที่ออกแบบมา

ภาคเร็กติฟายเออร์ และแหล่งจ่ายไฟ

ดูวงจรเช่นนี้ได้ในรูปที่ 2.101 ประกอบด้วยภาคเร็กติฟายเออร์ มีเตอร์ แหล่งจ่ายไฟ และการบอกภาวะเกินช่วงวัด (Overflow)

วงจรเร็กติฟายเออร์ใช้ IC2d ตามด้วยวงจรแอมป์ IC2c โดยที่เอาท์พุทจากวงจรวัดส่วนแรก ให้ 150 mV เต็มสเกล จึงไม่พอเพียงแก่การใช้กับมีเตอร์ที่เป็นแบบ 2 V เต็มสเกล อุปกรณ์เร็กติฟายเออร์ในกรณีนี้จะไม่ใช้ไดโอด แต่ใช้อีเล็คทรอนิกส์สวิทช์ IC4b กับ IC4d ซึ่งถูกควบคุมการทำงานโดยสัญญาณรูป



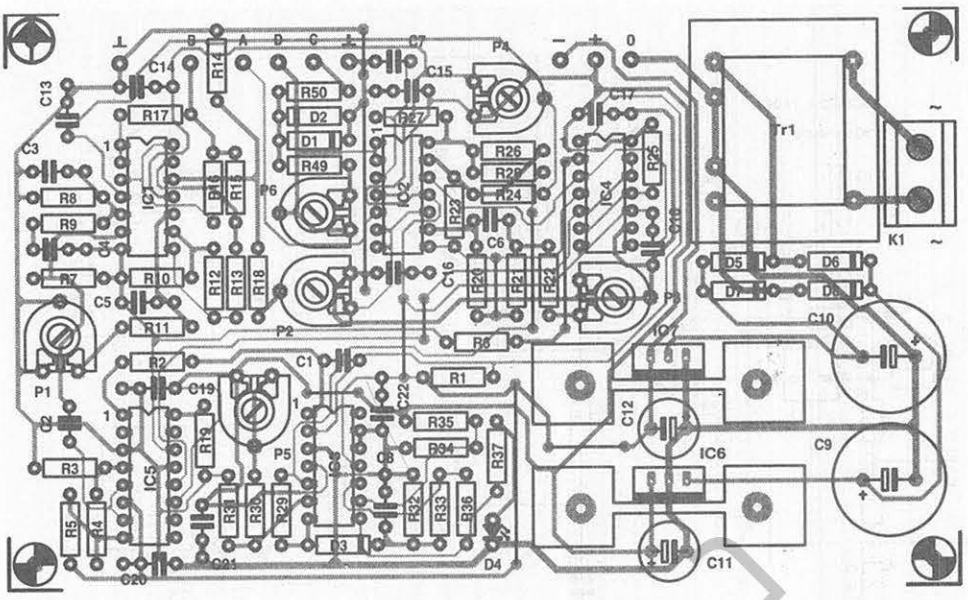
รูปที่ 2.101 แหล่งจ่ายไฟและวงจรเร็คติไฟร์

คลื่นจัตุรัสที่แปลงมาจากรูปคลื่นซายน์ของเวียนบริดจ์ออสซิลเลเตอร์ ส่วนชุดอินเวอเตอร์ใน IC4c จะไปควบคุมวงจร IC4d ทำให้ IC4b กับ IC4d ทำงานปิดเปิดวงจรสลับกันไปมา หาก IC4b ปิด วงจร IC2d จะขยายที่อัตราขยาย x1 เท่า แต่หาก IC4d ปิดวงจร IC2d จะขยายที่ -1 เท่า ทั้งนี้โดยการควบคุมจากสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส

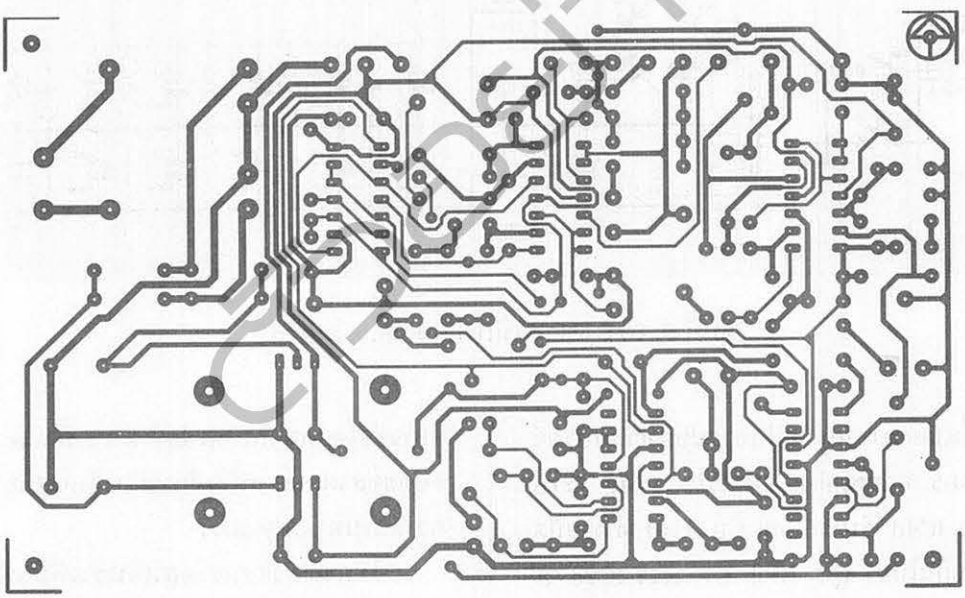
เอาท์พุทจากวงจรเร็กติฟายเออร์ถูกกรองให้เรียบโดยเน็ทเวิค R27-C7 โดยที่วงจรเน็ทเวิคนี้จ่ายโหลดได้เพียงเล็กน้อย ศักดาไฟฟ้าคร่อม C7 จึงต่อผ่านบัฟเฟอร์ IC2a ก่อนป้อนมายังมีเตอร์ ซึ่งอาจเป็นแบบแผงตัวเลขหรือแบบเข็มชี้ ในกรณีใช้แบบดิจิตอลก็อาจต่อโดยตรงกับบัฟเฟอร์ IC2a นี้ มีเตอร์ที่ใช้เป็นชนิดขดลวดเคลื่อนที่จึงมีการป้องกันโดยใช้ไดโอดและความต้านทานอนุกรมไว้

ในกรณีสัญญาณวัดสูงเกินช่วงที่มีเตอร์จะรับได้ IC2c จะเกิดขลิบ ทำให้แรงดันเร็กติฟายเออร์จะไม่เกิน 2 V ตลอดเวลาตรงกับช่วงความไวมีเตอร์ที่เลือกใช้ ในกรณีนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีการบอกภาวะโอเวอร์โฟล์

แต่ในกรณีของแผงตัวเลข ภาวะการเกิดโอเวอร์-โฟล์อาจสร้างได้โดยใช้ IC3b ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยแรงดันนั้นกำหนดที่พ็อท P5 ไปที่ระดับประมาณ 4 V เมื่อเอาท์พุทจากวงจรเร็กติฟายเออร์สูงกว่า 4 V จะทำให้บัฟเฟอร์คาพาซิเตอร์ C8 รับประจุ



รูปที่ 2.102 แผ่นวงจรพิมพ์



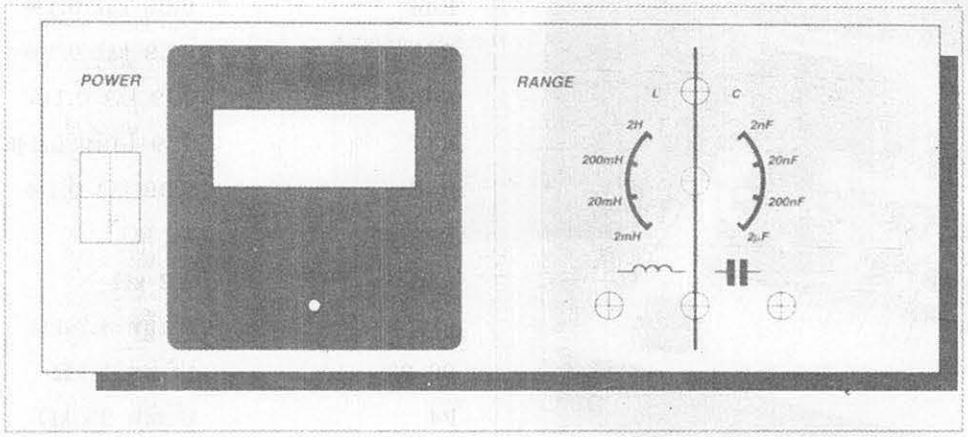
ไฟฟ้าผ่านทาง D3 ส่งผลให้เอาท์พุทของ IC3c เปลี่ยนสถานะลอจิกทันที และจึงทำให้ D4 สว่าง

การสร้างและปรับแต่ง

แผ่นวงจรพิมพ์ดูในรูปที่ 2.102 เริ่มจากใส่ลวดโยงจุดต่าง ๆ ตามด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กไล่ไปหาขนาดใหญ่ เช่น อีเล็คโตรไลติกคาพาซิเตอร์และหม้อแปลง ส่วนบรรดาความต้านทาน 0.1% ให้ต่อบัดกรีตรงกับขาต่าง ๆ ในสวิทช์เลือกช่วงวัด S1 ซึ่งเป็นแบบติดตั้งกับหน้าปัดเครื่องไม่ใช่แบบบัดกรีตรงกับแผ่น PCB

ในกรณีใช้แผงตัวเลข อย่าลืมเดินสายไปยัง S1c เพื่อควบคุมจุดทศนิยมบนแผงแสดงตัวเลข

แม้ว่าในวงจรจะมีปรีเซ็ทพ็อทต่าง ๆ มากถึง 6 ตัว แต่การปรับแต่งก็ทำได้ง่าย ๆ โดยเริ่มต้นปรับ



รูปที่ 2.103 หน้าปัดเครื่องต้นแบบ

ปรีเซ็ททุกตัวไปที่กึ่งกลางช่วงการปรับ

ในกรณีใช้มีเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่ ให้ต่อโวลท์มีเตอร์ในระหว่าง D กับกราวด์ เมื่อปลดไฟออก (Off) จากเครื่อง ปรับเข็มมีเตอร์ให้ตรงเลข 0 ก่อนเสมอ

ตั้ง S2 ไปที่ตำแหน่ง C (คาพาซิเตอร์) และปล่อยขาอินพุทลอยไว้ ปรับพ็อท P4 จนโวลท์มีเตอร์อ่านได้ 0 V เป็นอันปรับออฟเซ็ทเรียบร้อย

ต่อไปต่อคาพาซิเตอร์ 100 nF สองตัวขนานกันนำมาต่อกับขาอินพุททั้งสอง ปรับสวิทช์เลือกช่วงวัดไปที่ 200 nF เราไม่จำเป็นต้องทราบค่าละเอียดของคาพาซิเตอร์ดังกล่าว เฉพาะการทดสอบนี้เพื่อปรับค่าอัตราขยายใน IC2c โดยการปรับที่พ็อท P3 จนแรงดันที่ D อ่านได้ 2 V เนื่องจาก R27 กับ C7 ร่วมกันมีค่าเวลาไทม์คอนสแตนซ์ 1 วินาที แรงดันจึงเพิ่มขึ้นช้า ๆ จึงต้องปรับ P3 ช้า ๆ ด้วยเช่นกัน จากนั้นต่อรีซิสเตอร์ 10 kΩ ขนานกับคาพาซิเตอร์ดังกล่าว แล้วปรับพ็อท P1 จนแรงดันที่ D เท่ากับ 2 V ขณะนี้จะเกิดความแตกต่างของมุมไฟฟ้า (เฟส) ระหว่างรูปคลื่นซายน์กับรูปคลื่นจัตุรัสเท่ากับ 90 องศา

ต่อไปปลดรีซิสเตอร์ 10 kΩ ออก แต่ยังไม่ต้องปลดคาพาซิเตอร์ออกจากขั้วอินพุท ปรับพ็อท P2 ให้มีการป้อนกลับบวกด้วยอัตราขยาย x1 เท่าพอดี ซึ่งเงื่อนไขนี้จะยังไม่เกิดออสซิเลต แต่ก็ใกล้จะออสซิเลต หากจำเป็นให้ต่อออสซิลโลสโคปเข้ากับเอาท์พุทของ IC2b แล้วปรับพ็อท P2 จนการออสซิเลตหยุดหายไปพอดี หากไม่มีสโคปให้ปรับ P2 ไปที่ประมาณ 2/3 ของทางเดิน หรือประมาณ 750 โอห์ม ระหว่างขากลางกับกราวด์

นอกจากใช้ออสซิลโลสโคปแล้ว อาจใช้ฟังก์ชั่นเจนเนอเรเตอร์เพื่อป้อนรูปคลื่นสามเหลี่ยม จะช่วยให้ปรับ P2 ได้ละเอียดยิ่งขึ้น ในการทำเช่นนี้ให้ถอดบัดกรีแก่ R13 จาก IC1c แล้วป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมขนาด 3 V ที่ 1 kHz แก่ IC1c แล้วจับสโคปดูรูปคลื่นจัตุรัสที่ได้ ปรับ P2 จนรูปคลื่นสะอาดปราศจากการเกิดโอเวอร์ชู้ตใด ๆ

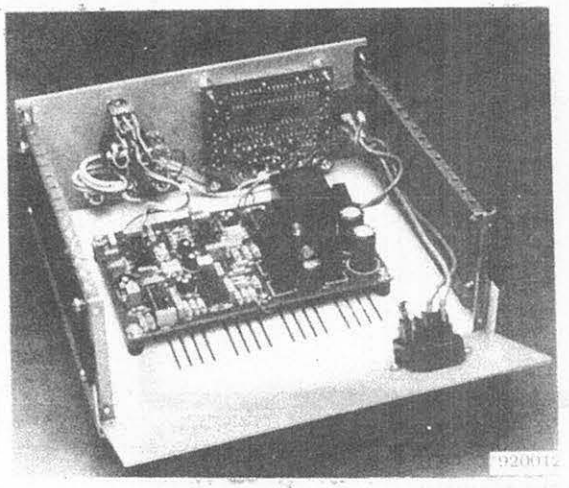
ต่อไปต่อคาพาซิเตอร์ 100 nF 1% จำนวน 2 ตัว (ในกรณีใช้มีเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่) หรือใช้ 180 nF 1% จำนวน 1 ตัว (ในกรณีใช้แผงตัวเลข) เข้ากับขั้วอินพุท แล้วปรับพ็อท P6 (กรณีของมีเตอร์) หรือ P3 (กรณีใช้แผงตัวเลข) จนค่าที่อ่านถูกต้องตามค่าของคาพาซิเตอร์ที่ใช้

รายการอุปกรณ์

ความต้านทาน

R1 R29	470 kΩ

cpe.eau



R2 R4 R28 R33	10 kΩ
R3	100 โอห์ม
R5 R10 R12→R15	
R18 R23 R26	8.2 kΩ
R6	33 kΩ
R7 R31	27 kΩ
R8 R9	15 kΩ
R11	12 kΩ
R16 R17	30 โอห์ม
R19	5.6 kΩ
R20 R24 R27	1 MΩ
R21 R34	22 kΩ
R22	1 kΩ
R25	15 kΩ
R30	2.7 kΩ
R32	2.2 kΩ
R35	100 kΩ
R36	22 MΩ
R37	330 โอห์ม
R38	100 kΩ 0.1%
R39	10 kΩ 0.1%
R40	1 kΩ 0.1%
R41	100 โอห์ม 0.1%
R42	10 โอห์ม 0.1%
R43	90.9 โอห์ม 0.1%
R44	9.09 kΩ 0.1%
R45	90.9 kΩ 0.1%
R46	909 kΩ 0.1%
R47	909 โอห์ม 0.1%
R48	9.09 kΩ 0.1%
R49	12 kΩ
R50	2.2 kΩ
P1	ปรีเซ็ท 4.7 kΩ
P2 P3	ปรีเซ็ท 1 kΩ
P4	ปรีเซ็ท 25 kΩ
P5	ปรีเซ็ท 47 kΩ
P6	ปรีเซ็ท 10 kΩ

คาพาซิเตอร์

C1 C2 C7	1 µF
C3→C5	10 nF
C6	470 nF
C8, C13→C20	100 nF
C9 C10	470 µF/25 V วางตั้ง
C11 C12	100 µF/16 V วางตั้ง
	180 nF 1% จำนวน 1 ตัว ใช้ในตอนปรับแต่งวงจร
	100 nF 1% จำนวน 2 ตัว ใช้ในตอนปรับแต่งวงจร

สารกึ่งตัวนำ

D1→D3	1N4148
D4	LED สีเหลือง ขนาด 5 มม.
D5→D8	1N4001

ไอซี

IC1→IC3	TL084
IC4	CD4066
IC5	LM13700
IC6	7808
IC7	7908

เบ็ดเตล็ด

K1	ลูกเต้า 2 ตำแหน่ง

cdสยาม

K2	ปลั๊กไฟ AC พร้อมฟิวส์ 100 mA แบบขาดช้า
K3→K5	บาบานาซ็อคเกต
S1	โรตารี่สวิทช์ 3 ชั้น 4 ตำแหน่ง
S2	โรตารี่สวิทช์ 2 ชั้น แบบโยก
S3	สวิทช์ DPDT พร้อมหลอดไฟ On
Tr1	หม้อแปลง 2×12 V 1.5 VA
M1	มีเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่ 100 ไมโครแอมป์
DM1	แผง DVM 3.5 หลัก เต็มสเกล 2 V

ฮีทซิงค์สำหรับ IC6 และ IC7

การใช้แผงตัวเลขแบบ LCD

ในการออกแบบแผงตัวเลข 3 1/2 หลัก แบบ LCD จะใช้ไอซีเบอร์ ICL 7106 ซึ่งภายในไอซีนี้มีวงจรต่างๆ ครบถ้วน เกี่ยวกับการแปลงแรงดันเป็นตัวเลขดิจิตอล โดยปัจจุบันมีจำหน่ายเป็นชุดคิทมาตรฐานมากมาย

ในรูปที่ 2.103 แสดงหน้าปัดเครื่องแบบใช้แผงตัวเลข LCD ซึ่งต้องการสัญญาณเฟสตรงกันข้ามปรากฏที่ขา BP (แบคเพลนด้วย) จึงใช้ทรานซิสเตอร์ T1 ทำหน้าที่นี้ ด้านวงจรอินพุทเป็นโลว์พาสฟิลเตอร์มีความถี่คัทออฟที่ 16 Hz เพื่อตัดทอนสัญญาณรบกวนภาคแปลง A/D ในตัวไอซีนี้ C2 กำหนดสัญญาณความถี่อ้างอิงในไอซี 7106

ส่วน R4 และ C3→C5 เป็นส่วนหนึ่งของวงจรภาค A/D ในไอซีนี้ ชุดจ่ายไฟที่เหมาะสมคือ ± 5 V ได้จากไอซีเร็กกูเลเตอร์ IC2 กับ IC3

รายการอุปกรณ์

ความต้านทาน

R1	22 MΩ
R2 R5	1 MΩ
R3	100 kΩ
R4	470 kΩ
R6	18 kΩ
R7	10 kΩ
P1	พ็อท 4.7 kΩ แบบปรับ 10 รอบ

คาพาซิเตอร์

C1	10 nF
C2	150 pF
C3 C6 C7	100 nF
C4	47 nF
C5	220 nF
C8 C9	330 nF
C10 C11	100 µF/25 V วางแนวตั้ง

สารกึ่งตัวนำ

T1	BS170

ไอซี

IC1	ICL7106
IC2	78L05
IC3	79L05

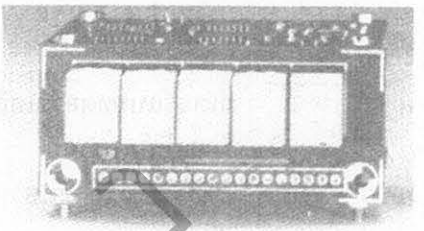
เบ็ดเตล็ด

LCD1	แผงแสดงผล 3 1/2 หลัก ซ็อคเกต 40 ขา

ลูกเต๋า 20 ขา x2 ชุด

มาตรวัดความถี่ขนาดเล็ก

ด้วยการใช้ไอซีรุ่นใหม่ ๆ ทำให้การออกแบบมาตรวัดความถี่ระบบตัวเลขดิจิตอลมีขนาดเล็ก โดยให้ตัวเลขมากถึง 4 1/2 หลัก ในขณะที่มิได้ใหญ่กว่ากล่องไม้ขีดดังในภาพ สามารถวัดความถี่ได้จนถึง 199.99 kHz แต่หากมีการเพิ่มวงจรปรีสเกลเลอร์ก็จะทำให้วัดความถี่ได้สูงกว่า 1 GHz



อธิบายวงจร

วงจรในรูปที่ 2.105 แบ่งออกได้ 3 ภาคการทำงาน โดยแยกจากกันให้เห็นชัดด้วยกรอบของแนวเส้นประ

สัญญาณที่ต้องการทราบความถี่จะป้อนผ่าน IC5c และ IC5d ไปยัง IC2 เคาน์เตอร์ IC2 จะขับตัวเลข 4 ใน 5 หลักของขดลวดตัวเลข LED แบบ 7 เซคเมนต์ชนิดคอมม่อนคาโถด (LD2→LD5) ในขณะที่ตัวเลขหลักที่ 5 ถูกควบคุมโดยวงจรพิเศษซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

วงจร IC1 จะสร้างเวลาเปิดเกทอันเป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้สัญญาณนาฬิกาเข้าสู่เคาน์เตอร์ โดยใช้ผลึกแร่ควบคุมความถี่ที่ 5.24288 MHz ช่วงเวลาเปิดเกทคือ 100 ms หรือ 1 วินาที ก็แล้วแต่ตำแหน่งของสายลวดโยงที่ตำแหน่ง JP1 ถ้าขา 11 ของ IC1 เป็นลอจิกสูง เวลาการเปิดเกทจะเป็น 0.1 วินาที (100 ms) ซึ่งนานพอจนวัดความถี่ได้สูงถึง 200 kHz แต่หากขา 11 ของ IC1 เป็น 0 V (Low) จะวัดความถี่ได้สูงถึง 20 kHz แต่ไม่ว่ากรณีใดที่กล่าวมานี้ การวัดแต่ละครั้งจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในเวลา 2 วินาที

ไอซี IC4 บอกถึงภาวะโอเวอร์โฟล์ซึ่งจะนำไปควบคุม LD1 กล่าวคือเมื่อ IC2 นับถึงเลขสูงสุดคือ 9999 จะเกิดพัลซ์ลูกหนึ่งขึ้นที่ขาเอาท์พุท C/B (ขา 1) IC4 ก็จะรับพัลซ์นี้ โดยที่ช่วงก่อนเริ่มเปิดเกท จะมีการรีเซ็ทมาตรวัดทุก ๆ ครั้งเพื่อให้เริ่มนับจากศูนย์ เมื่อพัลซ์ดังกล่าวมาถึง IC4 เอาท์พุท Q1 ของ IC4 จึงเป็นลอจิก 1 เพื่อบ่งว่าได้นับถึง 1000 แล้วพอดี จากนั้น IC6 จึงถูกสั่งงานผ่านทาง IC5 เพื่อให้ LD1 ส่องสว่างเป็นช่วงเวลาหนึ่ง (ขึ้นกับค่าของ C4) จนกว่าถึงช่วงการนับครั้งใหม่ และเพื่อมิให้แผงตัวเลขกะพริบขณะทำงาน IC6 จึงถูกสั่งงานโดย T3 ที่ทำเช่นนี้เป็นสิ่งจำเป็น เพราะในช่วงขณะวัดความถี่แต่ละครั้งข้อมูลที่ขาเอาท์พุทของ IC2 จะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ในขณะที่จะไม่มีการใช้บัฟเฟอร์สำหรับข้อมูลที่จะปรากฏใน LD1 ซึ่งจะเป็นสาเหตุว่าทำไมให้ IC6 ทำงานหน้าที่นี้ในช่วงการวัดแต่ละครั้ง (ซึ่งกินเวลาไม่เกิน 1 วินาที) หากในช่วงการวัดแต่ละครั้งเกิดพัลซ์จาก IC2 ขึ้นอีกเป็นครั้งที่สอง เอาท์พุท Q2 ของ IC4 จะเป็นลอจิก 1 ทำให้หลักเซคเมนต์ใน LD1 ทำงานผ่านทาง T1 เพื่อบอกว่าเกิดภาวะโอเวอร์โฟล์ ความถี่การกะพริบของภาวะการเกิดโอเวอร์โฟล์ จะเท่ากับช่วงการสุ่มวัดแต่ละครั้งนั่นคือ 0.5 วินาที

ตัวอย่าง