

๒๕๑.๖๑๕

๗๑๑๐

๐ 3

การออกแบบและสร้าง เครื่องนับและกัจิตัลลมิติเตอร์

ปริญญาโท

ของ

ประสงค์ สิริพิทไชยวรรณ

สำนักขอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร 3921575 3915058

๖ 2 S.A. 2523

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

กุมภาพันธ์ 2523

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

82858

การออกแบบและสร้างเครื่องนับและกัลลิมัลติมิเตอร์

บทคัดย่อ

ของ

ประสงค์ สิริพิทไชยวรรณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
กุมภาพันธ์ 2523

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายจะศึกษาลักษณะสมบัติของวงจรถรรูกและวงจรถิงเส้น เพื่อออกแบบวงจรไฟฟ้า ที่สามารถทำงานได้ตามกำหนด

วงจรไฟฟ้าที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้เป็นแบบดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย วงจรย่อยเจ็ดวงจร ทำงานรวมกัน

ประสิทธิภาพของวงจรมี ขึ้นอยู่กับการกำหนดฐานเวลาของวงจรมัลติมิเตอร์ที่มี เสถียรภาพสูง และไม่ขึ้นอยู่กับการรบกวน หรือความตึงเครียดที่จ่ายให้กับวงจรซึ่งอาจ เปลี่ยนค่าไปได้ในช่วง 10 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพในการวัดค่าต่าง ๆ จะมีความผิดพลาดในการวัดอยู่ระหว่าง 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 20 เปอร์เซ็นต์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF COUNTER
AND DIGITAL MULTIMETER

AN ABSTRACT

BY

PRASONG SIRIPUTHAIWON

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree
at Srinakharinwirot University
February 1980

The purpose of this research is to determine the characteristics of the logic and linear circuits in order to design an instrument which is able to operate according to specified objectives.

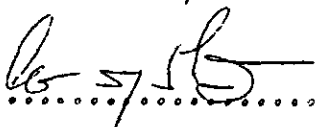
In particular, the instrument, composing of seven co-operated electronic circuits, was constructed to be used as a digital multimeter.

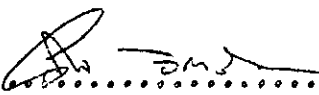
The accuracy of this instrument depends on the stability of the time base signal generator, but not on the temperature nor the voltage supply which may vary within the range of 10%.

The precision of various measurements is between $\pm 10\%$ to $\pm 20\%$.

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิติได้พิจารณาปริญญาบัตรฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้.

..... ค.ม.ภว.วิ.ว.ค. ประธาน

.....  กรรมการ

.....  กรรมการ

ประกาศคุณูปการ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สมทรง วิสกุล อาจารย์โช สาลีฉิน อาจารย์วันล จิตวัฒนากร ซึ่งได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานและกรรมการที่ปรึกษา พร้อมทั้งได้ให้ความช่วยเหลือในการตรวจแก้ต้นฉบับปริญญาานิพนธ์ จนเป็นที่เรียบร้อย

ขอขอบคุณ เรืออากาศโทอรุณชัย บุญนอม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทดลองทำโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณสมบัติ สุวรรณพิทักษ์ ที่ได้ช่วยจัดทำวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดลองไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณบรรดาญาติ มิตร ที่มีส่วนร่วมเป็นกำลังใจจนศึกษางานนี้สำเร็จลง

ด้วยดี

ประสงค์ สิริพิทไชวรรณ

ตุลาคม 2522

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
คำนำ	1
ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า	5
ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	5
ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	6
ค่านิยมศัพท์เฉพาะ	6
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการค้นคว้า	7
2 ทฤษฎีและการออกแบบ	16
การแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า	16
การแปลงความต้านทานให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า	17
การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสตรง และการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ	18
การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นความถี่	21
การนับ	23
การนับความถี่	29
การวัดคาบเวลา	30
การวัดความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	31
การออกแบบ	33
- วงจร เครื่องนับ	33
- วงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	39
- วงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	40
- วงจร วัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	42
- วงจร วัดความต้านทาน	42
- วงจร วัดความจุของตัวเก็บประจุ	43
- การวัดคาบเวลา	44

3	การสร้างเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ และผลการทดลอง	45
	ลักษณะของเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์	45
	- เรือนเครื่อง	45
	- สวิตช์และปุ่มปรับ	45
	วงจรและชิ้นส่วน	48
	แผนวงจรพิมพ์	54
	การปรับแต่งเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์	69
	ผลการทดลอง	71
4	บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	83
	บทสรุป	83
	วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า	83
	ผลการศึกษาค้นคว้า	84
	การอภิปรายผล	85
	ข้อเสนอแนะ	86
	บรรณานุกรม	88
	ภาคผนวก	91

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 วงจรรวม (Summing network)	12
2 วงจรแบบเป็นขั้น (Ladder network)	13
3 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าอย่างง่าย	17
4 วงจรแปลงความต้านทานเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า	18
5 วงจรแยกความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด	20
6 แผนผังการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	22
7 วงจรฟิลิพพลอฟ	24
8 แผนผังของมาสเตอร์-สเลฟ ฟิลิพพลอฟ	27
9 สัญญาณลักษณะของมาสเตอร์-สเลฟ เจเค ฟิลิพพลอฟ	27
10 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากเครื่องนับสิบ	29
11 แผนผังการนับความถี่	30
12 แผนผังการวัดคาบเวลา	30
13 วงจร R-C อย่างง่าย	31
14 หลักการวัดค่าความจุของตัวเลขประจุ	32
15 วงจรสร้างฐานเวลา โดยควบคุมด้วยคริสตัล	33
16 วงจรสร้างฐานเวลาแบบที่ 2	34
17 วงจรสร้างสัญญาณด้วยวงจรมัลติไพลีเมอร์ 7490	35
18 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการนับ	35
19 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการนับ (วงจรรายนอก)	36
20 วงจรนับสิบ	36
21 รูปสมมูลของวงจรมัลติไพลีเมอร์ 74 S 112	37
22 วงจรนับสิบประกอบจาก 74 S 112	37
23 วงจรส่วนแสดงผล	38
24 วงจรตัวคูณป้อน	38

25	วงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	40
26	วงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสลับ เป็นศักย์ไฟฟ้าตรง	41
27	วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ	41
28	วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	42
29	วงจรจ่ายกระแสคงที่	43
30	วงจรสวิตช์	44
31	ภาพถ่ายของ เครื่องนับและ เครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์	46
32	ตำแหน่งสวิตช์และปุ่มปรับคานหนา	46
33	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจรคิกรูปคลื่น	56
34	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจรคิกรูปคลื่น	56
35	แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรคิกรูปคลื่น	57
36	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	58
37	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	58
38	แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่	59
39	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 20 V. วงจรจ่ายกระแสคงที่ และวงจรวัดความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	60
40	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 20 V. วงจรจ่ายกระแสคงที่ และวงจรวัดความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	60
41	แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรตามภาพประกอบ 39 และ 40	61
42	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	62
43	แผนวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	62
44	แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง	63
45	แผนวงจรพิมพ์ของวงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 15 V.	64

ภาพประกอบ	หน้า
46 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของภาพประกอบ 45	64
47 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า	65
48 แผนวงจรพิมพ์วงจรนับสิบมองจากด้านบน	66
49 แผนวงจรพิมพ์วงจรนับสิบมองจากด้านล่าง	67
50 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรมับสิบ	68
51 วงจรเรกกูเลเตอร์ใช้วงจร uA 723	96
52 วงจรเรกกูเลเตอร์ ± 5 V.	97
53 วงจรไฟฟ้าคาตรรก และสัญญาณขึ้นของวงจร NOT	99
54 วงจร AND	100
55 วงจร OR	100
56 วงจรตรรก NAND และ NOR	101
57 วงจรอสเตเบิลมีลิวเวเบอร์เตอร์	104
58 ทิศทางที่ C_2 ถูกประจุ และ Q_2 นำกระแส	105
59 ทิศทางที่ C_2 ปล่อยประจุ และ Q_1 นำกระแส	105
60 รูปร่างและการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้า วัตต์คอด เลคเตอร์และเบส	106
61 วงจรสมมูลของภาพประกอบ 60	108

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	สถานะของฟลิปฟลอป 4-bit ripple counter	25
2	สถานะของ เจเค ฟลิปฟลอป	26
3	สถานะต่าง ๆ ของมาสเตอร์สเลฟ เจเค ฟลิปฟลอป	28
4	ผลการวัดความถี่ของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยออสซิลโลสโคปแบบสองช่วง	73
5	ผลการวิเคราะห์ความต้านทานของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยวงจรมัลติ เครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่องออสซิลโลสโคปมัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77	74
6	ผลการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยวงจรมัลติ	75
7	ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่องออสซิลโลสโคปมัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77 (การวิเคราะห์ความแปรปรวน)	76
8	ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่องออสซิลโลสโคปมัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77 (เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย)	78
9	ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่องออสซิลโลสโคปมัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77 (การวิเคราะห์ความแปรปรวน)	79

- 10 ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องจักรตัดมัดคิมิเตอร์
 เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และ
 เครื่องอิลคโตรนิคมัดคิมิเตอร์ โมเดล LV-77 (เปรียบเทียบ
 ค่าเฉลี่ย)

คำนำ

เป็นที่ประจักษ์ชัดแล้วว่า การวัดปริมาณเชิงเป็นผลจากการทดลองต่าง ๆ มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางวิทยาศาสตร์ ทฤษฎีหรือข้อสมมติฐานที่นำมาอธิบายปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน ต่างก็ได้รับการยืนยันด้วยผลการทดลองแล้วว่าเป็นความจริง แต่ในการทดลองบางอย่าง อาจได้ผลไม่ตรงความคาดหมายทางทฤษฎี ความขัดแย้งหรือความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการวัดอย่างละเอียดนี้ ทำให้มีการพัฒนาทฤษฎีขึ้นใหม่ เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ในขณะเดียวกัน นักปฏิบัติทางวิทยาศาสตร์ก็ได้พยายามปรับปรุงวิธีการและเครื่องมือวัดที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ดังปรากฏอยู่ในปัจจุบัน

การค้นคว้าทดลองทางวิทยาศาสตร์ มีความสำคัญอยู่ที่วิธีดำเนินการทดลอง และการจับบันทึกข้อมูล การบันทึกข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ด้วยกราฟ เป็นวิธีที่สามารถตีความและวิเคราะห์ข้อมูลได้ที่ดีที่สุด (Wedlock. 1969 : 22) แต่การบันทึกข้อมูลด้วยกราฟหรือการสร้างกราฟที่ถูกต้อง กระทำได้ยาก และอาจทำไม่ได้เสมอไป ในกรณีเช่นนี้ เราอาจนำเอาวิธีการบันทึกข้อมูลแบบอื่นมาใช้แทนได้ เช่น การแปลงข้อมูลดิบต่าง ๆ ให้เป็นตัวเลข ซึ่งสามารถนำไปตีความและวิเคราะห์ข้อมูลได้เช่นเดียวกับวิธีการกราฟ

ในระยะแรกของการพัฒนาเครื่องบันทึกข้อมูลแบบเป็นตัวเลขนั้น ได้มีการสร้างเป็นเครื่องบันทึกกล (Machine register) เครื่องบันทึกนี้จะทำงานโดยมีส่วนหนึ่งหมุนไปรอบแกน ซึ่งมีเฟืองจักรติดอยู่เป็นชุด เฟืองจักรจะมีอัตราการทวนรอบสัมพันธ์กับปริมาณที่ต้องการวัด การหมุนของเฟืองจักรจะขับให้แถบตัวเลขเปลี่ยนค่าไป เครื่องบันทึกกลได้รับการพัฒนาต่อไปอีกกลายเป็นเครื่องบันทึกไฟฟ้า ซึ่งยังมีส่วนภายนอกที่

เคลื่อนที่ ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ส่งเข้าไปยังเครื่องนับสัญญาณพัลส์ แต่ การแสดงผลการนับยังคงต้องใช้ระบบกลไกอยู่เช่นเดิม (Marcus and Lenk. 1971 : 22) คอมพิวเตอร์ดิจิทัลได้พัฒนาขึ้น และถูกนำไปประยุกต์อย่าง กว้างขวาง เช่น ในการนับเชิง การสำรวจ การคำนวณ นาฬิกา รวมทั้งเครื่องมือวัด ต่าง ๆ ในระยะเวลาดังกล่าว นักคิดว่าวิจัยก็ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ก็น้อย่างกว้างขวาง เพื่อที่จะนำเอามาแทนชิ้นส่วนวงจรเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบเดิม สิ่งประดิษฐ์ที่ได้จากผลงานการวิจัยต่าง ๆ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด วงจรสำเร็จรูป แบบต่าง ๆ เป็นต้น

เครื่องมือวัดไฟฟ้าที่ใช้กันแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน เป็นชนิดขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil meter) เครื่องจะทำงานได้โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งจะมีปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction) กับสนาม แม่เหล็กถาวร ทำให้ขดลวดหมุน เข็มที่ติดอยู่กับขดลวด จะแสดงมุมที่หมุนไป มุมนี้จะถูก นำไปแบ่งเป็นมาตราส่วนให้เหมาะสมกับปริมาณที่ต้องการวัด เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่มี โครงสร้างแบบนี้ จัดเป็นเครื่องมือประเภทอนาลอก (Analog instrument) (Marcus and Lenk. 1971 : 99) เพราะสามารถแสดงผลการวัดเป็น ปริมาณแบบเดียวกับสิ่งที่ถูกวัด เครื่องมือประเภทนี้ สร้างได้ง่าย ราคาถูก แต่ไม่เหมาะสม กับเทคนิควิทยาในปัจจุบัน เพราะมีความคลาดเคลื่อนสูง เช่น การอ่านค่ากระแสไฟฟ้า จากตำแหน่งของเข็มชี้บนมาตราส่วน เราไม่สามารถอ่านได้แม่นยำเกินกว่า 1 ใน 10 ส่วน ของช่องเล็กบนมาตราส่วน ค่าที่อ่านได้จึงมีความ คลาดเคลื่อนเสมอ การวัดปริมาณทาง ไฟฟ้าโดยให้ความแม่นยำสูง อาจทำได้โดยอาศัยการปรับสมดุลย์ในวงจรบริดจ์ (Bridge circuit) แต่การวัดโดยวิธีนี้ต้องอาศัยความชำนาญและใช้เวลามาก เครื่องมือที่สามารถวัดค่าได้แม่นยำ แสดงผลการวัดในรูปที่จะอ่านและบันทึกได้ทันที โดยอ่านได้เป็นตัวเลขโดยตรง คือ เครื่องมือวัดประเภทดิจิทัล (Digital instrument)

วิธีการทำงานของเครื่องมือวัดประเภทดิจิทัล แยกได้เป็นสองแบบ (Oliver and Cage. 1971 : 213 - 230) คือ

1. แบบที่ไม่ใช้เทคนิคการอินทิเกรต (Nonintegrating type) คือ วิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรทางไฟฟ้าที่จะทำการวัดให้อยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนต่อกัน แล้วสร้างเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นมา มีอยู่หลายชนิด คือ

1.1 เทคนิคการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potentiometric) ภายนอกกับศักย์ไฟฟ้าเทียบภายใน (Internal reference voltage) ได้แก่ ระบบการปรับความต่างศักย์แบบอัตโนมัติด้วยมอเตอร์ หรือเรียกว่า Servo system ระบบการปรับความต่างศักย์ด้วยตรรกะไฟฟ้า (Electronic logic) ระบบนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบภายในจะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณตรรกะเป็นอนาล็อก และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อศักย์ไฟฟ้าสมดุลกันแล้ว ศักย์ไฟฟ้าเทียบภายในจะถูกลบค่าออกเป็นศูนย์ ด้วยลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนาล็อกที่เป็นศักย์เทียบแบบขั้น ๆ และต่อเนื่องจึงเรียก ระบบนี้ว่า Successive approximation ถ้าหากศักย์ไฟฟ้าไม่ถูกลบค่าออก เป็นศูนย์ ก็เรียกระบบนี้ว่า Null balance

1.2 เทคนิคการใช้ศักย์แรมพ์ (Ramp technique) ศักย์แรมพ์ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่มีอัตราการเพิ่มแปรผันกับเวลา มีอยู่สองระบบ คือ ศักย์แรมพ์แบบเชิงเส้นตรง (Linear ramp) และศักย์แรมพ์แบบเป็นขั้น ๆ (Staircase ramp)

ข้อเสียของระบบที่ไม่ใช้เทคนิคการอินทิเกรต คือ การวัดขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าเทียบภายใน ความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Linearity of voltage divider) ใช้เวลานานในการทำให้เกิดสมดุล ระดับสัญญาณรบกวนที่เข้ามากับสัญญาณที่จะวัดก็จำกัดความเร็วในการวัด และจำกัดจำนวนหลักของตัวเลขที่ใช้แสดงผล

2. แบบที่ใช้เทคนิคการอินทิเกรต (Integrating type) ได้แก่ ระบบการเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ (Voltage-to-frequency

conversion) ระบบการปรับศักย์ไฟฟ้าด้วยการอินทิเกรต (Potentiometric to integrating) และระบบการอินทิเกรตสองแกน (Dual slope)

ข้อดีของระบบเทคนิคการอินทิเกรต คือ การขจัดสัญญาณรบกวนที่แทรกเข้ามา กับสัญญาณที่จะทำการวัดได้ การวัดไม่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าเทียบ จึงสามารถวัดได้เร็วขึ้น ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ประกอบกันขึ้นเป็น Integrator ไม่มีผลต่อความเที่ยงตรงของระบบ แต่ความเที่ยงตรงของระบบขึ้นอยู่กับขนาดและความมีเสถียรภาพของการป้อนประจุกลับไปยังจุดรวมสัญญาณ (Summing junction) ซึ่งกระทำโดยวงจรกำเนิดพัลส์

โดยทั่วไปเครื่องมือวัดดิจิทัลส่วนใหญ่ เป็นแบบไม่ใช้เทคนิคการอินทิเกรต ก็านิยมสร้างเป็นดิจิทัลโวลท์มิเตอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันพอสมควร คือ จำนวนพิสัยการวัด (Measurement range) จำนวนตัวเลขแสดงผล ความละเอียดในการวัด ความเร็วในการวัด การขจัดสัญญาณรบกวน (Noise rejection) และระบบการแสดงผล เครื่องดิจิทัลโวลท์มิเตอร์ ไม่สามารถวัดความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้โดยตรง ขอบเขตการใช้งานมีจำกัด เครื่องมือวัดความถี่ที่ผลิตจำหน่ายในต่างประเทศ มีราคาแพง การใช้งานมีความยุ่งยากซับซ้อน และมักจะทำการผลิตแยกต่างหากจากดิจิทัลโวลท์มิเตอร์ นอกจากนี้ผู้ผลิตเครื่องมือวัดตัวแปรทางไฟฟ้าประเภทดิจิทัล จะไม่ผลิตให้สามารถวัดตัวแปรได้มากกว่าสามชนิดในชุดเดียวกัน เรียกเครื่องมือเหล่านี้ว่า ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดความต้านทาน ความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จึงยังไม่มีเครื่องมือวัดดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่สมบูรณ์

ในปัจจุบัน เทคนิคทางการผลิตวงจรสำเร็จรูปมีประสิทธิภาพสูงมาก วงจรเหล่านี้สามารถทำงานโคหลายคาน เช่น วงจรตรรก วงจรออปแอมป์ และวงจรไมโครแบบอื่น ๆ ซึ่งมีขนาดเล็ก และสามารถทำงานได้โดยสิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าน้อย ประกอบกับการมีสิ่งประดิษฐ์จำพวกดาร์กิงตัวนำชนิดอื่น ๆ ที่สามารถทำงานร่วมกับวงจรสำเร็จรูปเหล่านี้ได้ก็ ทำให้อยู่ในฐานะที่จะทำการพัฒนาเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อออกแบบปรับปรุง และสร้างเครื่องวัดคิจิตัลลิมิตเตอร์ ใหม่ประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องนับความถี่ และเครื่องคิจิตัลลิมิตเตอร์ ให้สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าต่อไปนี้ได้ คือ
 - 1.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ
 - 1.2 ความต้านทาน
 - 1.3 ความจุของตัวเก็บประจุ
 - 1.4 ความถี่และคาบเวลาของคลื่นสัญญาณไฟฟ้า
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องมือนี้ โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน ในห้องปฏิบัติการ
3. เพื่อเสนอแนะแนวทางในการสร้างเครื่องมือที่สามารถสร้างและใช้ได้ง่าย และมีราคาประหยัดไว้ใช้ในห้องปฏิบัติการวิชาฟิสิกส์

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. เครื่องมือนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกและความรวดเร็วในการวัดค่าต่าง ๆ ในการปฏิบัติการทางไฟฟ้า
2. เครื่องนับความถี่ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของวงจร สามารถทำการดัดแปลงเพื่อใช้วัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีอื่น ๆ ที่สามารถแปลงเป็นปริมาณทางไฟฟ้าได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดหรือเป็นด่างของสารละลาย เป็นต้น
3. ความรู้และเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้รับจากการศึกษา จะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนวิชาไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ ในระดับอุดมศึกษา เช่น ปรโยคอาชีวศึกษา ชั้นสูง ประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาศึกษาชั้นสูง และปริญญาตรี

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. การออกแบบและสร้างเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ มีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้ คือ

1.1 มีหน้าปัดเป็นตัวเลขระบบเต็มหลัก (Full digit) จำนวนแปดหลัก ความละเอียด ± 1 Count จากนิพจน์ 10^5

1.2 ชิ้นส่วนของวงจรเป็นสิ่งประดิษฐ์จำพวกสารกึ่งตัวนำและวงจรไมโครที่สามารถหาซื้อได้ง่าย

1.3 วงจรกำเนิดฐานเวลา (Time base) เป็นวงจร Free running oscillator หรือ Crystal oscillator ความถี่ 1 MHz

2. การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและการทำงานของวงจรตรรกและวงจรออฟแอมป์ เป็นสำคัญ

คำนิยามศัพท์เฉพาะ

การออกแบบ หมายถึง การกำหนดลักษณะวงจรไฟฟ้า และส่วนประกอบซึ่งเป็นผลจากการศึกษาค้นคว้า

การสร้าง หมายถึง การนำเอาผลที่ได้จากการออกแบบมาประกอบกันเข้าเป็นชุดเครื่องมือ แล้วสามารถทำงานตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ได้

เครื่องนับ หมายถึง เครื่องที่ใช้วัดความถี่ของคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

เครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ หมายถึง เครื่องมือวัดปริมาณต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน ค่าความจุของตัวเก็บ

ประจุไฟฟ้า ความถี่และคาบเวลาของคลื่นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งประกอบรวมเข้าเป็นชุดเดียวกัน โดยมีส่วนแสดงผลเป็นตัวเลข

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการค้นคว้า

ฮอลล์มาร์ก (Hallmark. 1977 : 38) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ
คุณสมบัติและการใช้งานของมิเตอร์สี่ชนิด คือ DVM (Digital volt meter)
VTVM (Vacuum tube volt meter) FETVOM (Field effect
transistor volt ohm meter) และ VOM (Volt ohm meter) แบ่งตาม
ลักษณะการนำไปใช้งานได้สองประเภท ดังต่อไปนี้ คือ

1. ประเภทใช้งานบริการทั่วไป (Service type)

ความละเอียด (Accuracy) พบว่า DVM ให้ความละเอียด
ในการอ่านสูง 0.1 - 2 เปอร์เซ็นต์ VTVM มีความละเอียด 3 - 5 เปอร์เซ็นต์
FETVOM มีความละเอียด 3 - 4 เปอร์เซ็นต์ และ VOM มีความละเอียด 1 - 5
เปอร์เซ็นต์

ขีดจำกัดทางความถี่ (Frequency limit) พบว่า DVM
มีช่วงการใช้งานแคบ คือ จาก 20 Hz ถึง 20 kHz ในขณะที่แบบอื่นสามารถ
ทำงานได้ดีในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 3 MHz จนถึง 250 MHz (โดยมีอุปกรณ์
อย่างอื่นช่วย)

ความต้านทานต่อกระแสสลับ (AC impedance) DVM VTVM
และ FETVOM มีความต้านทานขาเข้าต่อกระแสสลับสูงถึง 10 Megohm ส่วน
VOM อัตราส่วนของความต้านทานต่อความต้านทาน มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5 Kiloohm
ต่อโวลต์

การตอบสนองต่อรูปคลื่น (Waveform response) DVM และ
VOM ตอบสนองต่อรูปคลื่นแบบเฉลี่ย ส่วน VTVM และ FETVOM ตอบสนองต่อ
รูปคลื่นแบบสูงสุด และสูงสุดถึงต่ำสุด ได้ดี

การอ่านความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage reading) DVM
สามารถใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่า ๆ ได้ถึง 10 μ V (Micro volt) ดีกว่าชนิด

VTVM FETVOM และ VOM ซึ่งสามารถอ่านได้ถึง 0.2 mV 0.1 mV และ 5 mV ตามลำดับ ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าสูงชนิด DVM อ่านได้โดยเฉลี่ย 1,000 V ซึ่งต่ำกว่าชนิด VTVM FETVOM และ VOM ซึ่งอ่านได้โดยเฉลี่ยถึง 1,500 V 1,500 V และ 6,000 V ตามลำดับ

การอ่านค่าความต้านทาน (Resistance reading) DVM อ่านค่าความต้านทานค่า ๆ ได้เฉลี่ย 1 Ohm ชนิดอื่น ๆ อ่านได้เฉลี่ย 0.2 Ohm ส่วนการอ่านค่าความต้านทานค่าสูง DVM อ่านได้สูงสุดเฉลี่ย 10 Megohm ชนิด VTVM FETVOM และ VOM ซึ่งอ่านได้เฉลี่ย 1,000 Megohm 1,000 Megohm และ 100 Megohm ตามลำดับ

2. ประเภทใช้งานในห้องปฏิบัติการ (Laboratory type)

ความละเอียด DVM ให้ความละเอียดสูงมาก คือ ตั้งแต่ 0.4 - 0.004 เปอร์เซ็นต์ ชนิด VTVM 1 - 3 เปอร์เซ็นต์ ชนิด FETVOM 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ชนิด VOM ไม่ปรากฏรายละเอียด

ขีดจำกัดทางความถี่ DVM สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่สูงถึง 100 MHz แต่ VTVM และ FETVOM สามารถทำงานได้ดีในช่วงความถี่สูงถึง 700 MHz และ 500 MHz ตามลำดับ ส่วนชนิด VOM ไม่ปรากฏรายละเอียด

ความต้านทานต่อกระแสสลับ DVM VTVM และ FETVOM มีค่าความต้านทานต่อกระแสสลับขาเข้าสูง 10 Megohm และ VOM สามารถทำให้มีความต้านทานต่อกระแสสลับขาเข้าสูงขึ้นเป็น 20 Kiloohm ต่อโวลต์

การตอบสนองต่อรูปคลื่น พบว่า DVM และ VTVM ตอบสนองต่อรูปสัญญาณแบบเฉลี่ย และแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (Average and root mean square) ได้ดี ชนิดอื่น ๆ ตอบสนองต่อรูปคลื่นแบบเฉลี่ยได้ก็เพียงอย่างเดียว

การอ่านความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า DVM สามารถอ่านความต่างศักย์เฉลี่ยได้ต่ำสุดถึง 1 μ V ต่ำกว่าชนิด VTVM และ FETVOM ซึ่งอ่านได้ 20 μ V และ 200 μ V ตามลำดับ ส่วนค่าแรงดันสูงสุดทั้งสามชนิด อ่านได้สูงสุดเฉลี่ย 1,000 โวลต์

เท่ากัน ส่วนชนิด VOM ไม่ปรากฏรายละเอียด

การอ่านความต้านทาน พบว่า DVM อ่านค่าความต้านทานต่ำ ๆ โท้ดถึง 0.0001 Ohm ชนิด VTVM และ FETVOM อ่านค่าความต้านทานโคต่ำสุด เฉลี่ย 0.2 Ohm ความต้านทานค่าสูง ชนิด DVM VTVM และ FETVOM อ่านโค เฉลี่ย 10 Megohm 5,000 Megohm และ 500 Megohm ตามลำดับ ส่วนชนิด VOM ไม่ปรากฏรายละเอียด

มอล์มสตัดท์ และ เอนค์ (Malmstadt and Enke. 1969 : 338) กล่าวถึงกรเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตรงโค ๆ ที่จะทำการวัดให้เป็นสัญญาณ ดิจิตล โดยการใช่วงจรที่ทำหน้าที่ขยายเฉพาะศักย์ไฟฟ้าเข้าที่สูงกว่าศักย์เทียบเท่านั้น ซึ่งมีอัตรากรขยายค่านข้างสูง ดังนั้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าเข้าเริ่มสูงกว่าศักย์เทียบ ศักย์ ไฟฟ้าออกของวงจร จึงเกือบจะเป็นสัญญาณพัลส์ วงจรชนิดนี้เรียกว่า วงจรเปรียบเทียบ (Comparator) สัญญาณพัลส์จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรถรรก เพื่อกำหนดสถานะถรรก ของศักย์ไฟฟ้าเข้า สถานะถรรกที่เกิดขึ้น เรียกว่า สัญญาณดิจิตล ซึ่งจะถูกส่งไปยัง เครื่องนับ (เป็นชนิดที่สามารถนับขึ้นและนับลงโค) และใช้ควบคุมกรเปลี่ยนแปลงศักย์เทียบ ภายในให้เปลี่ยนค่าไปจนกระทั่งโคศักย์เทียบเท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่จะทำการวัด วิธีการเช่นนี้ เรียกว่า การปรับเทียบศักย์ไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Continuous balance voltage comparison)

โอลิวเอร์ และ เกจ (Oliver and Cage. 1971 : 219) กล่าวว่า กรออกแบบคิวิคัลโวลท์คิมิเตอร์ มีความสำคัญอยู่ที่กรเปลี่ยนแปลงปริมาณอนาลอก โค ๆ ให้เป็นปริมาณดิจิตล หรือปริมาณอื่นที่ง่ายต่อการเปลี่ยนเป็นตัวเลข ปริมาณที่มี ความสัมพันธ์ และง่ายต่อการเปลี่ยน เป็นตัวเลขมีอยู่สองอย่าง คือ เวลาและความถี่ การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าให้เป็นเวลา ทำโคโดยการสร้างศักย์แร่มพ์แบบเชิงเส้นตรง (Linear ramp voltage) ค้ววงจรสร้างแร่มพ์ ซึ่งค้อยู่ระหว่างค้ว เปรียบเทียบสองค้ว ผลกรเปรียบเทียบจะถูกส่งไปยังหน่วยควบคุมถรรก ซึ่งจะแปลง ให้เป็นสัญญาณดิจิตลอีกค้อหนึ่ง คบเวลาของสัญญาณดิจิตล จะขึ้นอยู่กับขนาดของศักย์

ไฟฟ้าเข้า สัญญาณดิจิทัลนี้จะนำไปควบคุมการเปิดเปิดเกต เพื่อให้ความถี่จาก Local oscillator ผ่านเข้าไปยังเครื่องนับและแสดงผลการนับ โดยวิธีนี้พบว่า 1) ความถี่ของ Local oscillator 2) จำนวนหลักของตัวเลขที่โชว์แสดงผล และ 3) ความชันของศักย์แรมป์ (Slope of the ramp) มีความสัมพันธ์กันโดยตรง คือ

$$f_{osc} = (10)^N \times (\text{Slope of the ramp})$$

เมื่อ f_{osc} แทน ความถี่ของ Local Oscillator
 N แทน จำนวนหลักของตัวเลขแสดงผล

และ Slope of the ramp = $\frac{V - V_0}{(\text{เวลาที่ใช้ในการกวาดจาก } V \text{ ถึง } V_0)}$

เมื่อ V_0 แทน ศักย์เทียบของวงจรกำเนิดแรมป์

เวลาที่ใช้ในการเปิดเปิดเกต ศักย์ไฟฟ้าที่จะทำการวัด ความชันของศักย์แรมป์ และจำนวนพัลส์ที่จะเข้าสู่เครื่องนับ มีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ

$$1. \quad T(\text{gate}) = V_{in} \times \frac{1}{(\text{Slope of the ramp})}$$

เมื่อ $T(\text{gate})$ แทน คาบเวลาที่ทำให้เกตเปิด นั่นคือ ช่วงเวลาที่สัญญาณดิจิทัลเป็นหน่วยควบคุมตรรกะมีสถานะเป็น "1"

V_{in} แทน ศักย์ไฟฟ้าเข้าวงจร เปรียบเทียบซึ่งจะทำการวัด

2. จำนวนพัลส์จาก Local oscillator เข้าสู่เครื่องนับ คือ

$$N_c = f_{osc} \times T(\text{gate})$$

เมื่อ N_c แทน จำนวนพัลส์ที่จะเข้าสู่เครื่องนับได้ภายในเวลาเท่ากับ $T(\text{gate})$ วินาที

มิลแมน และ ทอบ (Mullman and Taub. 1966 : 316)

กล่าวถึงการสร้างกั๊ก Ramp voltage) ว่าอาจทำได้ด้วยวิธีต่าง ๆ กัน คือ

1) วิธีการสะสมประจุเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential charging) ในวงจร R-C filter ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าคงที่ จะได้ศักย์ไฟฟ้าออกตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันของเวลา ดังสมการ

$$V_o = V_1 (1 - e^{-t/RC})$$

$$\approx - V_1 t/RC$$

เมื่อ V_o แทน ศักย์ไฟฟ้าออกตกคร่อมตัวเก็บประจุ
 V_1 แทน ศักย์ไฟฟ้าเข้า
 R แทน ความต้านทาน
 C แทน ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2) วิธีการสะสมประจุโดยกระแสคงที่ (Constant current charging) คือ วิธีใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source) สำหรับสะสมประจุให้แก่ตัวเก็บประจุ ศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับเวลา

3) วิธีใช้วงจรกวาดของมิลเลอร์ (Miller sweep) วงจรกวาดของมิลเลอร์ คือ วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูง ซึ่งมีตัวเก็บประจุต่อเป็นตัวป้อนแก่กลับทางลบ

(Negative feedback) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าคงที่ ศักย์ไฟฟ้าออกจะเป็นศักย์แรมพ์
 คอสโทพูโลส (Kostopoulos. 1975 : 425) กล่าวถึง วิธีการ
 แปลงปริมาณดิจิทัลเป็นปริมาณอนาลอก และปริมาณอนาลอกเป็นดิจิทัลรวมทั้งการ เปลี่ยน
 ศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ ดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนปริมาณดิจิทัล เป็นปริมาณอนาลอก (Digital to
 analog conversion) ทำได้สองวิธี คือ

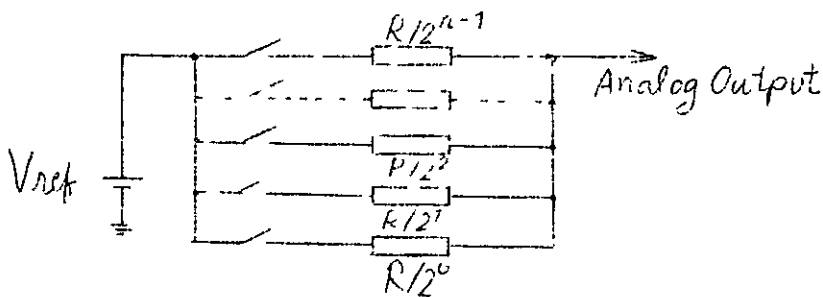
1.1 การใช้วงจรรวม (Summing network)

วงจรรวมที่ใช้ลักษณะกึ่งคาบประกอบตั้ง ความต้านทานแต่ละตัว
 จะมีลักษณะกึ่งคาบประกอบตั้ง จะมีความต้านทานแต่ละตัว
 จะมีลักษณะกึ่งคาบประกอบตั้ง มีจำนวนในระบบฐานสอง (Binary weight)
 ขนาดของปริมาณอนาลอกที่ได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณดิจิทัลที่ปรากฏอยู่ทางขั้ว
 เข้าในขณะนั้น

เมื่อปริมาณดิจิทัลเข้าทุกตัวมีค่าตรรกเป็น "0" กระแสไฟฟ้าออก
 จะเป็นศูนย์ ถ้าดิจิทัลเข้าทุกตัวมีค่าตรรกเป็น "1" (ซึ่งแทนค่าของศักย์ไฟฟ้าเทียบ
 V_{ref}) กระแสไฟฟ้าออก I_o ในขณะนั้น คือ

$$I_o = V_{ref}/R_{11}$$

เมื่อ R_{11} แทน ความต้านทานรวมที่เกิดจากการต่อความต้านทาน
 แบบขนาน

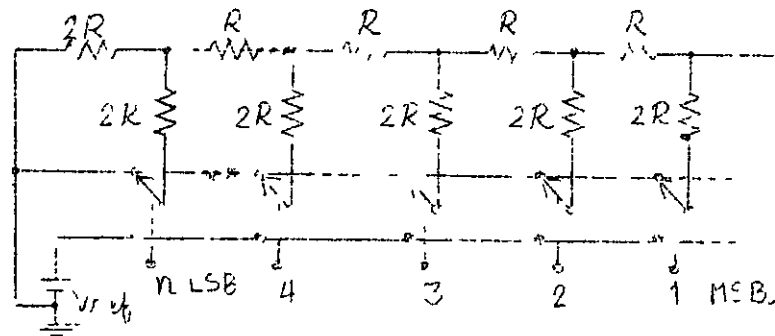


ภาพประกอบ 1 วงจรรวม (Summing network)

1.2 การใช้วงจรแบบเป็นขั้น (Ladder network)

วงจรแบบเป็นขั้นลักษณะทั้งภาพประกอบสอง กระแสไหล
ออกเมื่อมี สัญญาณดิจิทัลเข้าสู่วงจร คือ

$$I_o = V_{ref} \frac{(2)^3}{2R} + V_{ref} \frac{(2)^2}{4R} + V_{ref} \frac{(2)^1}{8R} + V_{ref} \frac{(2)^0}{16R} + \dots$$



ภาพประกอบ 2 วงจรแบบเป็นขั้น (Ladder network)

2. การเปลี่ยนปริมาณอนาลอกเป็นปริมาณดิจิทัล (Analog to digital conversion) ทำได้สองวิธี คือ

2.1 วิธีนับด้วยเครื่องนับฐานสอง (Binary counter) การแปลงปริมาณอนาลอกให้เป็นปริมาณดิจิทัล จะเริ่มได้โดยเครื่องนับทำการนับสัญญาณนาฬิกา (Clock pulse) ผลการนับจะก่อให้เกิดสัญญาณดิจิทัล ส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปแปลงให้เป็นปริมาณอนาลอก โดยอยู่ในรูปของศักย์แรงดัน สัญญาณดิจิทัลอีกส่วนหนึ่งจะนำไปเก็บไว้ใน Storage ในขณะเดียวกัน วงจรเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบค่าของศักย์แรงดันกับปริมาณอนาลอกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งศักย์แรงดันมีค่าสูงกว่าปริมาณอนาลอกที่ได้จากภายนอกวงจร เปรียบเทียบจะส่งผลการเปรียบเทียบไปกระตุ้นวงจร Monostable ให้ผลิตสัญญาณตรรกะที่มีสถานะเป็น "1" ไป Reset เครื่องนับ และ Storage พร้อม ๆ กัน สัญญาณที่ Storage จะแทนปริมาณอนาลอก

2.2 วิธีนับด้วยเครื่องนับขึ้น-นับลง (Up-down counter)

โดยวิธีนี้ เครื่องนับจะนับสัญญาณนาฬิกาไปเรื่อย ๆ และส่งผลการนับ ซึ่งอยู่ในรูปของ

สัญญาณดิจิทัล ส่วนหนึ่งไปทำการแปลงเป็นปริมาณอนาลอก เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับปริมาณอนาลอกจากภายนอก อีกส่วนหนึ่งของสัญญาณดิจิทัล จะถูกนำไปแสดงผล เมื่อวงจรเปรียบเทียบ ส่งผลการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณอนาลอกที่ได้จากภายนอก กับปริมาณอนาลอกที่ได้จากการแปลงสัญญาณดิจิทัล ไปยังเครื่องนับ เครื่องนับจะหยุดนับทันที และแสดงผลการนับออกมาเป็นปริมาณดิจิทัลที่สมนัยกับปริมาณอนาลอกนั้น ๆ

3. การเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าให้เป็นความถี่ (Voltage to frequency conversion) ทำได้โดยใช้เครื่องนับฐานสอง (เป็นชนิดนับลง) นับสัญญาณนาฬิกา ได้สัญญาณออกเป็นดิจิทัล แล้วเปลี่ยนสัญญาณนี้เป็นปริมาณอนาลอก เนื่องจากเครื่องนับทำการนับลงปริมาณอนาลอกจึงมีค่าลดลง ตัวเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบปริมาณอนาลอกนี้กับศักย์ไฟฟ้าเข้า เมื่อปริมาณอนาลอกนี้ค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าเข้า ตัวเปรียบเทียบจะส่งสัญญาณพัลส์ไปกระตุ้นให้วงจร Monostable ผลิตสัญญาณพัลส์ ส่วนหนึ่งของสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก Monostable จะถูกส่งไป Reset เครื่องนับให้เริ่มนับสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเป็นการเริ่มต้นใหม่ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบของวงจรเปรียบเทียบ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับศักย์ไฟฟ้าเข้า หรือความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก Monostable จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าเข้า

กรีน (Green. 1974 : 33 - 37) ได้ทำการสร้างเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ โดยสร้างเป็นดิจิทัลโวลท์มิเตอร์ ใช้วัดศักย์ไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1 mV ถึง 300 V พิสัยการวัด 3-30 V มีความละเอียด 0.1 % และพิสัยการวัด 300 V มีความละเอียด 1 % ความต้านทานขาเข้าสูง 10 Megohm วัดความต้านทานได้ตั้งแต่ 1.0 ohm ถึง 3 Megohm มีความละเอียด 0.1 % วัดกระแสไฟฟ้าได้จาก 1 mA ถึง 300 mA พิสัยการวัด 3-30 mA มีความละเอียด 1.0% และพิสัยการวัด 300 mA มีความละเอียด 5 % กรีนใช้เทคนิคการแปลงปริมาณอนาลอกเป็นปริมาณดิจิทัล โดยใช้สิ่งประดิษฐ์ Bipolar analog processor และ Bipolar digital processor ระบบการแปลงปริมาณอนาลอกเป็นปริมาณดิจิทัลที่ใช้ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้เรียกว่า Quantized feedback มีหลักการ คือ จ่ายกระแสไฟฟ้า

ให้เป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้าแกตั่วเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อให้เกิดสมมูลย์กับประจุที่ได้จากการ
 สะสม (Quantized charge) จำนวนประจุที่จะนำไปสะสม ได้จากการผสมทาง
 ความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse width modulation) ของกระแสอ้างอิง
 ระบบการแสดงผลเป็นตัวเลขระบบครึ่งหลัก (Half digit) มีจำนวนสี่หลัก จุดทศนิยม
 ของเครื่องมือนี้คือ ต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังหลายชุด และปัญหาเรื่องกราวด์ของ
 Bipolar analog processor และ Bipolar digital processor
 ข้อดีของเครื่องมือนี้ได้แก่ ส่วนที่ใช้แปลงศักย์ไฟฟ้าสลับให้เป็นศักย์ไฟฟ้าตรง ซึ่งมีความ
 ต้านทานขาเข้าสูงถึง 30 Megohm

ฮัฟนาเกิล (Huffnagle. 1976 : 48 - 49) ได้ทดลองสร้าง
 เครื่องนับความถี่ (Frequency counter) โดยใช้วงจร Timer เป็นฐานเวลา
 และวงจร Schmitt trigger ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณของความถี่ให้เป็น
 สัญญาณตรรกสองระดับแล้วจึงส่งเข้านับ ความละเอียดในการวัดของเครื่องมือขึ้นอยู่กับ
 เสถียรภาพของความถี่ที่ได้จาก Timer

กรีน (Green. 1977 : 64 - 66) ได้ทดลองสร้างเครื่องวัดความถี่
 ขึ้นมา โดยใช้ความถี่จาก Crystal oscillator ค่า 6.5536 MHz เป็นตัว
 กำหนดฐานเวลา และใช้ FET เป็นตัวนำสัญญาณเข้า ซึ่งจะทำได้ความต้านทานขาเข้า
 ของวงจรมีค่าสูงมาก แต่เนื่องจากความถี่ของ Crystal oscillator ไม่สามารถ
 หารด้วย 10 ไ้ลงตัวโดยตลอด จึงใช้วัดความถี่ได้จำกัด และไม่สามารถจะดัดแปลงเป็น
 เครื่องวัดคาบเวลาของความถี่ได้เลย

ทฤษฎีและการออกแบบวงจร

ทฤษฎี

1. การแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า

กฎของโอห์ม มีสาระสำคัญดังนี้คือ อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร จะมีค่าคงที่ เรียกว่าค่าคงที่นี้ว่า ความต้านทาน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\frac{E}{I} = R \quad (2.1)$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทาน (V) คือ ผลคูณของความต้านทานกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานนั้น เขียนเป็นสมการ คือ

$$V = IR \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.2) จะเห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) แปรผันโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า นั่นคือ เราสามารถแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ โดยให้กระแสจำนวนนั้นไหลผ่านความต้านทานที่ทราบค่าแน่นอน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดคร่อมความต้านทานนั้น จะสมนัยกับกระแสไฟฟ้าจำนวนนั้น การแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้ากวยวิธีนี้ ทำได้ง่าย แต่มักจะเกิด Loading effect คือ วิกฤตความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้น้อยกว่าความเป็นจริง วิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหานี้ ได้แก่ การใช้ ออปแอมป์ (Operational amplifier) แปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Marcus and Lenk. 1971 : 370) คุณสมบัติคุณสมบัติของออปแอมป์คือ มีอัตราขยายสูงมาก (Very high gain) การแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

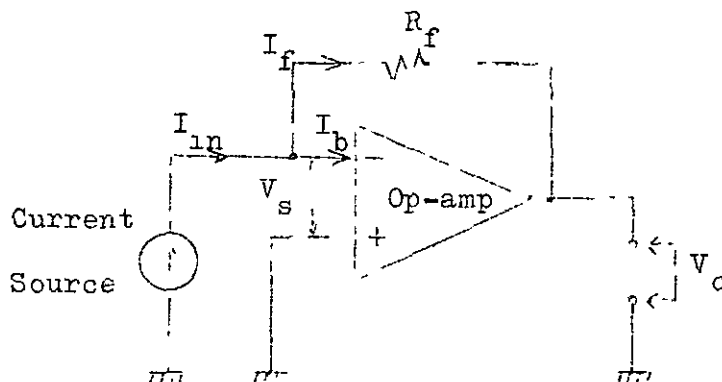
$$V_o = -R_f(I_{in} - I_b)\left(\frac{A}{1+A}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ	V_o	แทน	ศักย์ไฟฟ้าออกจากออปแอมป์
	R_f	แทน	ความต้านทานที่คั่นอยู่ระหว่างขั้ว Inverting input กับขั้วขาออก (Output) ของออปแอมป์
	I_{in}	แทน	กระแสไฟฟ้าเข้าซึ่งจะแปลงเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า
	I_b	แทน	กระแสไฟฟ้าส่วนที่จะทำให้เกิดไบแอสแก่ออปแอมป์
	A	แทน	อัตราขยายของออปแอมป์

ถ้าในกรณี $I_{in} \gg I_b$ และ $A \gg 1$, V_o จะมีค่าโดยประมาณ

$$V_o \approx -I_{in}R_f \quad (2.4)$$

วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า เป็นความต่างศักย์อย่างง่าย มีลักษณะดังภาพประกอบสาม



ภาพประกอบ 3 วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความต่างศักย์อย่างง่าย

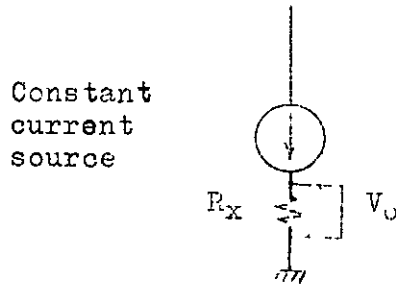
2. การแปลงความต้านทานเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากสมการ (2.2) ถ้าให้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวคงที่ จะพบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านทาน ดังนั้น การแปลงความต้านทานให้เป็น

ความต่างศักย์ไฟฟ้า จึงทำได้โดยการใส่กระแสไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant current source) ไหลผ่านความต้านทานนั้น ๆ คุณสมบัติที่สำคัญของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ คือ ต้องเป็นอิสระต่อภาระ (Load) ของวงจร นั่นคือ จะต้องมีความต้านทานเอาต์พุต (Zout) สูงมาก ภาพประกอบสี่เป็นวงจรแปลงความต้านทานเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า และเขียนสมการ (2.2) ใหม่ได้เป็น

$$V_o = I_o R_x \tag{2.5}$$

เมื่อ V_o แทน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทาน R_x
 I_o แทน กระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งทราบค่าแน่นอน



ภาพประกอบ 4 วงจรแปลงความต้านทานเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า

3. การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง และการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1 การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้โดยการวัดสิ่งประดิษฐ์จำพวกสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า ไดโอด ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหล ผ่านได้ทางเดียว ก็ต่อเมื่อมีศักย์ไฟฟ้าบวกต่อเข้า ขั้วบวก และมีศักย์ไฟฟ้าลบต่อเข้าขั้วลบของไดโอด ซึ่งเรียกว่าการทำให้เกิดไบแอสตรง (ชิตชัย สุทธาสนวิน และ ประสาร กลสิศิลป 2517 : 46) ความต่างศักย์ไฟฟ้าออกที่ขั้วบวกของไดโอด จะมีลักษณะเป็นตรง ๆ เพียงครึ่งช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้าสลับ

เรียกว่า Pulsating d.c. เมื่อผ่านเข้าไปในวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) จะได้อัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 การวัดอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ ทำได้โดยการแปลงอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ การวัดอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับทำได้สามวิธี คือ

ก. วัดอัตราความถี่ไฟฟ้าเฉลี่ยการากกำลังสอง V_{rms} .

อัตราความถี่ไฟฟ้าการากเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square) หาได้จาก การวัดอัตราความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับในแต่ละช่วงเวลาเท่ากัน นำมา ยกกำลังสอง หาค่าเฉลี่ยกำลังสอง แล้วจึงถอดการากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองนั้น ถ้าอัตราความถี่ไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง จะได้ว่า

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

ถ้าเป็นอัตราความถี่ไฟฟ้าสลับแบบไซน์ (Sine wave) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{max} \sin \theta)^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.707 V_{max}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

ข. การวัดอัตราความถี่ไฟฟ้าเฉลี่ย V_{av} .

อัตราความถี่ไฟฟ้าเฉลี่ย (Average voltage) หาได้จาก การวัดอัตราความถี่ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาแล้วหาค่าเฉลี่ย ถ้าอัตราความถี่ไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง จะได้ว่า

$$V_{av.} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k \quad (2.8)$$

ถ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบต่อเนื่อง และมีคาบเวลาเป็น T จะได้อัตราเฉลี่ยเป็น

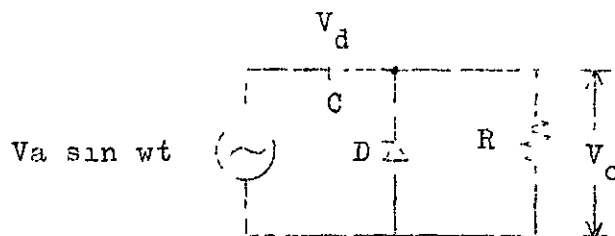
$$V_{av.} = \frac{1}{T} \int_0^T V dt \quad (2.9)$$

ถ้าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไซน์ จะได้อัตราเฉลี่ยเป็น

$$\begin{aligned} V_{av.} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{max} \sin \theta dt \\ &= 0.636 V_{max}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

ค. การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด

ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (Peak voltage) ของความต่างศักย์ไฟฟ้าสลับซึ่งมีได้เป็นช่วง ๆ ดังนั้น ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเป็นค่าที่ปรากฏชั่วขณะใดขณะหนึ่ง เราสามารถพิจารณาความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดได้จากภาพประกอบที่ 5 ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 5 วงจรแยกความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

ถ้าความจุของตัวเก็บประจุมีค่ามาก ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงไปในหนึ่งรอบของความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการ

เปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าออก V_o ซึ่งเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าออกชั่วขณะใด
 หนึ่ง V_o มีค่าเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ไฟฟ้าตรงซึ่งตกคร่อมตัวเก็บประจุ
 กับส่วนของศักย์ไฟฟ้าสลับที่เป็นฮาร์โมนิกของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติที่ไม่เป็น
 เชิงเส้น (Nonlinearity) ของไดโอด สมการของศักย์ไฟฟ้าออกชั่วขณะใด ๆ คือ

$$V_o = V_d + V_a \sin \omega t \quad (2.11)$$

เมื่อ V_d แทน ความต่างศักย์ไฟฟ้าตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C
 V_a แทน อัมพลิจูดของความต่างศักย์ไฟฟ้าสลับ

V_o จะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด เมื่อ $\sin \omega t = 1$ ดังนั้น
 ำให้ V_p เป็นยอดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด V_p จะมีค่าเป็น

$$V_p = V_d + V_a \quad (2.12)$$

(Olivcr and Cage. 1971 : 247)

4. การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นความถี่

การแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นความถี่ มีหลักการ เช่นเดียวกับ
 การเปลี่ยนปริมาณขนาดอกให้เป็นปริมาณคิจัคัล จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ความ
 ่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง กับความถี่ได้จากภาพประกอบหก ดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{in}}{R} = q_u f_o$$

หรือ $f_o = \frac{V_{in}}{q_u R}$ (2.14)

(Malmstadt and others . 1974 : 657)

เมื่อ f_o แทน ความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจรเปรียบเทียบ

เหตุผลที่เรียกกระแส $q_u f_o$ เป็นกระแสเฉลี่ย คือ ขนาดกระแสจำนวนนี้ขึ้นอยู่กับประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็น เอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าเวลาคงที่ (Time constant) เป็นส่วนกลับของผลคูณระหว่างความต้านทาน R กับ ขนาดความจุของตัวเก็บประจุ C อัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้า $q_u f_o$ จึงมีค่าไม่คงที่ แต่วงจรจ่ายประจุจะทำหน้าที่จ่ายประจุโดยแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจรเปรียบเทียบ สมการ (2.14) จึงเขียนอยู่ในรูปของการแปรผันได้ว่า

$$f_o \propto V_{in} \quad (2.15)$$

ความสัมพันธ์ (2.15) หมายความว่า ความถี่ f_o มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้า

5. การนับ

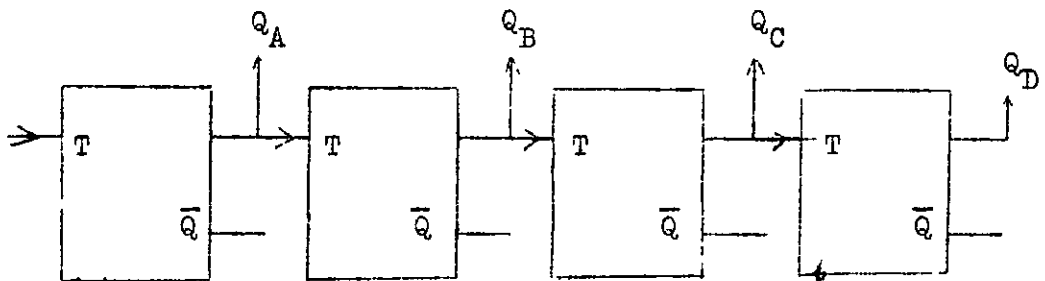
เครื่องนับที่ง่ายที่สุด คือ เครื่องนับฐานสอง (Binary counter) ซึ่งเกิดจากการนำเอา Toggle-flip-flop หลาย ๆ อันมาต่อเรียงกัน (Cascade) เข้าเป็นชุด ฟลิปฟลอป คือ วงจรสมมูลย์สองสถานะ (Bistable) คือ สถานะตรรกสูง (1) และต่ำ (0) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเข้าที่ขั้ว T

ฟลิปฟลอปจะเปลี่ยนสถานะจากสูงเป็นต่ำ หรือจากต่ำเป็นสูง และจะคงสภาพเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะมีสัญญาณนาฬิกาเข้ามาใหม่ จึงจะเปลี่ยนสถานะอีก ฟลิปฟลอปชนิดนี้จึงมีลักษณะเป็นเครื่องหารจำนวนต่าง ๆ ง่ายสอง แต่ถ้านำมาต่อเรียงกัน N ตัว จะได้เครื่องนับที่สามารถนับจำนวนได้จาก 0 ถึง $(2)^N - 1$ และเครื่องนับแบบนี้ จะขึ้นรอบการนับใหม่หลังจากที่ทุก ๆ สัญญาณนาฬิกาที่ $(2)^N$ ผานเข้าไป บางครั้งจึงเรียกเครื่องนับแบบนี้ว่า Ring counter ความถี่สูงสุดของสัญญาณนาฬิกาสำหรับเครื่องนับกำหนดได้โดยสมการ 2.16

$$\frac{1}{f} \cong N(T_p) + T_s \quad (2.16)$$

เมื่อ f แทน ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาสูงสุด
 N แทน จำนวนทั้งสิ้นของฟลิปฟลอปที่นำมาต่อเรียงกัน
 T_p แทน เวลาหน่วง (Propagation delay) ที่เกิดขึ้นในฟลิปฟลอปแต่ละตัว
 T_s แทน คาบเวลาของพัลส์สุดท้าย

ถ้านำเอา Toggle flip-flop สี่ตัว มาต่อเรียงกัน ลักษณะของพัลส์ออกของฟลิปฟลอป จะปรากฏดังภาพประกอบ 7 และสถานะของฟลิปฟลอปแต่ละตัวจะเป็นดังตาราง 1



ภาพประกอบ 7 วงจรฟลิปฟลอป

ตาราง 1 สถานะของฟลิปฟล็อป 4 - bit ripple counter

State	Q_D	Q_C	Q_B	Q_A
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

JK ฟลิปฟล็อป คือ ฟลิปฟล็อปที่มีสัญญาณเข้า (Input) ใดสองทาง คือ ที่ J และ K โดย J ทำหน้าที่ Set ส่วน K ทำหน้าที่ Reset สถานะของฟลิปฟล็อป และมีที่สำหรับป้อนสัญญาณนาฬิกา C สถานะของ JK ฟลิปฟล็อป เป็นดังตาราง 2

ตาราง 2 สถานะของ JK ฟลิปฟลอป

J	K	Q_t	$Q_t + 1$	Note
0	0	0	0	ไม่เปลี่ยน
0	0	1	1	
0	1	0	0	Reset
0	1	1	0	
1	0	0	1	Set
1	0	1	1	
1	1	0	1	Complement
1	1	1	0	

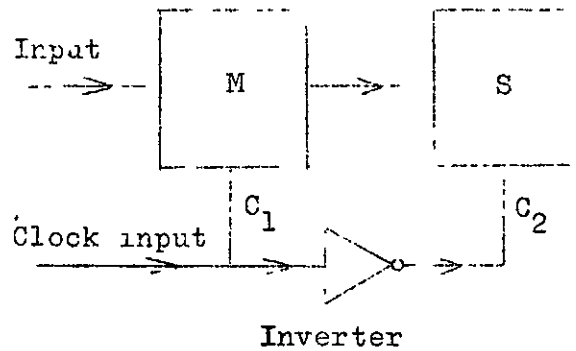
สมการกำหนดสถานะ คือ

$$Q_t + 1 = (J \cdot Q_t) + (K \cdot Q_t)$$

(.) เป็น ตัวกระทำ AND

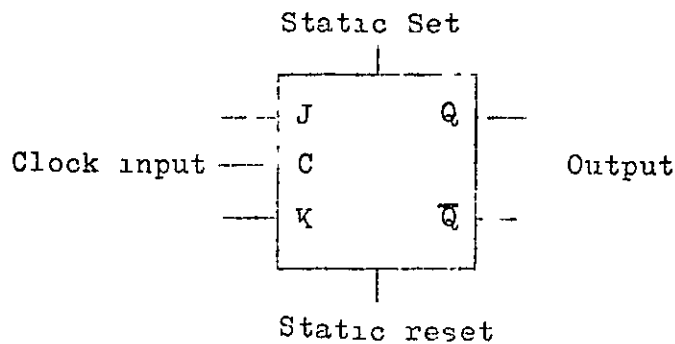
(+) เป็น ตัวกระทำ OR

มาสเตอร์-สเลฟ ฟลิปฟลอป คือ ฟลิปฟลอปที่ประกอบด้วยฟลิปฟลอปสองตัว
ตัวแรกเรียกว่า มาสเตอร์ (M) ตัวหลังเรียกว่า สเลฟ (S) และมีอินเวอร์เตอร์เกต
ซึ่งจะทำหน้าที่สลับสัญญาณนาฬิกาให้เป็นตรงกันข้ามต่ออยู่ระหว่างขั้วสัญญาณนาฬิกาเข้า
ของฟลิปฟลอป M และ S การทำงานมีสองจังหวะ คือ จังหวะแรก (Clock จาก
0 ไป 1) สัญญาณนาฬิกาจะเข้าสู่ M ในขณะที่เกตเข้าสู่ S ปิด จังหวะต่อมา (Clock
จาก 1 ไป 0) ถ้าสัญญาณของ M จะเข้าสู่ S ในขณะที่เกตเข้าสู่ M ปิด สถานะของ
M-S ฟลิปฟลอปก็ือ สถานะของฟลิปฟลอป S นั้นเอง M-S ฟลิปฟลอปจะนำมาแก้
ปัญหาเรื่องเวลาการกระตุ้นให้ฟลิปฟลอปเปลี่ยนสถานะ (ถึงภาพประกอบแปล)











ภาพประกอบ 8 แผนผังของมาสเตอร์-สเลฟ ฟลิปฟลอป

ถ้านำเอามาสเตอร์สเลฟเจเคฟลิปฟลอป มาทำงานร่วมกัน จะกลายเป็น ฟลิปฟลอปที่สามารถทำงานได้หลายหน้าที่มากขึ้น ฟลิปฟลอปนี้มีที่นำสัญญาณเข้าถึงห้า ตำแหน่ง คือ J, K, R, S และ C โดย J และ K จะเป็น Clock input ส่วน Input ของ S และ R เป็น Static set ที่สามารถป้อนสัญญาณเข้า J และ K ได้ภาพประกอบ 9 เป็นสัญลักษณ์เขียนแทนวงจร M-S JK ฟลิปฟลอป และตาราง 3 แสดงสถานะต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ เอ็มเอส เจเค ฟลิปฟลอป .



ภาพประกอบ 9 สัญลักษณ์ของมาสเตอร์สเลฟ เจเค ฟลิปฟลอป

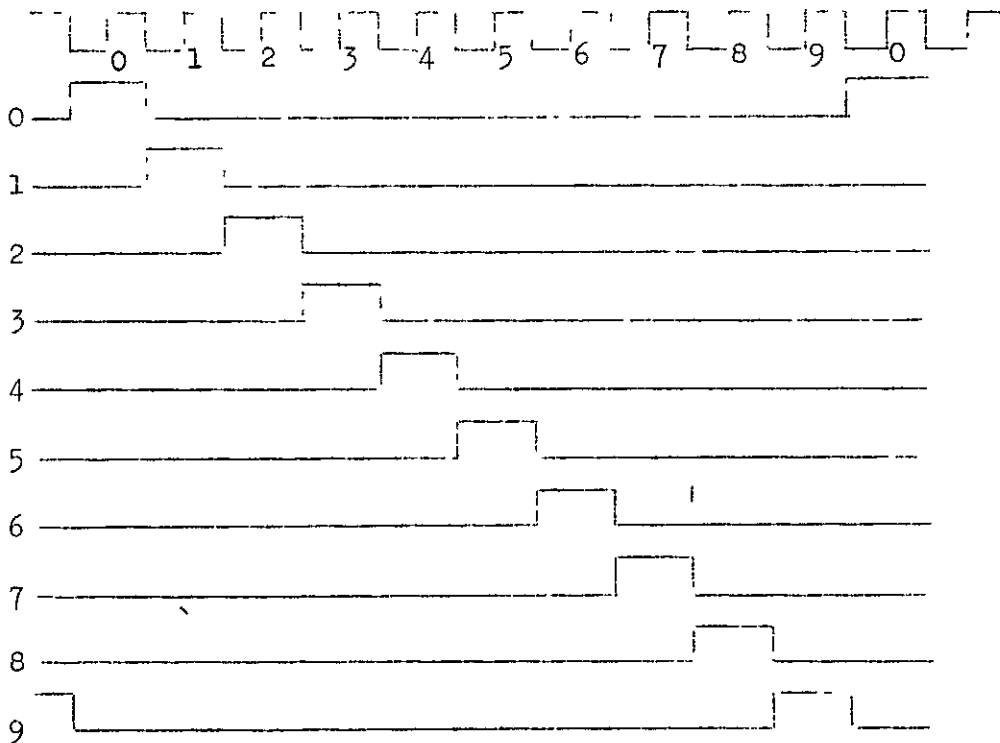
ตาราง 3 สถานะต่าง ๆ ของมาสเตอร์-สเลฟ เจเค ฟลิปฟลอป

ก.					ข.			
J	K	C	Q_t	Q_{t+1}	S	R	Q_t	Q_{t+1}
0	0		0	0	0	0	0	
0	0		1	1	0	0	1	Clock
0	1		0	0	0	1	0	0
0	1		1	0	0	1	1	0
1	0		0	1	1	0	0	1
1	0		1	1	1	0	1	1
1	1		0	1	1	1	0	d
1	1		1	0	1	1	1	d

ก. การทำงานที่อยู่ในภาวะ Clock

ข. การทำงานที่อยู่ในภาวะ Static

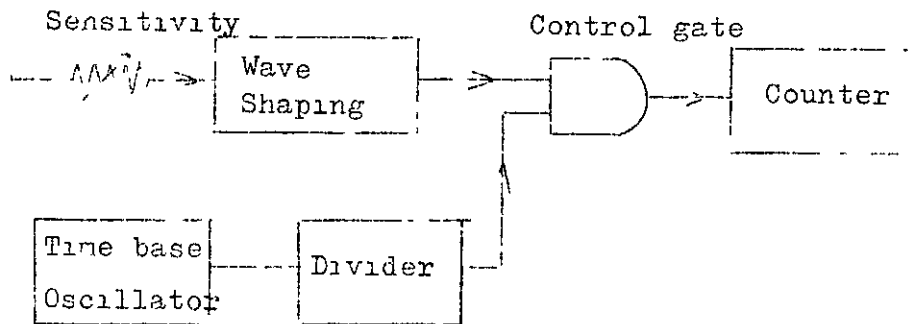
ถ้าเราพิจารณาสถานะต่าง ๆ ของมาสเตอร์-สเลฟ เจเค ฟลิปฟลอป จาก ตาราง 3 จะพบว่า สามารถนำไปแทน Toggle ฟลิปฟลอป ทำเป็นเครื่องนับสิบ (Decade counter) ได้ เนื่องจากทุก ๆ พัลส์ที่เข้าสู่ฟลิปฟลอป จะทำให้ สถานะของฟลิปฟลอปเปลี่ยนไป ลักษณะของพัลส์ที่เปลี่ยนไปจะเป็นกัมภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากเครื่องนับสิบ

6. การนับความถี่

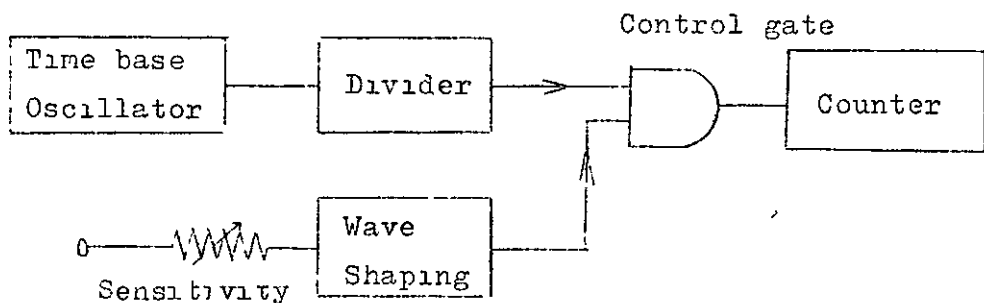
ความถี่ของคลื่นสัญญาณวัดเป็นจำนวนรอบต่อหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยเวลาที่ใช้ในการวัดความถี่ของคลื่นสัญญาณไฟฟ้า คือ หนึ่งวินาที คลื่นสัญญาณที่จะทำการวัด จะถูกจัดรูปใหม่ให้เหมาะสมกับเครื่องนับฐานสอง ซึ่งได้แก่ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม แต่ยังคงรักษาความถี่และคาบเวลาเดิมของคลื่นสัญญาณไว้ ถ้าเราใช้คลื่นสัญญาณที่จัดรูปใหม่ แล้วนี้ผ่านเกทควบคุม (เป็น AND gate) เข้าไปสู่เครื่องนับโดยให้เกทเปิดอยู่เป็นเวลานานเพียงหนึ่งวินาที เครื่องนับจะแสดงผลการนับออกมา สิ่งสำคัญในการวัดความถี่ก็คือ การควบคุมให้เกทเปิดให้สัญญาณผ่านเข้าเครื่องนับเป็นเวลาหนึ่งวินาที คุณสมบัติของ AND gate คือ จะให้สัญญาณออกมีตรรกเป็น "1" ก็ต่อเมื่อ สัญญาณเข้าสู่ AND gate ทุกตัว มีค่าตรรกเป็น "1" เท่านั้น ดังนั้น จึงต้องสร้างพัลส์ที่มีช่วงกว้างของคาบเวลาที่ช่วงตรรกมีค่า "1" เป็นหนึ่งวินาที เพื่อใช้กำหนดเป็นฐานเวลาให้แก่เครื่องนับ การนับความถี่มีแผนผังดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แผนผังการนับความถี่

7. การวัดคาบเวลา

คาบเวลาของความถี่ใด ๆ คือ ส่วนกลับของความถี่นั้น การวัดคาบเวลาของความถี่ใด ๆ จึงสามารถทำได้ พิจารณาการนับคาบเวลาของความถี่จากภาพประกอบ 12 ได้ดังต่อไปนี้ การทำงานของเครื่องวัดคาบเวลามีส่วนที่ต่างจากการนับความถี่ คือ เราใช้ความถี่ที่ไม่ทราบค่าเป็นตัวกำหนดการปิดหรือเปิดเกตควบคุม เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดฐานเวลา ซึ่งถูกหารให้มีความถี่ " f_0 " กงที่ ผ่านเข้าไปสู่เครื่องนับจำนวนพัลส์ที่ผ่านเกตควบคุมไปสู่เครื่องนับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาที่เกตเปิด (T) ซึ่งหมายถึงถึงคาบเวลาของความถี่ f_{in} นั้นเอง



ภาพประกอบ 12 แผนผังการวัดคาบเวลา

จำนวนพัลส์ (N) ที่ผ่านเข้าสู่เครื่องนับ จะ เป็นไปตามสมการ

$$N = f_0 T \quad (2.17)$$

ถ้าเลือกตำแหน่งของจุดที่นิยมบนส่วนแลคงผล ให้สัมพันธ์กับการหารความถี่ของวงจร
กำเนิดฐานเวลาแล้ว ผลการนับก็จะเป็นค่าคาบเวลา (T) ของความถี่

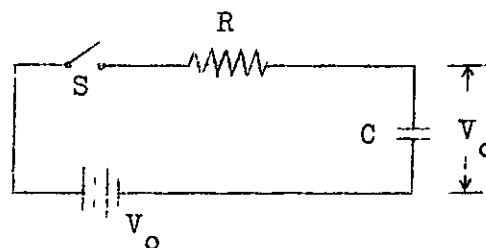
8. การวัดความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ถ้าพิจารณาวงจร R-C อย่างง่าย ดังภาพประกอบ 13 เมื่อสวิตช์ปิดลง
จะเกิดกระแสไหลในวงจร ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม
เวลา ดังสมการ

$$V_C = V_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (2.18)$$

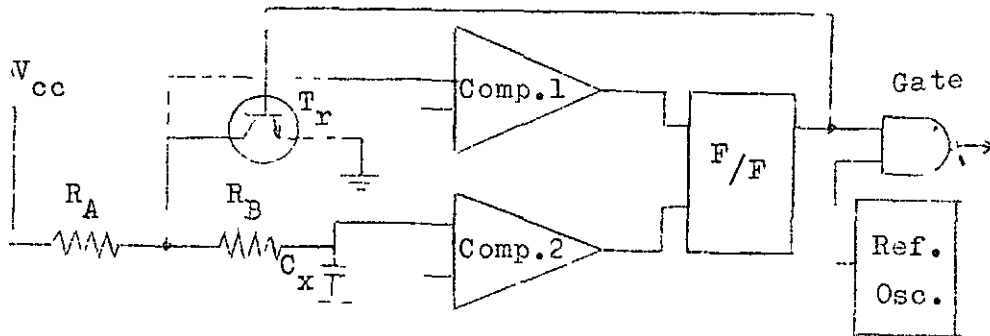
(Resnick and Halliday. 1962 : 803)

เมื่อ	V_C	แทน	ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ เมื่อรับการประจุจนเต็ม
	R	แทน	ความต้านทานในวงจร
	C	แทน	ค่าความจุของตัวเก็บประจุ
	t	แทน	เวลาที่นับจากปิดสวิตช์วงจรให้มีการประจุจนถึง เวลาที่ทำการวัด
	e	แทน	ตัวคงที่มีค่าประมาณ 2.71828...
	V_0	แทน	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร



ภาพประกอบ 13 วงจร R-C อย่างง่าย

ถ้าให้มีการประจุในตัวเก็บประจุจนเต็ม แล้วตัด V_o ออก ทำการลัดวงจร C จะปล่อยประจุออก และ V_o จะลดลงตามเวลาเช่นเดียวกับสมการ (2.18) วงจร R-C ที่สามารถควบคุมการประจุและปล่อยประจุได้อย่างเป็นอิสระ โดยไม่ขึ้นกับระบบกลแล้ว ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอมตัวคานทาน และศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ รวมกันจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะสมมาตร (Resnick and Halliday. 1962 : 807) ดังนั้น การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ จึงสามารถนำเอาหลักการประจุและปล่อยประจุ (Charge and discharge) ดังที่กล่าวไปใช้ได้ แนวความคิดที่จะวัดความจุของตัวเก็บประจุเป็นดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 หลักการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ

หลักการทำงานของวงจร อธิบายได้ดังนี้ C_x จะถูกประจุโดยผ่านทาง R_A และ R_B ตามลำดับ เมื่อศักย์ไฟฟ้าคร่อม C_x มีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าเทียบ (V_{ref}) วงจรเปรียบเทียบ 1 จะส่งพัลส์ไปกระตุ้นหลอดไฟให้เปลี่ยนสถานะ จะได้สัญญาณส่วนหนึ่งไปเปิดเกทให้ความถี่มาตรฐานผ่านเข้าไปสู่เครื่องนับได้ และอีกส่วนหนึ่งนำไปป้อนให้แกเบสของ Q_1 ทำให้ Q_1 นำกระแส ผลก็คือ C_x จะปล่อยประจุผ่าน R_A ผ่าน Q_1 ไปลงดิน เมื่อศักย์ไฟฟ้า V_c ลดกลางเหลือเท่ากับศักย์ไฟฟ้าเทียบของวงจรเปรียบเทียบ 2 ก็จะมีพัลส์จากวงจรเปรียบเทียบ 2 ไปสั่งให้หลอดไฟเปลี่ยนสถานะอีกครั้งหนึ่ง เกทจะปิดลง การปล่อยประจุของ C_x ก็จะหยุด และกระแสจากแหล่งจ่าย $+V_{cc}$ ก็จะไหลเข้าประจุ C_x ใหม่อีกเป็นการเริ่มต้นทำงานรอบใหม่ จำนวนคลื่นของความถี่มาตรฐานกับค่า C_x จะต้องปรับให้สมกัน

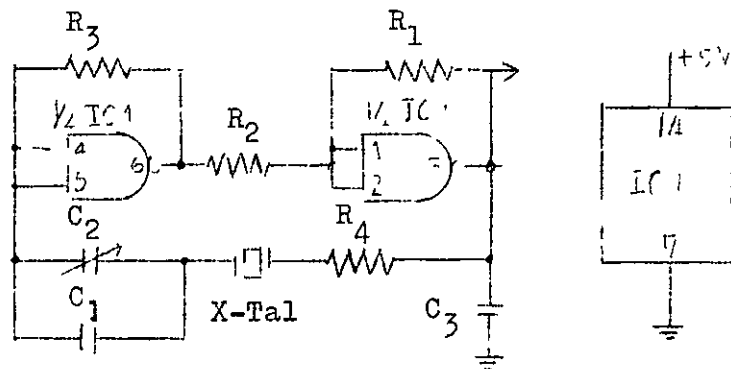
การออกแบบ

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งวงจรออกเป็น ส่วน ๆ ดังต่อไปนี้
คือ

1. วงจรเครื่องนับ

วงจรเครื่องนับจะทำหน้าที่นับสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่าง ๆ ที่ไม่ทราบค่าแล้ว แสดงผลการนับเป็นตัวเลข ส่วนต่าง ๆ ของวงจรเครื่องนับมีดังต่อไปนี้ คือ

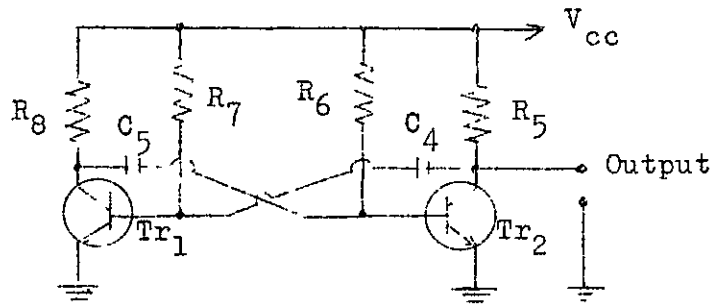
1.1 วงจรสร้างฐานเวลา (Time base Oscillator) ได้แก่ วงจรไฟฟ้าที่สร้างคลื่นสัญญาณที่มีค่าเวลาแน่นอน สัญญาณนาฬิกาจะนำไปใช้ควบคุมการนับและการแสดงผลของการนับวงจรสร้างฐานเวลาเป็นดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 วงจรสร้างฐานเวลาโดยควบคุมด้วยคริสตัล

วงจรสำเร็จเบอร์ 7400 เป็นวงจรประเภทที่ทีแอลอีแอนด์ (NAND) เกทแต่ละเกทมีสองอินพุท และทำงานเป็นอิสระแยกจากกัน จากตารางตรรกของวงจรแอนด์จะพบว่าเมื่อรวมอินพุททั้งหมดเข้าด้วยกันแอนด์เกทก็จะกลายเป็นอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทั้งนี้ ตามวงจรในภาพประกอบ 15 ตัวที่จะควบคุมการออสซิลเลทของวงจร คือ คริสตัล ซึ่งจะกำหนดให้วงจรมีการออสซิลเลทที่มีความถี่ของคริสตัล เท่านั้น (1.00 MHz) วงจรออกแบบเพื่อให้สามารถปรับแต่งความถี่ได้เล็กน้อยด้วยการปรับค่าความจุของตัวเก็บประจุ C₂.

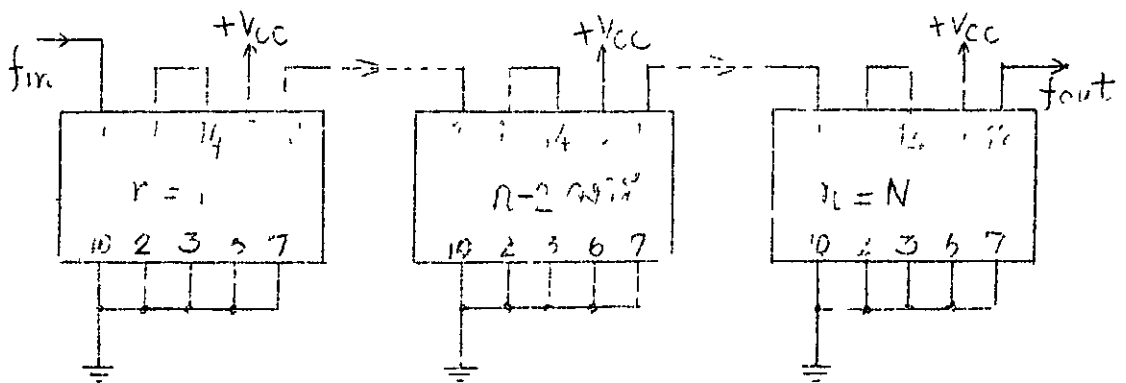
เนื่องจากคริสตัลเป็นอุปกรณ์ที่หายาก จึงไม่สะดวกต่อการศึกษาวงจร ผู้วิจัย
ได้เลือกอิ์กวงจรหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ใกล้เคียงกับวงจรคริสตัล ออสซิลเลเตอร์ แต่มีราคา
ถูกกว่ามาก คือ วงจรออสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ วงจรประกอบขึ้นจากทรานซิสเตอร์
ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 วงจรสร้างฐานเวลาแบบที่ 2

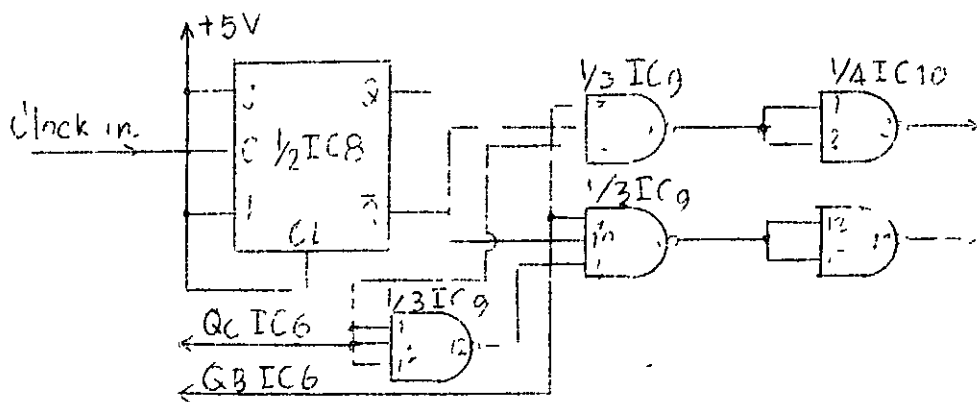
1.2 วงจรหารความถี่ (Divider) คือ วงจรที่ใช้หารความถี่จาก
วงจรกำเนิดฐานเวลาให้เหลือความถี่น้อยลง จนเหมาะที่จะนำไปควบคุมการนับและ
การแสดงผล วงจรสำเร็จรูปที่สามารถนำมาประกอบเข้าเป็นเครื่องหาร มีอยู่หลาย
วงจรด้วยกัน การหารด้วยสิบหรือการนับสิบ สามารถประกอบวงจรจากวงจรวจรสำเร็จรูป
เบอร์ 7490 (วงจรภายในและตารางตรรกการทำงานของวงจรวจรสำเร็จเบอร์นี้
ปรากฏในภาคผนวก)

การทำงานเมื่อใช้วงจรวจรสำเร็จเบอร์ 7490 ทำหน้าที่หารสิบ ให้ป้อนสัญญาณ
เข้าที่อินพุต B (ขา 1) มาสเตอร์สเลฟ พลิพฟลอปจะทำหน้าที่หารห้าก่อน ความถี่ที่
เอาต์พุต D (ขา 11) จึงเป็น 1 ใน 5 ของความถี่ที่เข้าอินพุต B ต่อไปให้ต่อเอาต์พุต D
เข้ากับอินพุต A (ขา 14) เพื่อทำการหารด้วยสองต่อไป โดยได้สัญญาณที่หารด้วยสิบ
แล้วออกที่เอาต์พุต A การต่อวงจรวจรสำเร็จเบอร์ 7490 เพื่อทำการหารด้วยสิบมากกว่า
หนึ่งครั้ง กระทำได้ด้วยการต่อวงจรวจรหารสิบอนุกรมเข้าด้วยกันหลายครั้งเท่ากับจำนวนที่
ต้องการ ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 วงจรหารด้วย 10^N ด้วยวงจรสำเร็จเบอร์ 7490

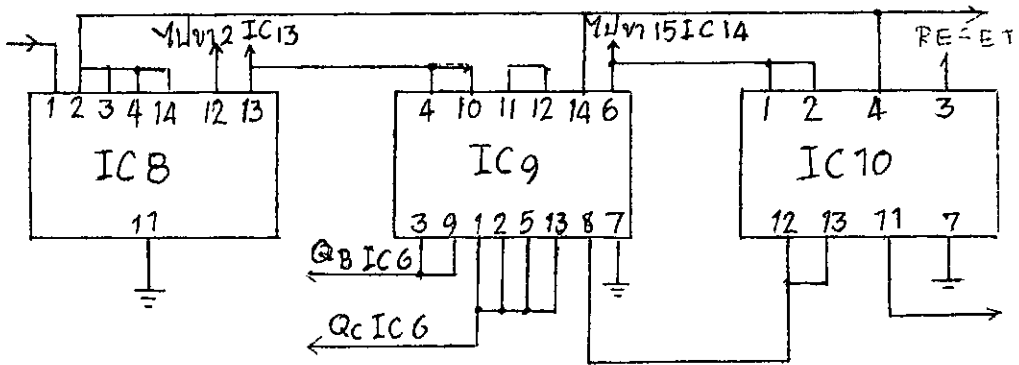
ความถี่ออกจากวงจรภาพประกอบ 17 มีค่า 10 Hz ยังไม่สามารถนำไปควบคุมการนับของวงจรมอเตอร์ได้ จะต้องนำความถี่นี้ไปสร้างสัญญาณควบคุมวงจรมอเตอร์อีกตามวงจรในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการนับ

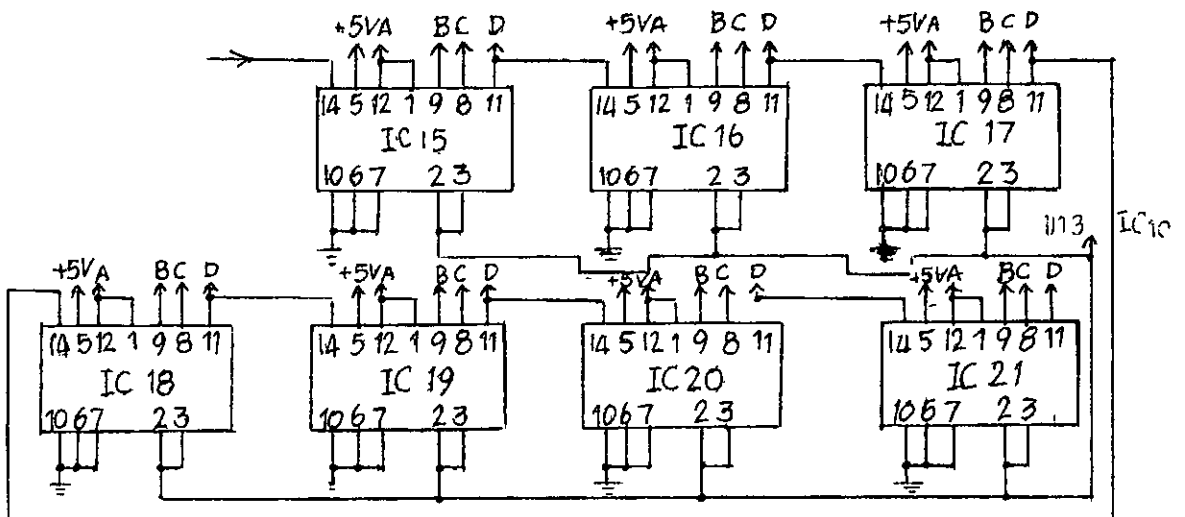
วงจรในภาพประกอบ 18 IC7 เป็น คูสิล เจเค ฟลิปฟลอป แดคคัแปลง ให้เป็น Toggle Flipflop โดยการกอส J,K และ CL อินพุตเข้ากับแหล่งจ่าย ศักย์ไฟฟ้า +5 โวลท์ ความถี่ที่หทารนำเข้าทาง C อินพุต จะได้ผลลัพท์ออกที่ Q มีค่าเป็น 5 Hz ซึ่งสามารถนำไปควบคุมเครื่องนับได้ ส่วนผลลัพท์ที่ Q จะมีเฟส

ตรงกันข้ามกับ Q จะถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณรีเซต เครื่องนับเพื่อการนับในรอบใหม่ต่อไป การต่อวงจรภายนอกเป็นดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการนับ

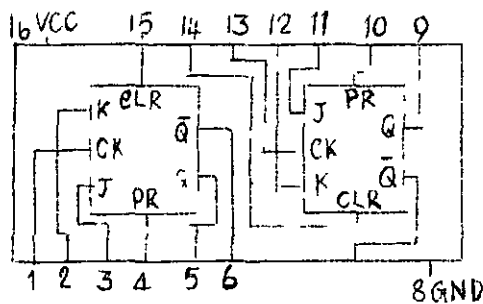
1.3 วงจรเครื่องนับสิบ (Decade Counter) ทำได้ด้วยการนำสัญญาณเข้าที่อินพุต A ต่อเอาที่พุท B เข้ากับอินพุต B ซึ่งสัญญาณที่นับจะปรากฏตามรหัส A, B, C และ D ที่ขา 12, 9, 8 และ 11 ตามลำดับ การนับสิบต่างจากการหารด้วยสิบที่ขาสำหรับรีเซต "9" (ขา 6, 7) ต้องให้ได้รับสัญญาณที่มีตรรกเป็น "0" ตลอดเวลา จึงต้องต่อคังคินเสีย ส่วนทรี่เซต "0" (ขา 2, 3) จะต้องให้ได้รับสัญญาณที่มีตรรก "1" มากกระตุ้นเป็นจังหวะเป็นครั้งคราวพร้อมกัน ดังภาพประกอบ 20



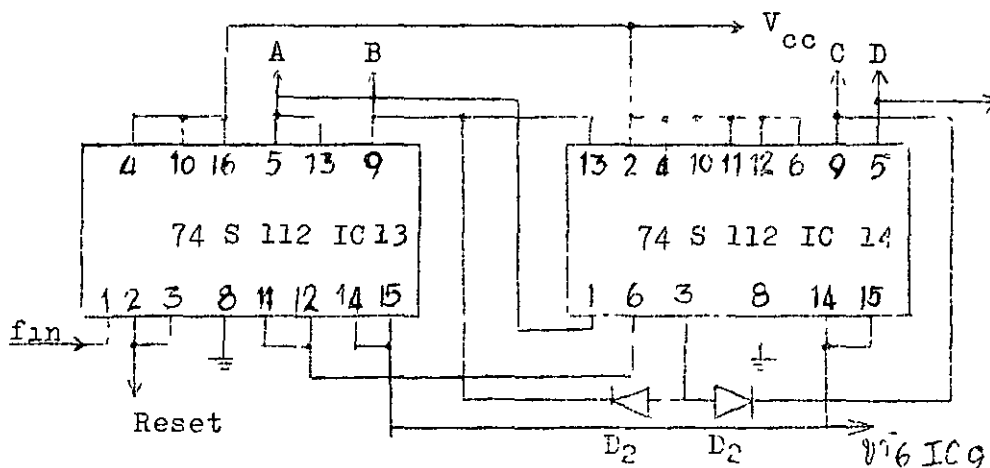
ภาพประกอบ 20 วงจรนับสิบ

เพื่อให้วงจรนี้สามารถนับได้สูงจนถึง 125 MHz จะใช้เกทที่มีความไวในการทำงานสูงมาก باعتبارเป็นวงจรมีในหลักหน่วย วงจรสำเร็จรูปที่จะนำมาประกอบเป็นวงจรมี ไล้เก้ เบอร์ 74 S 112 ซึ่งเป็นวงจรมีความเร็วชัตตอทกั (Schotky) คุณสมบัติพิเศษ ก็คือ มีความเร็วในการทำงานสูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำให้เกิดสภาพชอทกัเบริเออร์โกลอคขึ้นระหว่างรอยต่อของเบสกับคอลเลคเตอร์ ในทรานซิสเตอร์ชนิดธรรมดา เป็นการลดสภาพความเป็นตัวเก็บประจุระหว่างรอยต่อให้เหลือน้อยมาก ทำให้ความเร็วในการสวิตช์สูงขึ้น

วงจรมีสำเร็จรูปเบอร์ 74 S 112 เป็นวงจรมีเจเค ฟลิปฟลอปที่ใช้ส่วนขอบของพัลส์ลบ (Negative Pulse) ไปกระตุ้นการทำงาน มีขั้วเข้าสำหรับทำหน้าที่ Preset และ Clear ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงจรมีเป็นดังภาพประกอบ 21 และวงจรมีสิบที่ใช้วงจรมีสำเร็จรูปเบอร์ 74 S 112 เป็นดังภาพประกอบ 22

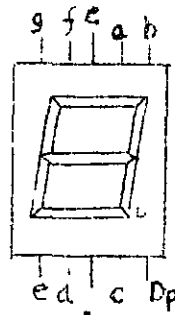


ภาพประกอบ 21 รูปสมมุติของวงจรมีสำเร็จ 74 S 112



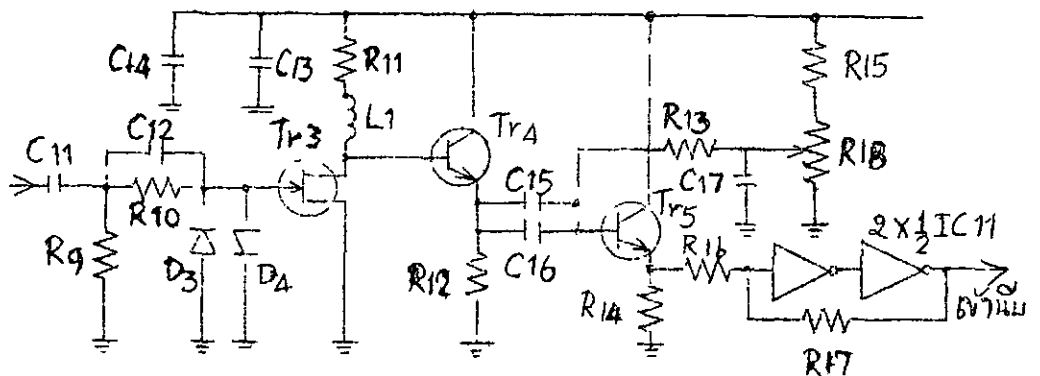
ภาพประกอบ 22 วงจรมีสิบประกอบจาก 74 S 112

1.5 ส่วนแสดงผล (Display) สร้างจาก LED เจ็ดส่วน ชนิด
 โคมุครวม (Common cathode) เบอร์ FND 500 ซึ่งมีลักษณะการต่อขาภายนอก
 เป็นดังภาพประกอบ 23 โดยเหตุที่วงจรลอกรหัสสามารถขับ LED นี้ได้โดยตรง
 จึงสามารถต่อเข้าด้วยกันได้เลย แต่เพื่อป้องกันมิให้ส่วนแสดงผลได้รับความเสียหาย
 เนื่องจากมีกระแสไหลย้อน LED มากเกินไป ก็ให้ต่อความต้านทานค่า 470 โอห์ม
 เป็นตัวกำหนดกระแสภายนอกอีกทีหนึ่ง



ภาพประกอบ 23 วงจรส่วนแสดงผล

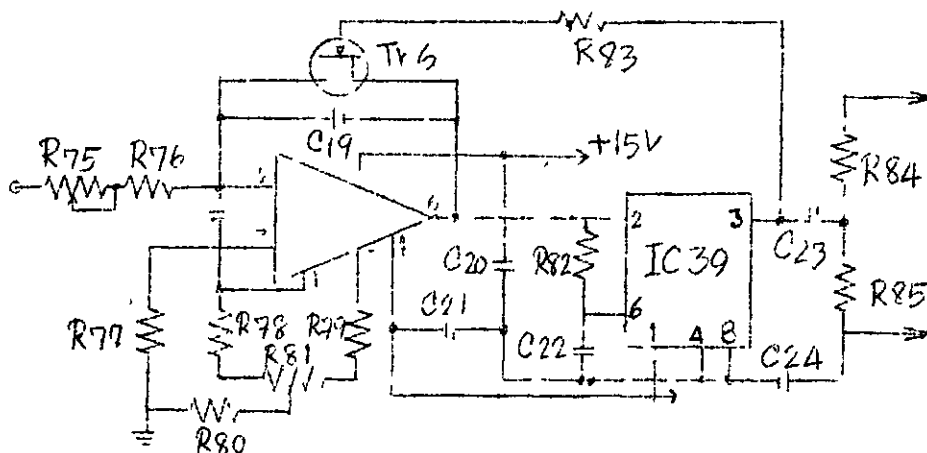
1.6 วงจรคัทรูปคลื่น (Wave Shaping) ได้แก่ วงจรไฟฟ้าที่จะ
 ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ารูปใด ๆ เช่น ไซน์ สามเหลี่ยม รูปเข็มนาฬิกา ให้เป็น
 รูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) ที่มีควมถี่ของคลื่นเท่าเดิมทุกประการ สมบัติที่
 ตองการของวงจรส่วนนี้ คือ ให้มีความต้านทานขาเข้า (Input
 Impedance) สูงมาก ๆ เพื่อป้องกันมิให้ควมถี่ของสัญญาณเปลี่ยนไป และให้มี
 ที่ปรับแต่งควมไวได้ควย วงจรคัทรูปคลื่น เป็นดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 วงจรคัทรูปคลื่น

2. วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ (Voltage to frequency converter)

วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ประกอบด้วยสองส่วน คือ วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรเปรียบเทียบ วงจรอินทิเกรเตอร์ประกอบด้วยออปแอมป์และอิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ การทำงานของอินทิเกรเตอร์จะเริ่มต้นเมื่อ ศักย์ไฟฟ้าบวก ถูกต่อเข้ากับขั้วลบ (Inverting Input) ของออปแอมป์ (IC40) โดยผ่าน R75 และ R76 C19 จะทำหน้าที่ประจุและปล่อยประจุ โดยได้รับการควบคุม จาก FET (Tr6) ในช่วงแรก ศักย์ไฟฟ้าออกที่ขาหกของออปแอมป์จะค่อย ๆ ลดลง จาก +Vcc ไปเป็น -Vcc ในระหว่างนี้เราจะตั้งระดับการเปรียบเทียบไว้ที่ $2/3 V_{cc}$ และ $1/3 V_{cc}$ ดังนั้น ครั้งแรกเมื่อศักย์ไฟฟ้าลดลงถึง $2/3 V_{cc}$ วงจรเปรียบเทียบ จะถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนสถานะ ใค้สัญญาณเป็นพัลส์บวกออกที่ขาสามของวงจรสำเร็จรูป 555 (IC39) ส่วนหนึ่งของสัญญาณนี้จะถูกนำไปควบคุมการประจุและ การปล่อยประจุของ C19 โดยที่พัลส์บวกจะทำให้ FET นำกระแส C19 จะปล่อย ประจุออก เมื่อศักย์ไฟฟ้าออกที่ขาหกของออปแอมป์ลดลงถึง $1/3 V_{cc}$ วงจร เปรียบเทียบจะถูกกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าออกที่ขาสามของ IC39 จะเปลี่ยนแปลงอีกและ FET จะไม่นำกระแส ต่อจากนี้ C19 จะเริ่มทำการประจุใหม่ จนกระทั่ง ศักย์ไฟฟ้าออกที่ขาหกของออปแอมป์มีค่าเป็น $2/3 V_{cc}$ อีก C19 จะถูกสั่งให้ ปล่อยประจุอีก เป็นดังนี้เรื่อยไป ผลที่ได้คือเกิดพัลส์แคว ๆ เป็นขบวนต่อเนื่องกันไป ความถี่และความกว้างของพัลส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปลี่ยนค่า R75, R76 และ C19 ทุก R78, R79, R80 และ R81 มีไว้สำหรับการปรับศักย์ออฟเซต (Offset Voltage) ของออปแอมป์ เพื่อให้ศักย์ออกที่ขาหกเป็นศูนย์เสมอเมื่อ ศักย์ไฟฟ้าเข้าเป็นศูนย์ วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่เป็นคังภาพประกอบ 25 วงจรนี้จะให้ความถี่ออก 1,000Hz เมื่อศักย์ไฟฟ้าเข้าเป็นหนึ่งโวลต์

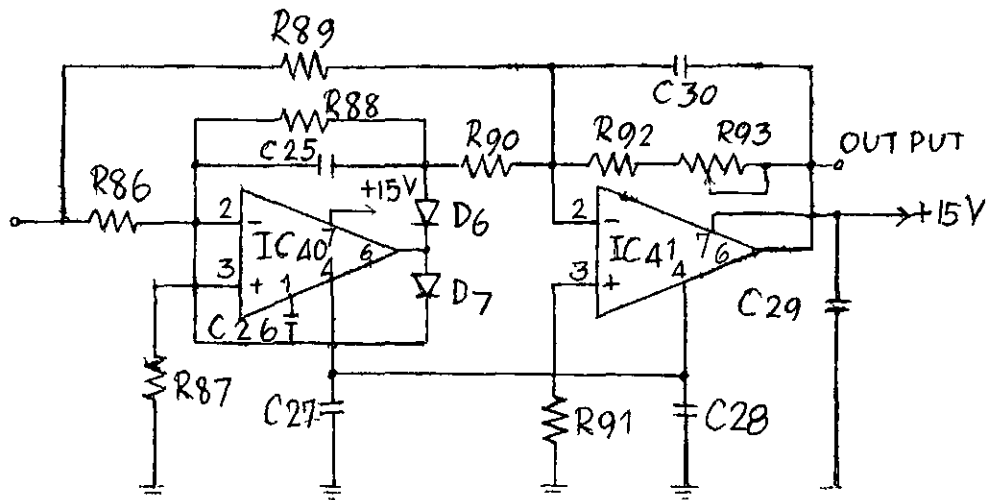


ภาพประกอบ 25 วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่

3. วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (AC to DC Converter)

วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้วงจร

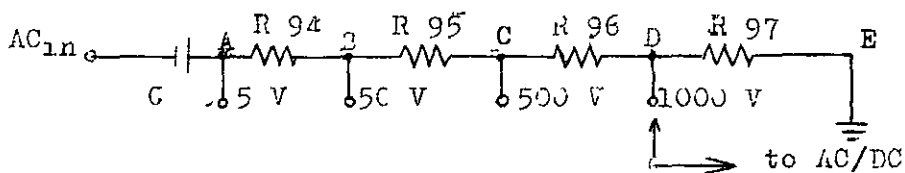
แบบ Precision full wave rectifier (National Semiconductor Corporation. 1973 : AN20-9, AN 31-2) ทำหน้าที่เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระเพื่อม (Pulsating d.c.) ซึ่งศักย์และกระแสไฟฟ้าจะไม่คงที่ ศักย์ไฟฟ้าแบบนี้จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรกรอง ซึ่งจะให้สัญญาณความถี่ค่าผ่านไปเท่านั้น ศักย์ไฟฟ้าออกจะเป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเฉื่อย วงจรประกอบด้วยออปแอมป์ เบอร์ 741 จำนวนสองตัว ออปแอมป์ตัวแรก (IC40) กับไดโอด D6 และ D7 เบอร์ 1N914 จะทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์ ออปแอมป์ตัวที่สอง (IC41) จะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองดังภาพประกอบ 26 การทำงานของวงจรเริ่มด้วยศักย์ไฟฟ้าสลับถูกป้อนเข้าที่ขั้วลบ (Inverting Input) ของ IC40 และ IC41 โดยผ่าน R86 และ R89 ตามลำดับ เมื่อครึ่งบวกของสัญญาณสลับป้อนเข้าไป D36 จะนำกระแสทำให้ไดโอดกระแสตรงกระเพื่อมป้อนเข้าสู่ขั้วลบของ IC41 โดยผ่าน R90 ศักย์ไฟฟ้าจะถูกกรองด้วย C30 ค่า $10 \mu\text{F}$ เมื่อสัญญาณสลับครึ่งลบผ่านเข้ามาจะถูกขลิบยกด้วย D7 ประมาณ 0.7 โวลต์



ภาพประกอบ 26 วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าสลับเป็นศักย์ไฟฟ้าตรง

ในตอนนี้กระแสที่เกิดขึ้นที่จุดรวม (Summing Point) ของ IC41 จะทำให้เกิดลักษณะการแปลงแบบเต็มคลื่นกลับ (Full Wave Rectifier) โดยได้อำมพลิจุกของศักย์ไฟฟ้าตรงกระแสเพื่อมีขนาดเท่ากับเมื่อสัญญาณครึ่งบวกผ่านเข้ามา เมื่อรวมเอาสัญญาณออกทั้งสองด้าน จะได้ศักย์ไฟฟ้าออกแบบรากเฉลี่ยกำลังสอง (V_{rms}) เราจะทำการศึกษาศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้ได้ด้วยกรบ่อนเข้าสู่วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ต่อไป

เพื่อให้สามารถวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับได้หลายพิสัย จะต้องใช้วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้า ให้มีค่าพอเหมาะต่อการป้อนเข้าสู่ IC40 (ภาพประกอบ 26) วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้าเป็นดังภาพประกอบ 27 ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่จุด A, B, C กับจุด D มีค่าห้าโวลต์เท่ากัน และจุด D กับจุด E จะมีค่าหนึ่งโวลต์

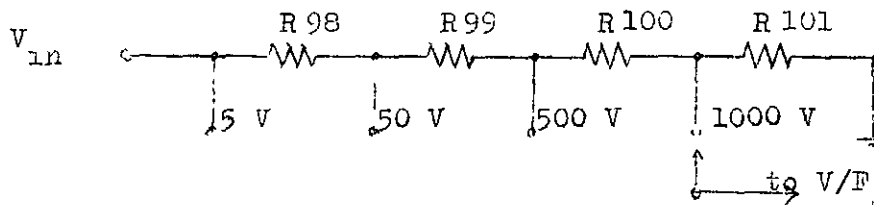


ภาพประกอบ 27 วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ

4. วงจรวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

วัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ด้วยการ เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้านั้นเป็นความถี่แล้ววัดความถี่นั้น ๆ เพื่อให้สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้หลายพิสัย ต้องใช้วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่วงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ไม่เกินห้าโวลต์ ดังภาพประกอบ

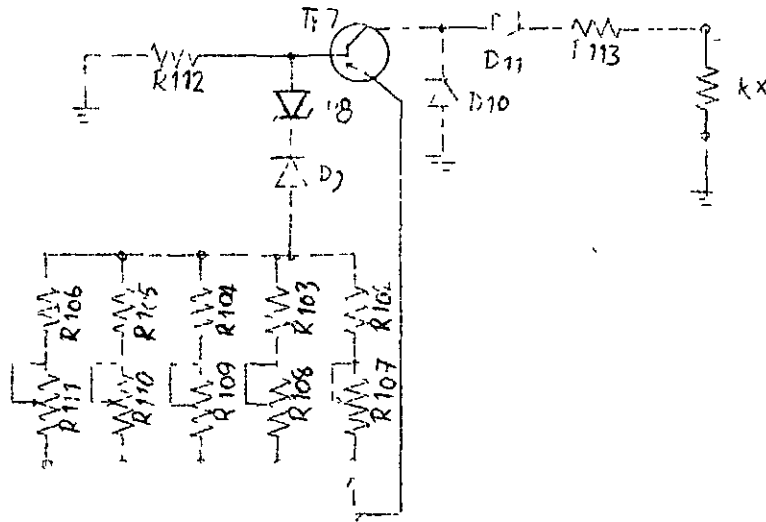
28



ภาพประกอบ 28 วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

5. วงจรวัดความต้านทาน

วงจรวัดความต้านทาน ประกอบด้วยวงจรกำเนิดกระแสตรงที่ที่มีความต้านทานขาออกสูงมาก ๆ ทั้งนี้เพื่อให้วงจรจ่ายกระแสตรงที่มีเสถียรภาพการทำงานดีเมื่ออยู่กับกระแสสูง ๆ และเพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกระแสได้หลายค่า จะต้องใช้วงจรเลือกการไบแอสทรานซิสเตอร์ ดังภาพประกอบ 29 การทำงานจะเป็นดังนี้ เมื่ออิมิตเตอร์ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ขนาด +15 V. โดยผ่านทางสวิตช์เลือกชุดของความต้านทาน R111, R110, R109, R108 หรือ R107 ความต้านทานเหล่านี้จะกำหนดศักย์ไฟฟ้าระหว่าง B กับ E ให้แก่ T₂7 ค่าต่าง ๆ กัน ผลก็คือมีกระแสคอลเล็กเตอร์ต่าง ๆ กัน กระแสคอลเล็กเตอร์จะไหลผ่าน R_x ทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อม R_x เราจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ค่านี้ D11 จะทำหน้าที่ป้องกันศักย์ไฟฟ้าบวกไม่ให้ไหลเข้าไปถึงคอลเล็กเตอร์มากกว่าที่กำหนด R113 จะป้องกันมิให้กระแสคอลเล็กเตอร์ไหลออกมากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์



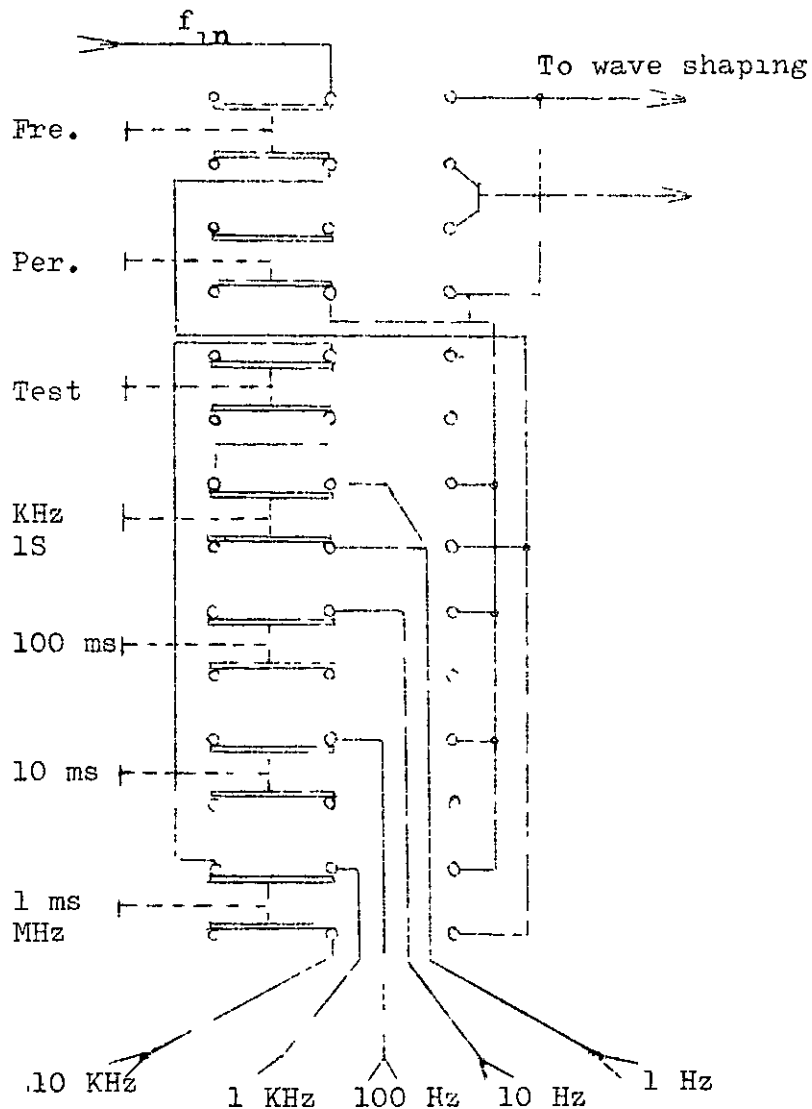
ภาพประกอบ 29 วงจรจ่ายกระแสแสดงที่

6. วงจรวัดความจุของตัวเก็บประจุ

วงจรวัดความจุของตัวเก็บประจุมีสามส่วน คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรกำเนิดความถี่มาตรฐาน และวงจรเครื่องนับ วงจรออสซิลเลเตอร์จะต้องให้ ความถี่แปรค่าตามค่าของตัวเก็บประจุ C_x วงจรเป็นดังภาพประกอบ 14 การทำงาน เป็นดังต่อไปนี้ ตัวเก็บประจุ C_x จะได้รับการประจุโดยผ่าน R_{114} R_{117} และ R_{116} หรือ R_{114} และ R_{115} . จนมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวมันเท่ากับค่าศักย์เทียบ ตัวเปรียบเทียบที่หนึ่ง ภายในวงจรสำเร็จเบอร์ 555 จะส่งสัญญาณไปกระตุ้นวงจร ฟลิปฟลอป ซึ่งจะเกิดสัญญาณไปส่งให้ C_x ปล่อยประจุ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_x จะ ลดลงไปเรื่อย ๆ (เวลาที่ลดลงเป็นแบบเอกซโพเนนเชียล) จนถึงศักย์เทียบที่สอง วงจร เปรียบเทียบจะส่งสัญญาณไปกระตุ้นฟลิปฟลอปให้เปลี่ยนสถานะอีก เป็นการสั่งให้ C_x เริ่มทำการประจุใหม่ ถ้าเรานำผลจากการเปลี่ยนสถานะของวงจรฟลิปฟลอปไปใช้ จะได้นับวนคลื่นต่อเนื่องกันไป เราจะนำเอาคลื่นขบวนนี้ไปควบคุม AND เกท เพื่อ ปล่อยให้ความถี่มาตรฐาน เข้าเครื่องนับต่อไป วงจรกำเนิดความถี่มาตรฐาน คือ วงจรซุกเดียวกับวงจรกำเนิดความถี่มาตรฐานเวลาในเครื่องนับ

8. การวัดกายนเวลา

แนวความคิดของการวัดกายนเวลาของควมถี่ใด ๆ ปรากฏตามภาพประกอบ 12 หน้า 30 ลักษณะสำคัญของการวัดกายนเวลา ก็คือ การสลับตำแหน่งระหว่างสัญญาณควบคุมจากวงจรฐานเวลากับสัญญาณที่จะนับใด ๆ นั่นคือ ใช้สัญญาณใด ๆ มาเป็นสัญญาณควบคุม และให้สัญญาณความถี่ซึ่งเป็นสัญญาณเข้านับ เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ต้องใช้วงจรสวิตช์ ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 วงจรสวิตช์

การสร้างเครื่องนับ เครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ และผลการทดลอง

ลักษณะของเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์

เครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่สร้างขึ้น มีส่วนประกอบดังนี้

1. เรือนเครื่อง

เรือนเครื่องประกอบด้วยตัวเรือนและแผ่นหน้า ทำด้วยแผ่นเหล็ก ขนาด $11\frac{1}{2}'' \times 13'' \times 6''$ โดยออกแบบตัวเรือนเครื่องให้สามารถวางได้ในลักษณะเดียว แผ่นหน้าจะเป็นที่ติดตั้งสวิทช์ควบคุมต่าง ๆ และแผงแสดงค่าในตัวเครื่องจะเป็นที่ติดตั้งแผงวงจรต่าง ๆ เนื่องจากมีวงจรประกอบหลายชุด และในการทดลองสร้าง ผู้วิจัยได้แยกวงจรออกเป็นภาค ๆ ทำให้มีแผงวงจรหลายแผ่น และโคที่ทำที่วางเป็นสองชั้น ชั้นแรกจะเป็นที่วางแผงวงจรนับ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เครื่องแปลงไฟฟ้า และวงจรแหล่งจ่ายกำลัง ชั้นบนจะเป็นที่ติดตั้งวงจรประกอบอื่น ๆ โดยที่การออกแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ ให้มีแผ่นโลหะปิดครอบอยู่แล้ว จึงต้องหาแผ่นโลหะตัวนำอื่นมาขึ้นการรบกวนระหว่างภาคจ่ายกำลังกับภาควงจร

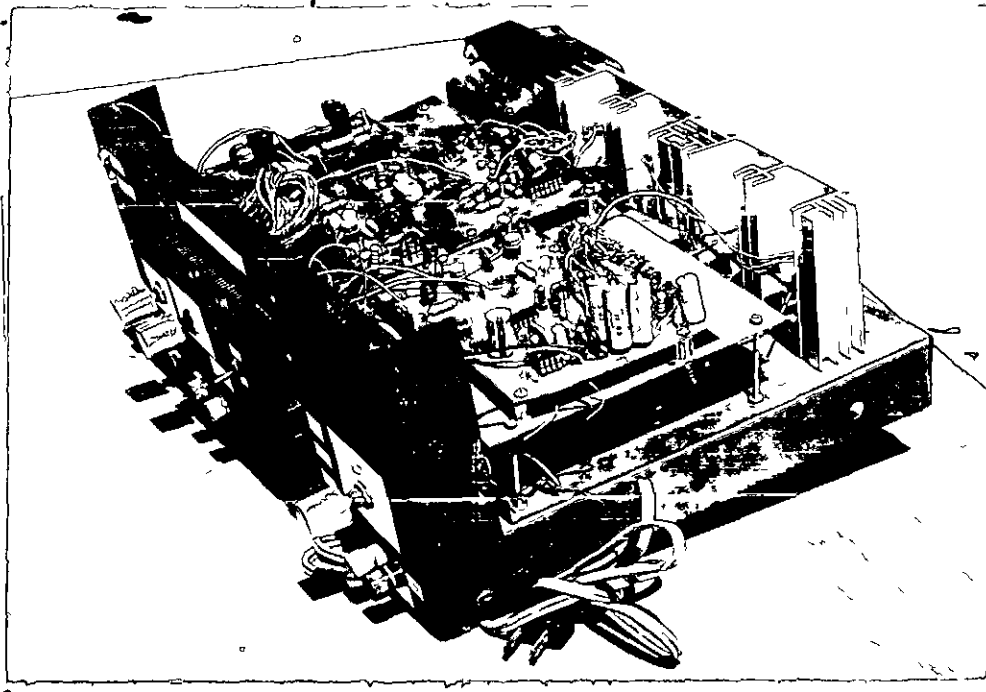
2. สวิทช์และปุ่มปรับ

สวิทช์ควบคุมทั้งหมด กำหนดให้ติดตั้งไว้บนแผ่นหน้าของเครื่อง ซึ่งมีดังต่อไปนี้

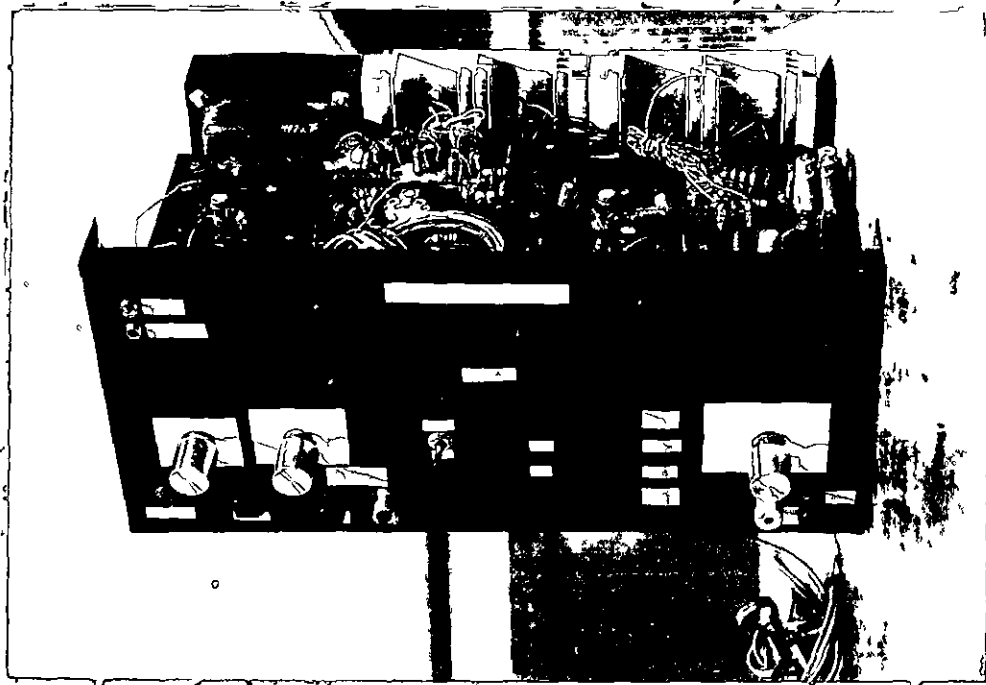
สวิทช์ ON-OFF เป็นสวิทช์แบบกดปุ่ม กดครั้งแรกสวิทช์จะค้างวงจรจะปิด (ON) กดอีกครั้งสวิทช์จะกลับตำแหน่งเดิมวงจรเปิด (OFF)

หลอดไฟ 1 เป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) สีแดง ใช้เป็นเครื่องแสดงว่าวงจรจ่ายกำลังไฟกำลังทำการจ่ายกระแสไฟทำให้แกว่งจรโดยไม่มีเหตุขัดข้อง

หลอดไฟ 2 เป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) สีแดง ใช้เป็นเครื่องแสดงว่าเกินพิสัยการวัด



ภาพประกอบ 31 ภาพถ่ายของ เครื่องนับและ เครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์



ภาพประกอบ 32 ตำแหน่งสวิตช์และปุ่มปรับด้านหน้า

หลอดไฟ 3 เป็นไดโอดเปล่งแสง (LED) สีเขียว ใช้เป็นเครื่อง
แสดงว่า การนำสัญญาณเข้าเครื่องวัดชนิดชั่ววินาทีเสียใหม่

สวิทช์การทำงานแบบโรตารี (Rotary) มีสามตัวด้วยกัน ทำหน้าที่ดังนี้

1. สวิทช์ S_1 ทำหน้าที่เลือกพิสัยการทำงาน เป็นชนิดสามขั้ว ทำ
ตำแหน่ง
2. สวิทช์ S_2 ทำหน้าที่เลือกการทำงาน (Function Switch)
สำหรับวงจรดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เป็นชนิดสามขั้ว ทำตำแหน่ง
3. สวิทช์ S_3 ทำหน้าที่เลือกการทำงานของวงจรมับ เป็นชนิด
ขั้วเขียว สามตำแหน่ง

สวิทช์เลือกการทำงานแบบกดปุ่ม เป็นชนิดกดครั้งเดียว แล้วสวิทช์จะ
เปลี่ยนตำแหน่งตลอด (Change over switch) มีสามตำแหน่ง และสี่ตำแหน่ง
สองข้างสวิทช์ชุดนี้จะทำหน้าที่เลือกความถี่ต่าง ๆ ที่จะนำไปใช้ในการนับคาบเวลา
และทำหน้าที่เลือกให้สัญญาณผ่านเข้าสู่วงจรมับ

สวิทช์เลือกแบบโยกสามขา เป็นสวิทช์ที่จะทำหน้าที่เลือกวงจรกำเนิดสัญญาณ
นาฬิกาเข้าป้อนให้กับวงจรหาร มีสองอย่าง คือ คริสตัลลออสซิลเลเตอร์ (Crystal
oscillator) และอาร์-ซี ฟรีรันนิ่งออสซิลเลเตอร์ (R-C free running
oscillator)

ปลั๊กเสียบ มีปลั๊กเสียบ (Banana jack) สองคู่จุก สำหรับนำ
สัญญาณเข้านับแยกจากกัน

แผงแสดงผล เป็นแผงแสดงตัวเลขสี่แฉกแปดหลัก แต่ละหลักทำจาก LED
เจ็ดส่วน ชนิดขั้วไฟฟ้าลบรวม (Common cathode)

วงจรมและชิ้นส่วน

วงจรถ่าง ๆ ที่สร้างชิ้นทุกส่วน เมื่อนำมารวมกันจะปรากฏถึงภาพประกอบ (ภาพพิมพ์เขียว) ชิ้นส่วนต่าง ๆ ตามหมายเลขอ้างอิง มีดังรายการต่อไปนี้

1. วงจรนับ

หมายเลขอ้างอิง	รายละเอียดประกอบ
C1	10 pF 50 V Disc ceramic capacitor
C2	50 pF Trimmer capacitor
C3	200 pF 50 V Disc ceramic capacitor
C4, C14, C15, C17	.01 μ F 50 V Disc ceramic capacitor
C5	5000 pF 50 V Mylar Capacitor
C6, C9	470 μ F 16 V Electrolytic capacitor
C7, C13, C16	10 μ F 25 V Electrolytic capacitor
C8, C10, C11	.1 μ F 50 V Disc ceramic capacitor
C12	100 pF 50 V Disc ceramic capacitor
D1-D5	1 N 914 Switching diode
Dis 1 - Dis 8	FND 500 Common cathode LED - 7 segment displayed
IC1, IC10	7400 N Quadruple 2-input NAND gates
IC2	7404 N Hex inverter
IC3-IC7, IC15-IC21	7490 N Decade counter
IC8	7473 N Dual J-K flip-flop
IC9	7410 N Triple 3-input NAND gates
IC11	74 S 04 N Hex inverter with schottky clamped

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
IC12	7408 N	Quadruple 2-input AND gates
IC13-IC14	74 S 112 J	Dual J-K flip-flop with schottky clamped
IC22-IC29	7475 N	4-bits bistable latches
IC30-IC37	7448 N	BCD-to-seven segment decoder and driver
L1	100 μ H	Inductance coil, air core
R1, R3, R5, R8	470-ohm 5%	Fixed carbon resistor
R2, R4	220-ohm 5%	Fixed carbon resistor
R6, R7	10-kilohm	Potentiometer
R9	10-megohm 5%	Fixed carbon resistor
R10, R13	10-kilohm 5%	Fixed carbon resistor
R11	2.2-kilohm 5%	Fixed carbon resistor
R12, R17	1-kilohm 5%	Fixed carbon resistor
R14, R16	100-ohm 5%	Fixed carbon resistor
R15	4.7-kilohm 5%	Fixed carbon resistor
R18	2-kilohm	Potentiometer
R19-R74	470-ohm 5%	Fixed carbon resistor
Tr1-Tr2	BC 108	Silicon NPN transistor
Tr3	2 SK 19 GR	Field effect transistor
Tr4-Tr5	2 SC 535 B	Silicon NPN transistor
X-Ta1	1 MC	Crystal Quartz 1.000 MC

2. วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
C18	150 pF 50 V	Disc ceramic capacitor
C19	.001 μ F 50 V	Disc ceramic capacitor
C20, C21	.01 μ F 50 V	Disc ceramic capacitor
C22	18 pF 50 V	Disc ceramic capacitor
C23, C24	.003 μ F 50 V	Disc ceramic capacitor
IC 38	μ A 741	Operational amplifier IC.
IC 39	LM 555	Timer IC.
R 75	10-kilohm	Potentiometer
R 76	92-kilohm	5% Fixed carbon resistor
R 77	100-kilohm	5% Fixed carbon resistor
R 78, R 79	1-megohm	5% Fixed carbon resistor
R 80	5-megohm	5% Fixed carbon resistor
R 81	3-megohm	Potentiometer
R 82, R 83	10-kilohm	5% Fixed carbon resistor
R 84	2.2-kilohm	5% Fixed carbon resistor
R 85	270-ohm	5% Fixed carbon resistor
Tr 6	BC 337	Silicon NPN transistor

3. วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

หมายเลขอ้างอิง	รายละเอียดประกอบ
C25	10 pF 50 V Disc ceramic capacitor
C26	150 pF 50 V Disc ceramic capacitor
C27, C28	.01, μ F 50 V Disc ceramic capacitor
C29	.1 μ F 50 V Disc ceramic capacitor
C30	10 μ F 25 V Electrolytic capacitor
C31	.04 μ F 1500 V Tantalum capacitor
C36	.01 μ F 1500 V Tantalum capacitor
D5 -D7	1 N 914 Switching diode
IC40-IC41	μ A 741 Operational amplifier
R86, R89, R92	.100-kilohm Potentiometer
R87	68-kilohm 5% Fixed carbon resistor
R88	82-kilohm 5% Fixed carbon resistor
R90	50-kilohm Potentiometer
R91	33-kilohm 5% Fixed carbon resistor
R93	10-kilohm Potentiometer
R94, R99	1-megohm Potentiometer
R95, R100	100-kilohm Potentiometer
R96	10-kilohm Potentiometer
R97	1111-ohm Potentiometer (1.2 kilohm)
R98	10-megohm Potentiometer
R107	11110-ohm Potentiometer (12 kilohm)
R119	2.7-megohm potentiometer

4. วงจรจ่ายกระแสคงที่

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
D8	3.9 V	Zener diode $\frac{1}{2}$ W.
D9-D11	1 N914	Switching diode
R102	3.3 megohm	5% Fixed carbon resistor
R103	330 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R104	33 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R105	33 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R106	330 ohm	5% Fixed carbon resistor
R107	500 kilohm	Potentiometer
R108	50 kilohm	Potentiometer
R109	5 kilohm	Potentiometer
R110	500 ohm	Potentiometer
R111	100 ohm	Potentiometer
R112	1.5 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R113	100 ohm	5% Fixed carbon resistor
Tr7	2N3638	Silicon PNP transistor

5. วงจรวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
C32	.01 μ F 50 V	Disc ceramic capacitor
C33	.1 μ F 50 V	Disc ceramic capacitor
C34	4.7 μ F 10 V	Tantalum capacitor
C35	.0033 μ F 50 V	Mylar capacitor
D12 - D14	1 N 914	Switching diode

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
IC42	1 M 555	Timer I.C.
R115	100 kilohm	Potentiometer
R114, R117	1 kilohm	Potentiometer
R116	100 ohm	Potentiometer
R118	1 megohm	5% Fixed carbon resistor

6. วงจรภาคจ่ายกำลังไฟฟ้า

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
C37-38	1000 μ F 25 V	Electrolytic capacitor
C39	4000 μ F 16 V	Electrolytic capacitor (2000 μ F X 2 in parallel)
C40-C42	470 pF 50 V	Ceramic capacitor
C43	.01 μ F 50 V	Ceramic capacitor
C44	10 μ F 25 V	Electrolytic capacitor
C45	10 μ F 25 V	Electrolytic capacitor
D15-D18	1 N 4002	Silicon rectifier diode
D19-D22	1 N 4004	Silicon rectifier diode
D23	LED	Power indicator LED
IC43-IC45	μ A723	Voltage regulator I.C.
IC46	MC7805	+5 Volt regulator I.C.
R120, R124	5.6 ohm	5% Fixed carbon resistor
R121, R125	.56 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R122, R126	1 kilohm	Potentiometer
R123, R127	4.7 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R128	5.6 ohm	5% Fixed carbon resistor

หมายเลขอ้างอิง		รายละเอียดประกอบ
R129	1.2 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R130	500 ohm	Potentiometer
R131	6.8 kilohm	5% Fixed carbon resistor
R132	33 ohm	5% Fixed carbon resistor
R133	470 ohm	5% Fixed carbon resistor

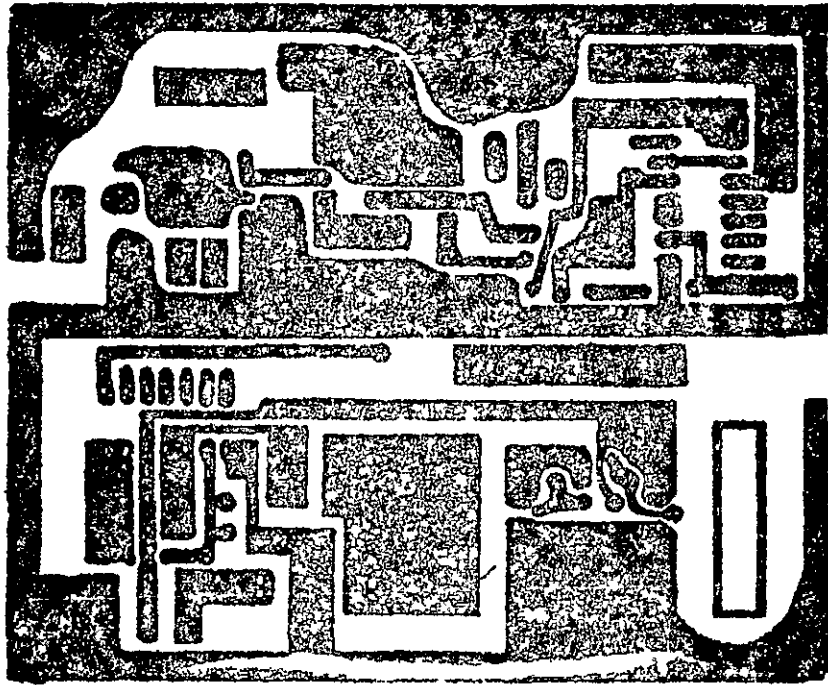
แผนวงจรพิมพ์

เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการทดลองสร้างวงจรโดยการแยกวงจรออกเป็นภาค
 ดังนั้น จึงทำให้มีแผนวงจรพิมพ์หลายแผน ก่อนการออกแบบส่วนนี้ ผู้วิจัยได้ทำการ
 ทดสอบการทำงานของวงจรด้วยแผงวงจรแบบเสียบ เพื่อให้แน่ใจว่าวงจรสามารถ
 ทำงานได้ตามที่กำหนด หรือวงจรได้รับการแก้ไขจนสามารถทำงานได้แล้ว จึงนำมา
 กำหนดแผนทางเดินกระแสไฟฟ้าคร่าว ๆ ขึ้นต่อไป คือ การเขียนแบบทางเดินกระแส
 ไฟฟ้าลงบนกระดาษไข (ชนิดใช้เขียนแบบทั่วไป) โดยให้มีเส้นทางไฟเป็นภาพที่มองเห็น
 ได้จากด้านที่ใสเสียอุปกรณ์ แบบที่ได้นี้จะนำไปถ่ายลงบนแผ่นฟิล์มชนิดไวแสงต่อไป
 ขั้นตอนในการเตรียมแผนวงจรพิมพ์ขั้นแรก คือ การเลือกเอาแผ่นฟิล์มให้มีขนาดเท่าที่ต้องการ
 (กระทำในห้องมืด) ระวังมีไธส่วนที่เคลือบสารไวแสงกระทบกับวัตถุแข็งจนสารเคมี
 หลุดออก แต่งขอบให้เรียบร้อยการขัดกับกระดาษทรายละเอียด เช็ดแผ่นงออกด้วย
 น้ำสำลีนุ่ม ๆ พร้อมทั้งจะถ่ายแบบต่อไป

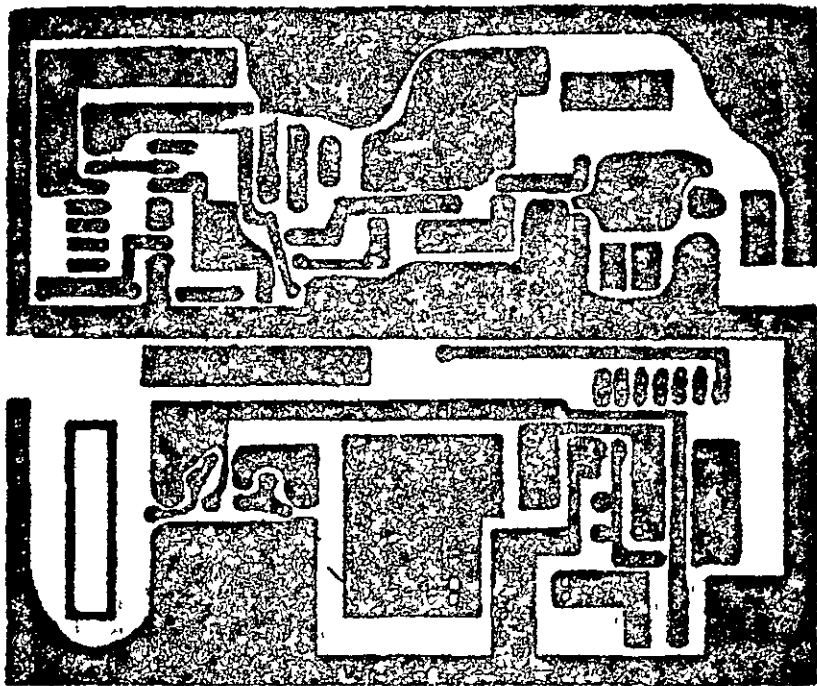
ในการเตรียมแหล่งแสงที่จะใช้ถ่ายแบบ ให้ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด
 20 W จำนวนสองหลอด โดยวางให้ห่างกัน และห่างจากแผ่นแบบสี่นิ้วเท่ากัน ระวัง
 ด้งกล่าวจะทำให้ความเข้มของแสงพอเหมาะต่อการทำปฏิกิริยาของสารและไม่ทำให้
 เกิดการหักเหของแสงมาก ก่อนถ่ายแบบให้ทำการคัดแผนวงจรพิมพ์ แก๊วโค้งงอที่เกิด
 จากการเลือกเสียก่อน แล้ววางคานหลัง (ไม่เคลือบสาร) ลงบนแผ่นกระจกใส วาง
 คานหน้าของแผ่นแบบทับลงไปบนแผนวงจรพิมพ์ จัดตำแหน่งให้ดี ปิดด้วยกระจกใส
 ป้องกันการเลื่อนออกจากที่โดยการหนีบด้วยคลิปก้ามปากลับหลัง นำไปวางเหนือ

หลอดไฟที่เตรียมไว้ โดยให้คานແນ່แบบลงคานกลาง เปิดสวิตช์ไฟฟ้าให้แสงผ่านไป
 กระทบ แฉนวนจรัพิมพ้อย่างน้อย 15 นาที แล้วนำไปล้างน้ำค่างโซดาไฟ (NaOH)
 จะใช้เวลาคะประมาณสองนาที่ สารเคมีที่เคลือบไว้บริเวณที่ถูกกับแสงจะหลุดไป ส่วนที่
 ไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่และมีสีเขียว เมื่อเห็นว่าเส้นลายตาง ๆ ปรากฏขึ้นดีแล้ว ให้นำ
 ออกไปล้างน้ำสะอาด เป่าควยลมแห้งหรือผึ่งแสงแดด ต่อจากนี้ นำไปกักเอาทองแดง
 ส่วนที่ไม่ต้องการออก ส่วนที่มีสีเขียวจัน้อยจะยังคงอยู่ ขั้นสุดท้าย ก็ือ การเจาะรู
 เสียบอุปกรณ ให้เลือกใช้คอกสว่าที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่าที่พอกก็กับอุปกรณ (1/64")

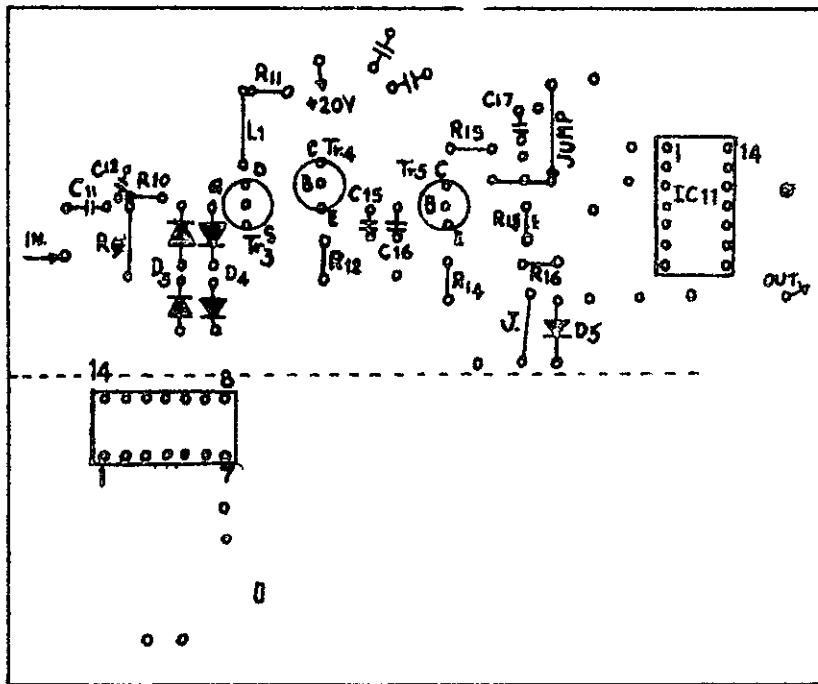
เนื่องจากชั้นส่วนของวงจรัตาง ๆ ส่วนใหญ่เป็นวงจรัสำเร็จรูป การบักกรี
 ติดกับแฉนวนจรัโดยตรง อาจจะทำให้โครงสร้ารงภายในของอุปกรณสำเร็จรูปเสียหายได้
 ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ซาเลียบสำหรับวงจรัสำเร็จรูปทั้งหมด ยกเวณ Op-amp 741 บางตัว
 การใช้ซาเลียบจะทำให้งายตอการตรวจสอบ และการดูแลรักษาอีกควย



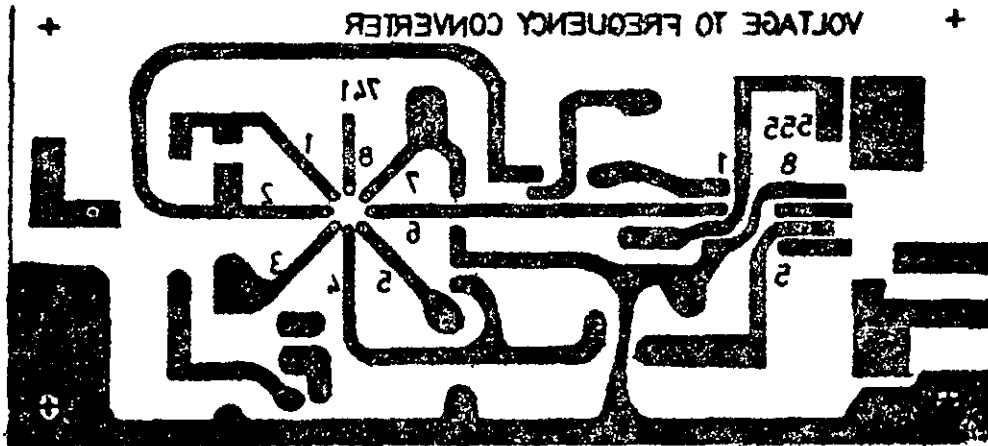
ภาพประกอบ 33 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจรตีกรุปคลื่น



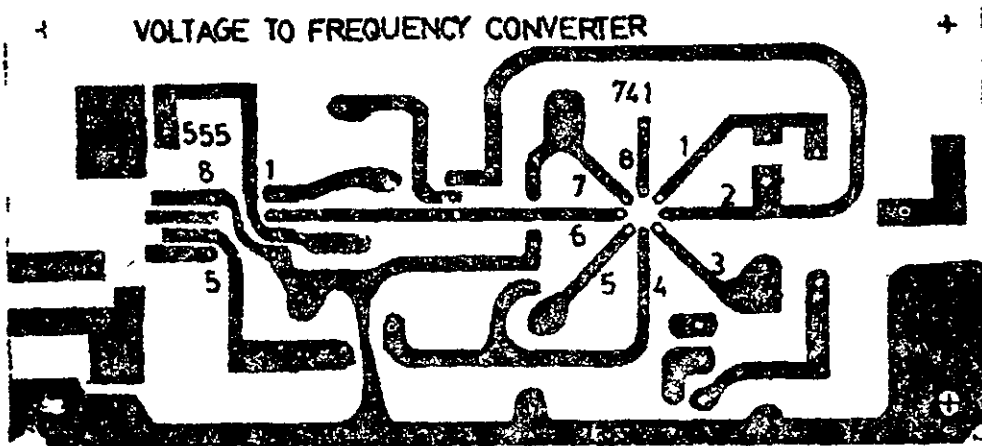
ภาพประกอบ 34 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจรตีกรุปคลื่น



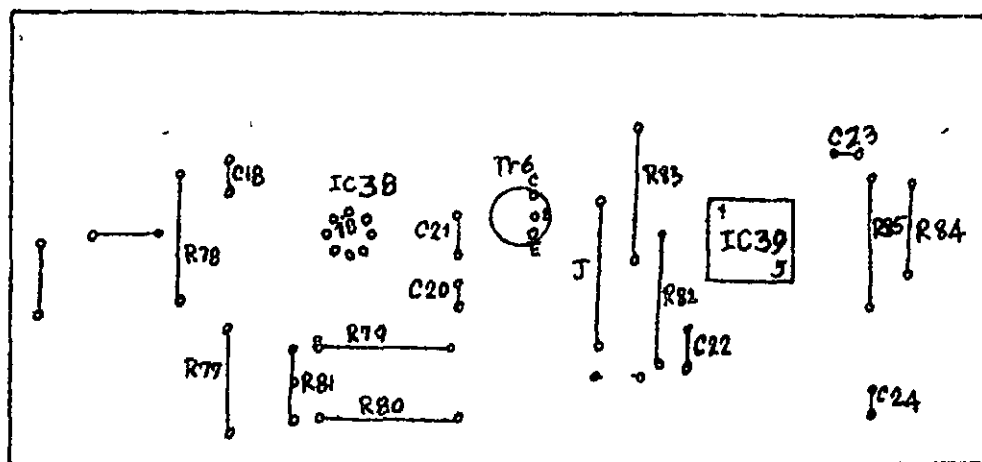
ภาพประกอบ 35 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรตีตรูปคลื่น



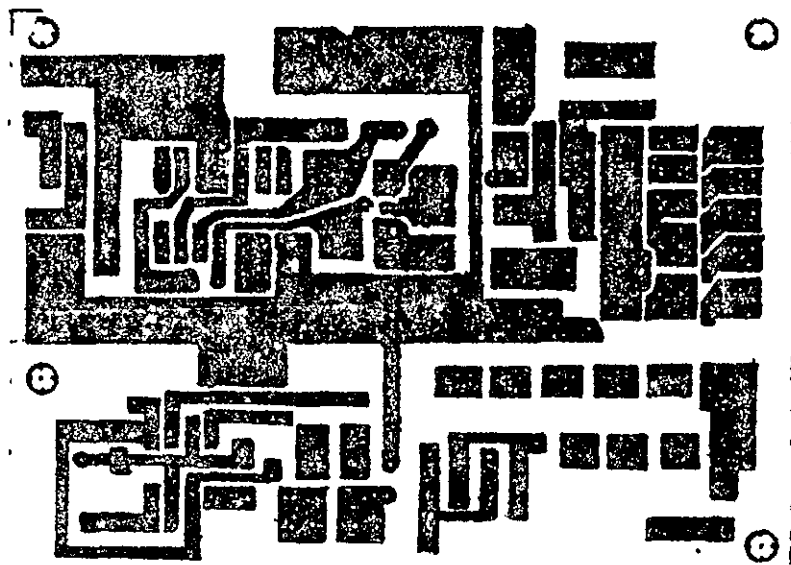
ภาพประกอบ 36 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่



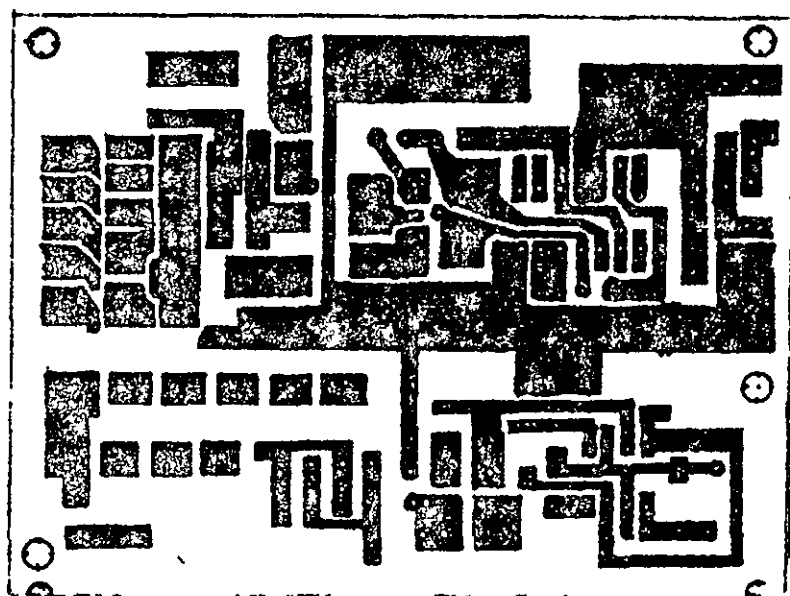
ภาพประกอบ 37 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่



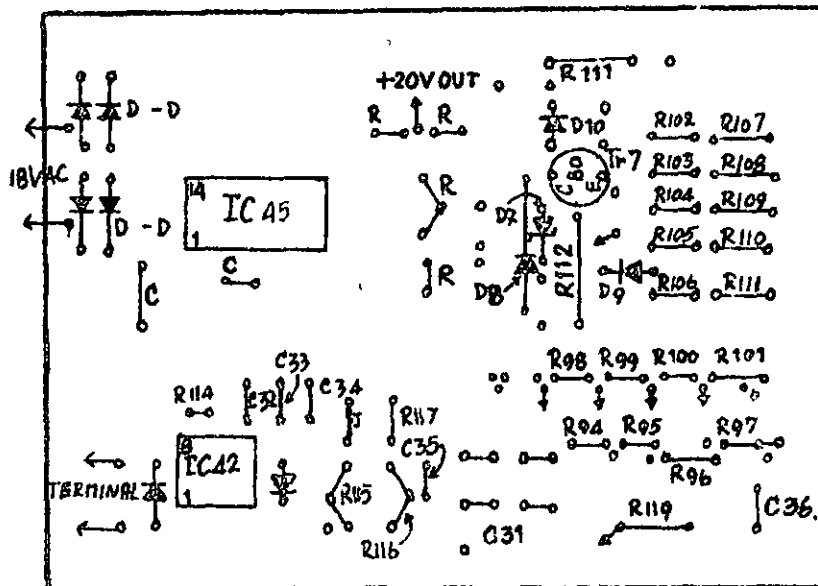
ภาพประกอบ 38 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่



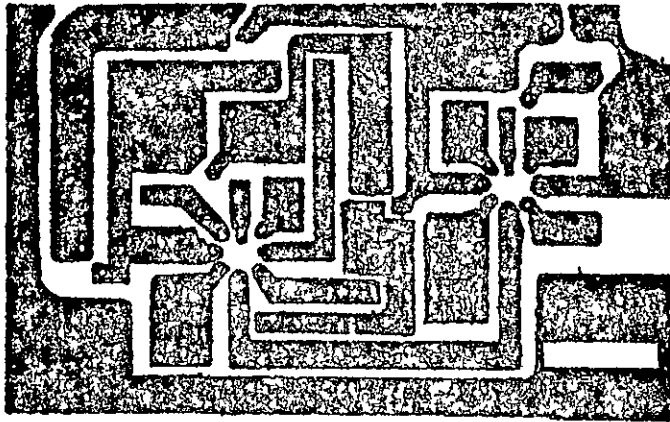
ภาพประกอบ 39 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านบนของวงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 20 V. วงจรจ่ายกระแสคงที่และวงจรวัดความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า



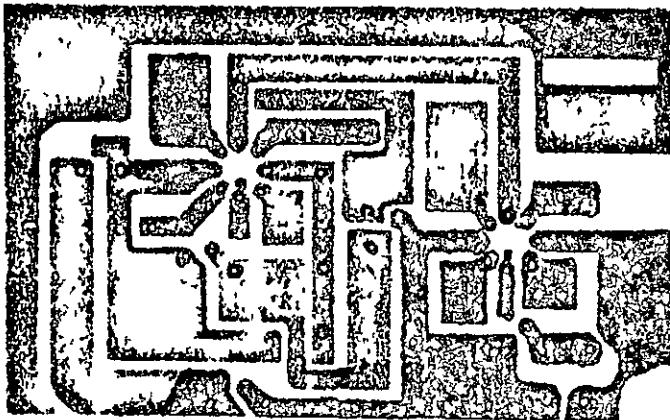
ภาพประกอบ 40 แผ่นวงจรพิมพ์มองจากด้านล่างของภาพประกอบ 39



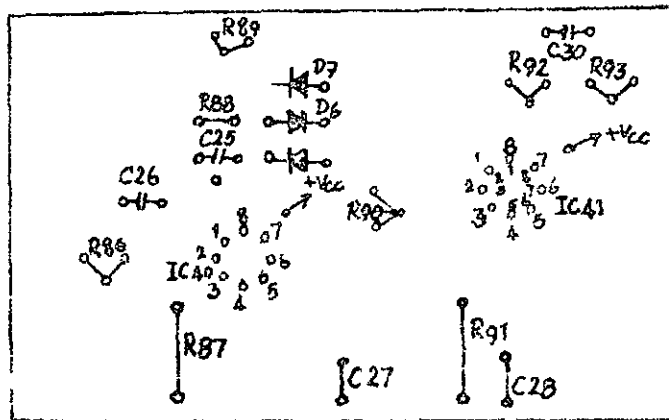
ภาพประกอบ 41 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร ตามภาพประกอบ 39 และ 40



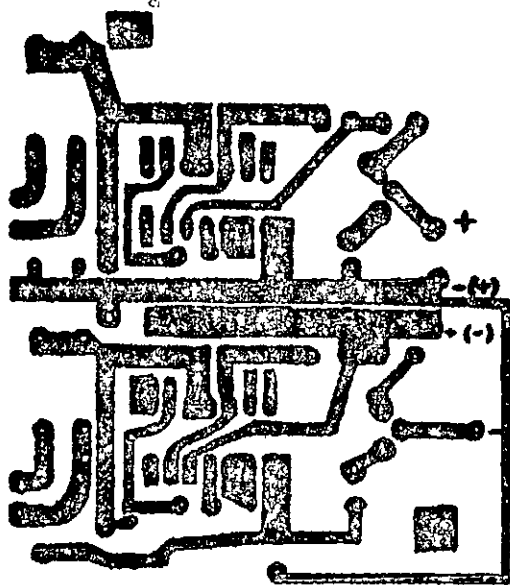
ภาพประกอบ 42 แผ่นวงจรมีมหันต์มองจากด้านบนของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น
ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง



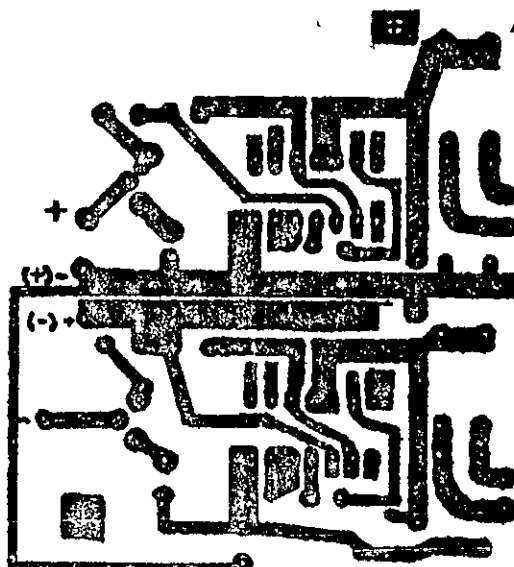
ภาพประกอบ 43 แผ่นวงจรมีมหันต์มองจากด้านล่างของวงจร เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็น
ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพประกอบ 44 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าจาก แหล่งจ่ายเป็น
ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

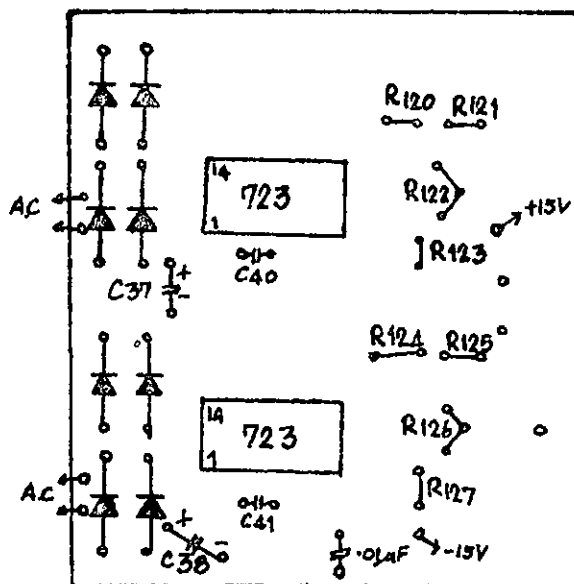


ก. มองจากด้านบน

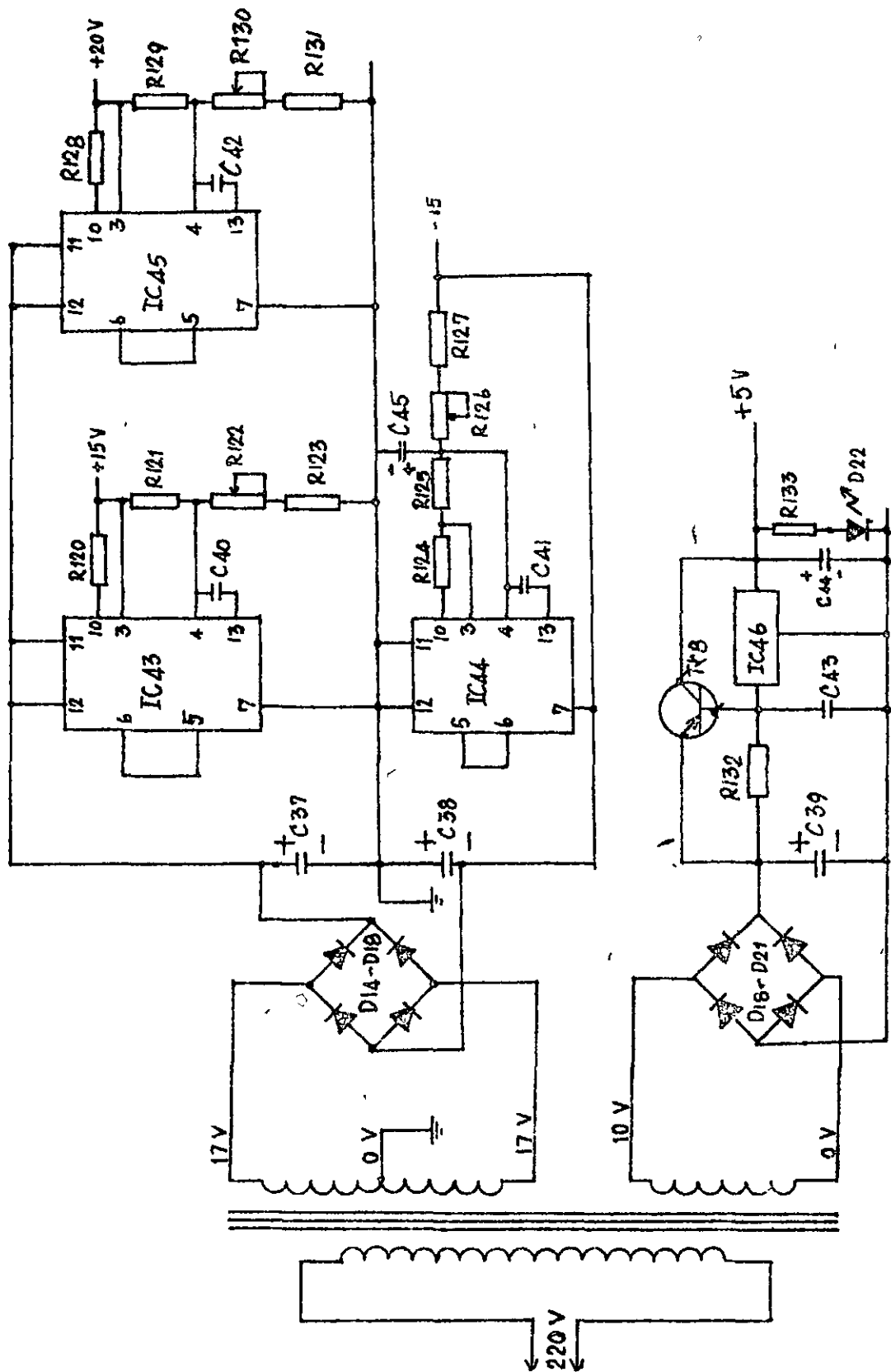


ข. มองจากด้านล่าง

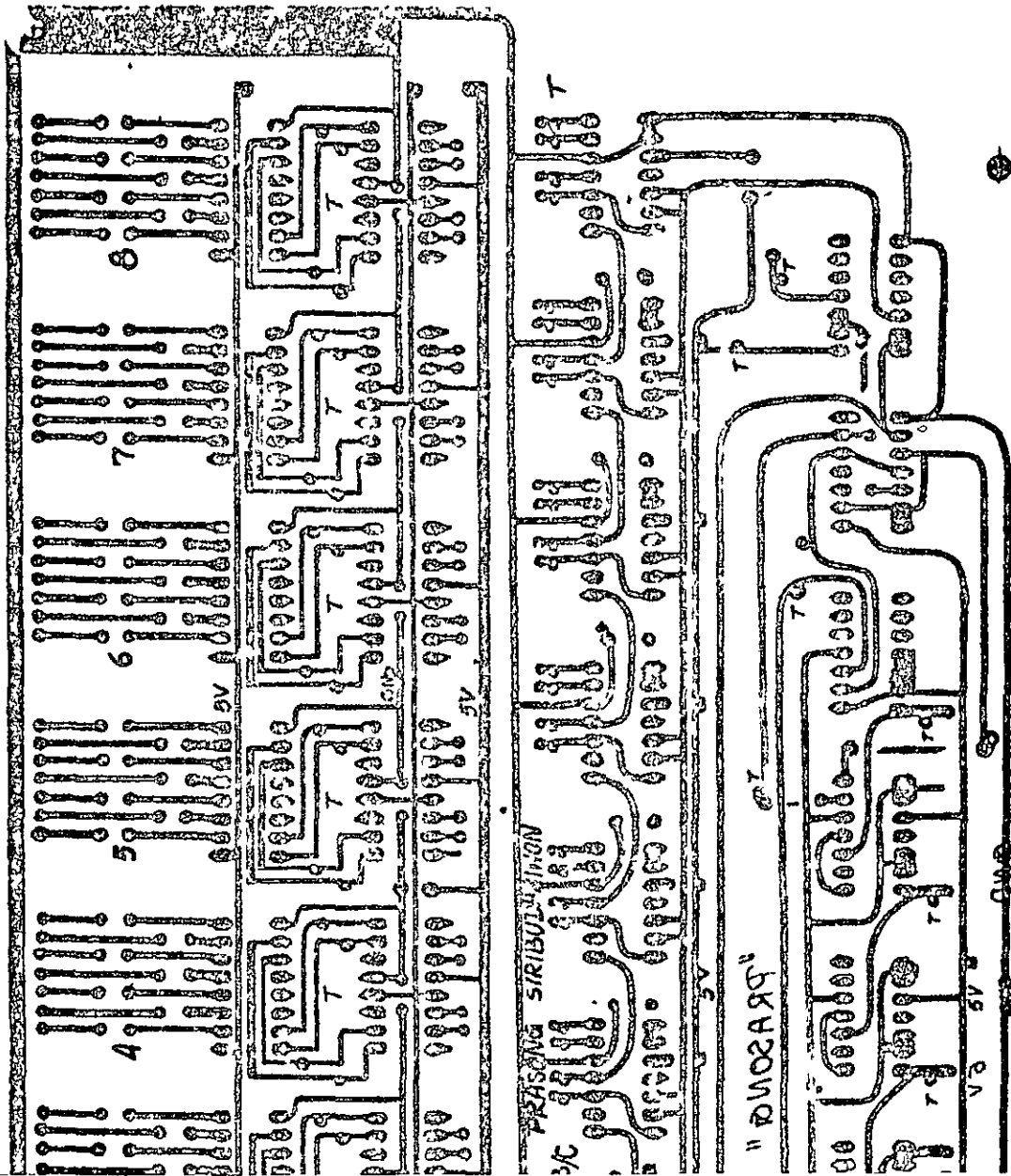
ภาพประกอบ 45 แผงวงจรพิมพ์ของวงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 15 V.



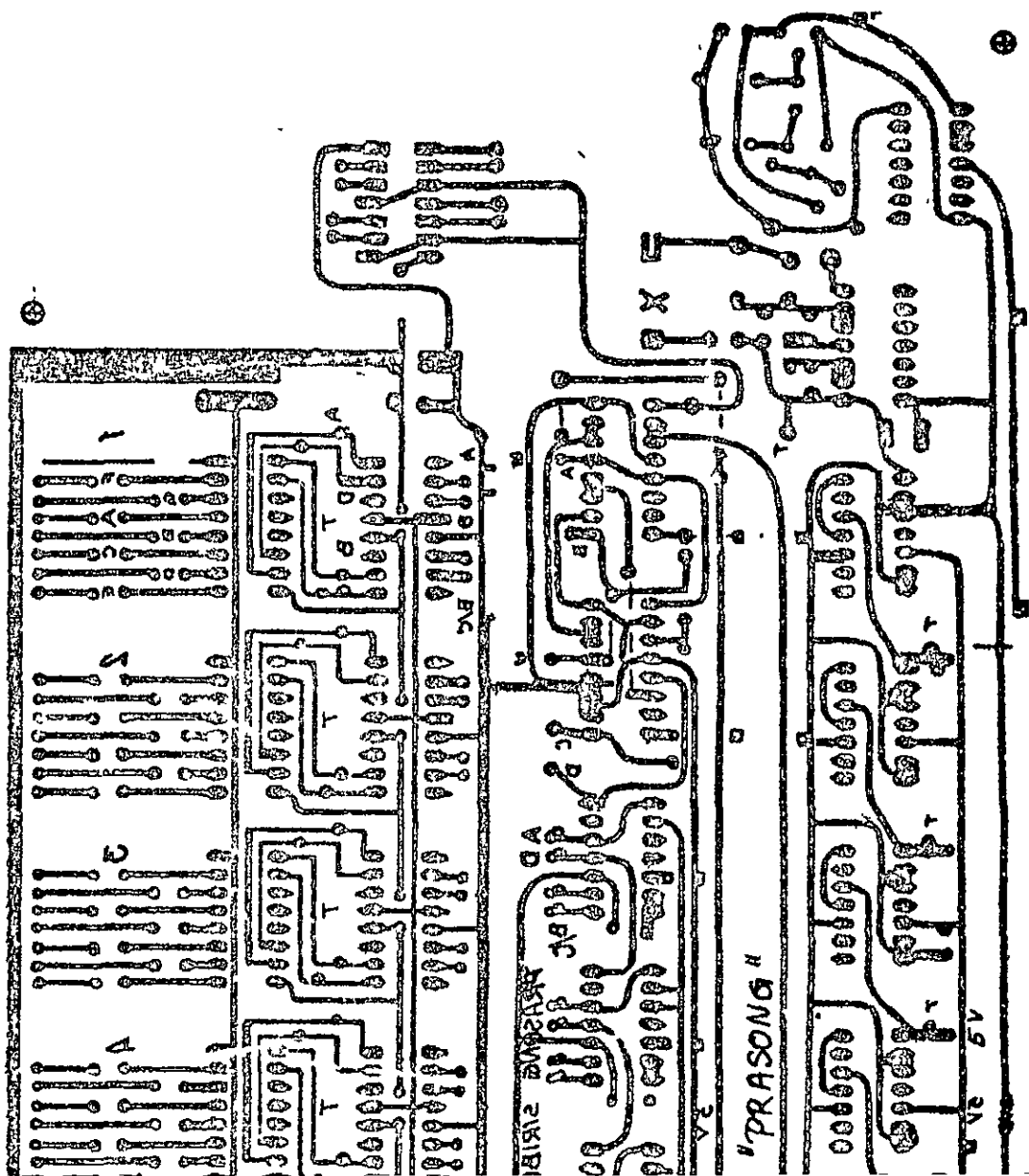
ภาพประกอบ 46 แสดงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 47 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า



วงฆ้องวงโบราณของเจ้าท่าบาง



วงจรมอเตอร์ของงานรับลิ้มมองจากด้านล่าง

JUMP TO DIS 3

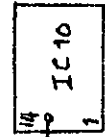
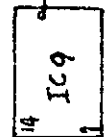
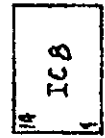
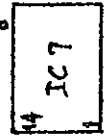
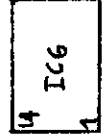
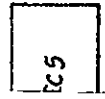
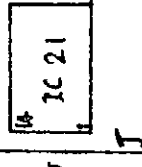
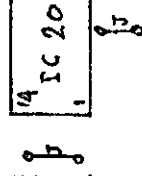
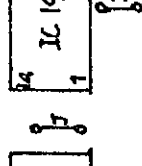
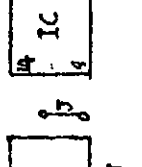
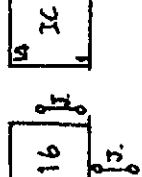
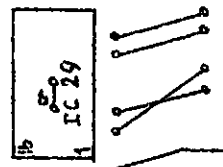
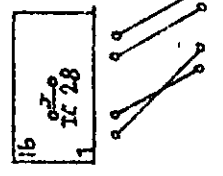
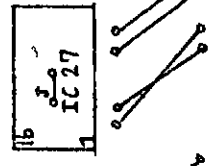
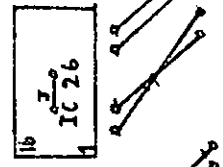
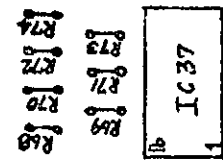
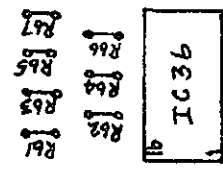
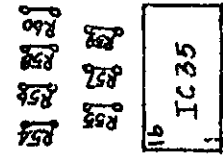
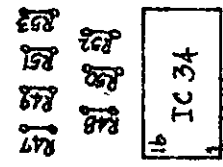
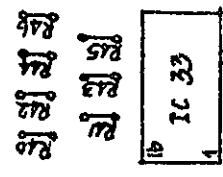
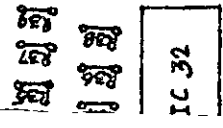
JUMP TO DIS 4

JUMP TO DIS 5

JUMP TO DIS 6

JUMP TO DIS 7

JUMP TO DIS 8



IC 6

ต้องการวางตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรนับสิบ

การปรับแต่ง (Calibration) เครื่องนับและเครื่องจิจิตัลมัลติมิเตอร์

เมื่อสร้างเครื่องนับและเครื่องจิจิตัลมัลติมิเตอร์แล้ว จำเป็นต้องมีการปรับแต่ง เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องดังนี้

1. การปรับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาจากวงจรฟรีรันนิ่ง ออสซิลเลเตอร์ ให้ทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน R6 และ R7 ให้ความถี่ออกที่ซาคอลเลคเตอร์ของ Tr2 ได้ 100 kHz การตรวจความถูกต้องของสัญญาณที่ได้จากส่วนนี้ ทำได้ด้วยการตรวจคลื่นพัลส์ของวงจรหารที่ได้จาก IC6 ความถี่ที่ได้จะเป็น 100 Hz แต่การปรับความถี่ออกของ IC6 จะทำให้ความถี่ที่ได้จากออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนไปเล็กน้อย แต่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากคริสตัลออสซิลเลเตอร์จะมีความเที่ยงตรงสูง แต่อาจมีความผิดพลาดเล็กน้อย เนื่องจากผลของอุณหภูมิแวดล้อม (คริสตัลจะให้ความถี่ผิดพลาด ± 0.003 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ถ้าความถี่ที่ได้ผิดพลาดก็ให้ปรับความถี่โดยปรับค่าของ C2 จนได้ความถี่ออกเป็น 1,000 MHz

2. การปรับแต่งวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ ให้ต่อวงจรส่วนนี้เข้ากับดิน ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณเข้าเป็นศูนย์จริง ๆ ต่อสัญญาณออกเข้ากับเครื่องนับ ปรับค่า R81 จนเครื่องนับอ่านค่าได้ 1 Hz แล้วปลดจุดนำสัญญาณเข้าออกจากดิน ปรับค่า R75 จนกระทั่งเครื่องนับอ่านได้ 1 Hz อีก จากนั้นให้ต่ออินพุตเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 2.70 V (ได้จากแบตเตอรี่ชนิดปรอท ขนาด 1.35 โวลต์ 2 ก้อน ต่ออนุกรมกัน) ให้ทำการปรับค่า R75 ใหม่ จนเครื่องนับอ่านค่าได้ 2.700 ซึ่งแสดงว่าศักย์ไฟฟ้าเข้าเป็น 2.7 V

3. การปรับแต่งวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ให้ปลดแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า 2.7 V ออก ต่อเอาทพุทของวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง เข้ากับวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ แล้วปรับค่า R92 และ R93 จนเครื่องนับอ่านได้ 3009

4. การปรับแต่งวงจรวัดความต้านทาน ในการปรับแต่งวงจรไฟฟ้า ส่วนนี้ จำเป็นต้องหาความต้านทานที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย ๆ คือ 0.1 เปอร์เซ็นต์

แต่เนื่องจากไม่สามารถหาความต้านทานที่มีความแม่นยำสูงขนาดนี้ได้ในตลาดอิเล็กทรอนิกส์ของเมืองไทย จึงต้องใช้ความต้านทานที่มีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้องทำการวัดเลือกเอาค่าที่ถูกต้องที่สุดมาทำการปรับแต่งวงจรส่วนนี้ ค่าความต้านทานที่ต้องการมีห้าพิสัย คือ คาระหว่าง $200 - 400 \Omega$ $2 - 4 k\Omega$ $20 - 40 k\Omega$ $200 - 400 k\Omega$ และ $2 - 4 M\Omega$ อย่างน้อยค่าละหนึ่งตัว แล้วทำการปรับแต่งดังนี้

4.1 บิดสวิตช์เลือกพิสัยไปที่ $R \times 100$ ต่อความต้านทานที่มีค่าระหว่าง $200 - 400 \Omega$ เข้าที่ตำแหน่ง Rx ปรับค่า R111 จนเครื่องนับอ่านได้ตรงตามค่าความต้านทานนั้น

4.2 บิดสวิตช์เลือกพิสัยไปที่ $5V/R \times 1 K$ ต่อความต้านทานที่มีค่าระหว่าง $2 - 4 k\Omega$ เข้าที่ตำแหน่ง Rx ปรับค่า R110 จนเครื่องนับอ่านค่าได้ตรงตามค่าของความต้านทานนั้น

4.3 ทำการปรับแต่งสวิตช์การวัดขนาด $R \times 10 K$, Rx $100 K$ และ Rx $1 M$ ด้วยการนำค่าความต้านทานที่ทราบค่าระหว่าง $20 - 40 k\Omega$ $200 - 400 k\Omega$ และ $2 - 4 M\Omega$ ต่อเป็น Rx แล้วปรับค่าความต้านทาน R109, R108 และ R107 ตามลำดับ จนกระทั่งเครื่องนับอ่านค่าได้ตรงกับค่าความต้านทานนั้น ๆ

5. การปรับแต่งวงจรวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ วงจรส่วนนี้ที่ปรับแต่งอยู่สองตำแหน่ง คือ R115 สำหรับพิสัยการวัดที่มีหน่วยเป็นนาโนฟารัด (10^{-9} farad = nF) และหน่วยไมโครฟารัด (10^{-6} farad = μF) ในการปรับแต่งให้หาตัวเก็บประจุอ้างอิง สองขนาด คือ ค่า $5 nF$ หรือ $5,000 pF$ ต่อเป็น Cx ปรับค่า R115 จนเครื่องนับอ่านได้ตรงกับค่าของตัวเก็บประจุนั้น ในการปรับแต่งพิสัย μF ให้ใช้ตัวเก็บประจุอ้างอิงขนาดระหว่าง $10 - 500 \mu F$ ต่อเป็น Cx ปรับค่า R116 จนเครื่องนับอ่านได้ตรงตามค่าความจุนั้น ๆ

ผลการทดลอง

ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องมือโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่ถือว่าเป็นมาตรฐานตามลำดับต่อไปนี้ การทดลองวัดแต่ละเรื่องจะทำการวัดอย่างละห้าครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย สถิติที่ใช้เรียกว่า t-distribution และ F-distribution ซึ่งมีสูตรดังต่อไปนี้

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

เมื่อ	t	แทน	การกระจายแบบ t (t-distribution)
	\bar{X}_1	แทน	ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดที่ 1
	\bar{X}_2	แทน	ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดที่ 2
	s_1^2, s_2^2	แทน	ความแปรปรวนในการวัดวงกลมที่ 1 และ 2
	n_1, n_2	แทน	จำนวนครั้งของการวัดด้วยเครื่องมือชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

ค่าเฉลี่ย (\bar{X}) คำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n}$$

เมื่อ	X_1	แทน	ผลการวัดครั้งที่ 1
	n	แทน	จำนวนครั้งที่ทำการวัดทั้งหมด

การคำนวณหาความแปรปรวนของการวัดหาจากสูตรดังต่อไปนี้

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

เมื่อ	s_p^2	แทน	ความแปรปรวนแบบพูล (Pooled Variance)
	s_1^2, s_2^2	แทน	ความแปรปรวนในการวัดของเครื่องมือชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

n_1, n_2 แทน จำนวนครั้งของการวัดด้วยเครื่องมือชนิดที่ 1
และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

แทนด้วย S.D. คำนวณโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$S.D. = \sqrt{s_p^2}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีองค์ประกอบเดียว (ANOVA : oneway design) คำนวณโดยใช้แบบดังต่อไปนี้

Source of variation	SS	df	MS	F
Between	$n \sum_{j=1}^J (\bar{X}_j - \bar{X})^2$	J-1	SSb/(J-1)	$\frac{MSb}{MSw}$
Within	$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (X_{j1} - \bar{X}_j)^2$	N-J	SSw/(N-J)	
Total	$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (X_{j1} - \bar{X})^2$	N-1		

$$\text{เมื่อ } SSb = n \sum_{j=1}^J (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

$$SSw = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (\bar{X}_{j1} - \bar{X}_j)^2$$

$$SSt = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (X_{j1} - \bar{X})^2$$

n แทน จำนวนครั้งการวัดในแต่ละกลุ่ม

\bar{X}_j แทน ค่าเฉลี่ยการวัดในกลุ่มที่ j

X_{j1} แทน ผลการวัดในกลุ่มที่ j ค่าที่ 1

\bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยการวัดของทุก ๆ กลุ่ม

ตาราง 4 ผลการวัดความถี่ของเครื่องกิจิตัลมิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วย
ออสซิลโลสโคปแบบสองช่อง

ความถี่จากเครื่อง กำเนิดสัญญาณ (Hz)	ความถี่วัดด้วย ออสซิลโลสโคป	การวัดด้วยกิจิตัลมิเตอร์			t 0
		\bar{X}	S	S ²	
50	50	50	1.0714	1.1479	0.0000
100	100	99	1.1781	1.3879	1.8980
500	500	498	3.1164	9.7119	0.6968
1,000	1,000	999	2.7116	7.3529	0.8246
10 K	10 K	10.01	0.0999	0.0099	0.2238
20 K	20 K	19.99	0.1366	0.0186	0.1636
50 K	50 K	50.58	1.5510	2.4057	0.8341
100 K	100 K	100.37	1.2914	1.6679	0.6406
1 M	1 M	0.99	0.1462	0.0213	0.1529
10 M	10 M	เหนือพิสัยการวัดของออสซิลโลสโคป			
20 M	20 M				
100 M	100 M				

$$t(8, .05) = 2.506$$

จากตาราง 4 จะพบว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดในแต่ละค่ามีความ
ใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ
ทางสถิติ ทุก ๆ ค่าที่วัดได้อยู่ในขอบเขตของความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$

ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ความถ่วงน้ำหนักของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เปรียบเทียบกับ
กับการวัดด้วยวงจรบริจจ์ เครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE เครื่องวิเคราะห์ทรานซิสเตอร์
มัลติมิเตอร์โมเดล LV-77

ค่าความ ถ่วงน้ำหนัก (โอห์ม)	บริจจ์		Sanwa		Elec- tronic		ดิจิทัล มัลติมิเตอร์		t_{BD}
	\bar{X}_B	s^2	\bar{X}_S	s^2	\bar{X}_E	s^2	\bar{X}_D	s^2	
330	321.40	1.1219	330	-	330	-	322.5	5.0829	0.8675
390	396.70	3.0919	390	-	390	-	392.8	2.6349	3.2602*
4.7K	4.83	0.0012	4.7K	-	4.7K	-	4.8K	0.2038	0.0234
20 K	20.08	0.0015	20 K	-	20 K	-	19.6K	0.2829	0.8021
27 K	27.50	0.2269	27 K	-	27 K	-	27.6K	0.2599	0.8342
220 K	220.80	5.1569	220 K	-	220 K	-	221.9K	2.8569	0.7771
330 K	330.30	0.9428	330 K	-	330 K	-	330.7K	2.3697	0.4396
3.3M	3.32	0.0144	-	-	-	-	3.31	0.0011	0.0351

$$t(8, 0.05) = 2.306$$

จากตาราง 5 พบว่า ค่าที่ทำการวัดด้วยวงจรบริจจ์ และวงจรดิจิทัลมัลติมิเตอร์
ค่าที่วัดได้จากเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์และวงจรบริจจ์ ไม่ปรากฏว่า มีความแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และทุกค่าที่วัดได้อยู่ในขอบเขตของความผิดพลาด $\pm 5\%$

ตาราง 6 ผลการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าของเครื่องกิจิตัลมัลติมิเตอร์
เปรียบเทียบกับการวัดด้วยวงจรมัลติมิเตอร์

ค่าความจุที่ ทดสอบ (μF)	วงจรมัลติมิเตอร์		กิจิตัลมัลติมิเตอร์	
	\bar{X}_B	S^2	\bar{X}_D	S^2
.0025	0.0025	7.69×10^{-8}	.0026	0.0000
.0047	0.0047	1.79×10^{-8}	.0045	0.0000
.0200	0.0200	1.49×10^{-6}	.0206	0.0000
.0300	0.0300	2.29×10^{-6}	.0269	0.0000
.0390	0.0390	5.49×10^{-4}	.0400	0.0000
.0470	0.0470	2.61×10^{-3}	.0422	0.0000
.2000	0.2000	0.0229	.1699	0.0000
1.0000	1.0000	0.1819	.9600	0.0000
2.2000	2.2000	0.0919	2.1960	0.0000
10.0000	10.0000	0.1469	9.6800	0.0000

จากตาราง 6 จะพบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวงจรมัลติมิเตอร์ และ
มัลติมิเตอร์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าต่างๆที่ได้
มีค่าอยู่ในขอบเขตของค่าผิดพลาด $\pm 10\%$ ค่าความจุที่มากกว่า $50 \mu\text{F}$ เครื่อง
กิจิตัลมัลติมิเตอร์ไม่สามารถวัดได้

ตาราง 7 ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์
 เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่อง
 อีเลคโทรนิคมัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77

Voltage Source	Source of Variation	SS	df	MS	F
1.5 V	Between	0.0282	2	0.0141	56.0000*
	Within	0.0030	12	2.5×10^{-4}	
	Total	0.0310	14		
5 V	Between	1.0174	2	0.5087	89.2400*
	Within	0.0684	12	5.7×10^{-3}	
	Total	1.0858	14		
9 V	Between	0.1548	2	0.0774	13.1186*
	Within	0.0118	12	5.9×10^{-3}	
	Total	0.1666	14		
12 V	Between	0.6378	2	0.3189	1.1525
	Within	3.3206	12	0.2767	
	Total	3.9584	14		
15 V	Between	0.8300	2	0.4150	32.1705*
	Within	0.1557	12	0.0129	
	Total	0.9857	14		

ตาราง 7 (ต่อ)

Voltage Source	Source of Variation	SS	df	MS	F
50 V	Between	1.0940	2	0.5470	2.1062
	Within	3.1170	12	0.2597	
	Total	4.2110	14		
100 V	Between	1.6400	2	0.8200	17.9030*
	Within	0.5500	12	0.0458	
	Total	2.1900	14		
500 V	Between	14.6000	2	7.3000	15.0000*
	Within	6.0000	12	0.5000	
	Total	20.6000	14		

$$F(2, 12) 0.05 = 3.88$$

*มีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตาราง 7 พบว่า ผลการวัดความตึงศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องมือทั้งสามชนิดนี้ มีอยู่เพียงบางพิสัยการวัดเท่านั้นที่ให้ผลการวัดที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ การวัดศักย์ไฟฟ้า 12 และ 50 V ตามลำดับ ส่วนค่าอื่นที่ทำการทดสอบปรากฏว่า ค่าที่ได้จากแต่ละเครื่องมือ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อยหนึ่งคู่ ค่าเฉลี่ยของการวัดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องมือดังกล่าว เป็นดังตาราง 8

ตาราง 8 ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์
เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่อง
อิเล็กทรอนิกส์ มัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77

แหล่งความ ต่างศักย์	Sanwa		Electronic		ดิจิทัลมัลติมิเตอร์		F
	\bar{X}	s^2	\bar{X}	s^2	\bar{X}	s^2	
1.5	1.4	0.0000	1.4	0.0000	1.49	.0007	56.0000*
5	4.5	0.0049	5.0	0.0119	5.02	.0001	89.2400*
9	8.7	0.0100	8.9	0.0299	8.87	.0046	13.1186*
12	11.4	0.7369	11.9	0.0519	11.6	.0111	1.1525
15	14.3	0.0029	14.8	0.0179	14.8	.0179	32.1705*
50	48.7	0.0279	49.1	0.1919	49.3	.3098	2.1062
100	98.4	0.0319	98.3	0.0279	99.1	.0769	17.9030*
500	493.0	1.0000	493.6	0.2999	495.3	.1569	15.0000*

$$F(2,12) .05 = 3.88$$

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตาราง 8 พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ใกล้เคียง
กับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยอิเล็กทรอนิกส์มัลติมิเตอร์ เป็นที่น่าสังเกตว่าผลการวัดของ
แต่ละเครื่องมือ มีความแปรปรวนในการวัดน้อย

ตาราง 9 ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องจักรตัดไม้คีมเตอร์
เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่อง
อิลেকโทรนิคไม้คีมเตอร์ โมเดล LV-71

Voltage Source	Source of Variation	SS	df	MS	F
4.5 V	Between	0.0040	2	0.0020	0.2500
	Within	0.0960	12	0.0008	
	Total	0.1000	14		
5 V	Between	0.0214	2	0.0110	0.3089
	Within	0.4280	12	0.0356	
	Total	0.4494	14		
6 V	Between	0.1054	2	0.0527	4.2845*
	Within	0.1480	12	0.0123	
	Total	0.2534	14		
9 V	Between	0.0094	2	0.0047	0.0993
	Within	0.5680	12	0.0473	
	Total	0.5774	14		
12 V	Between	0.0414	2	0.0207	0.4641
	Within	0.5360	12	0.0446	
	Total	0.5774	14		

ตาราง 9 (ต่อ)

Voltage Source	Source of Variation	SS	df	MS	F
18 V	Between	0.0054	2	0.0027	0.0626
	Within	0.5172	12	0.0431	
	Total	0.5226	14		
24 V	Between	0.0174	2	0.0087	0.5800
	Within	0.1800	12	0.0150	
	Total	0.1974	14		
50 V	Between	0.4900	2	0.2450	0.7089
	Within	0.6380	12	0.3456	
	Total	1.1280	14		
110 V	Between	0.9400	2	0.4700	0.7286
	Within	7.7400	12	0.6450	
	Total	8.6800	14		
220 V	Between	0.4000	2	0.2000	0.2500
	Within	9.6000	12	0.8000	
	Total	10.0000	14		
350 V	Between	3.8000	2	1.9000	0.2159
	Within	105.6000	12	8.8000	
	Total	109.4000	14		

ตาราง 9 (ต่อ)

Voltage Source	Source of Variation	SS	df	MS	F
450 V	Between	0.6000	2	0.3000	0.0737
	Within	48.8000	12	4.0666	
	Total	49.4000	14		

$$F(2, 12) .05 = 3.88$$

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตาราง 9 พบว่า ผลการวัดความต้านศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องมือสามชนิดดังกล่าว จะให้ผลการวัดที่มีค่าแตกต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 6 V. ปรากฏว่า มีเครื่องมืออยู่อย่างน้อยหนึ่งคู่อุปกรณ์ที่ให้ผลการวัดที่แตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยผลการวัดศักย์ไฟฟ้า กระแสสลับของเครื่องมือดังกล่าวเป็นดังตาราง 10

ตาราง 10 ผลการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์
เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์
โทรนิคส์ มัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77

Voltage Source	Sanwa 380-CE		Electronic LV-77		Digital multimeter		F
	\bar{X}	s^2	\bar{X}	s^2	\bar{X}	s^2	
4.5 V	4.5	0.0069	4.5	0.0100	4.48	0.0069	0.2500
5 V	4.9	0.0519	5.0	0.0429	4.98	0.0119	0.3089
6 V	5.8	0.1699	6.0	0.0119	5.94	0.0079	4.2845*
9 V	9.0	0.0519	8.9	0.0619	8.96	0.0279	0.0993
12 V	12.0	0.0919	12.1	0.0400	23.98	0.0019	0.4641
18 V	18.0	0.0599	18.0	0.0400	18.00	0.0279	0.0626
24 V	23.9	0.0079	23.9	0.0349	23.98	0.0019	0.5800
50 V	49.5	0.4319	49.3	0.3629	49.78	0.2419	0.7089
110 V	109.2	1.1999	109.6	0.2999	109.80	0.1999	0.7286
220 V	219.2	1.1999	219.6	0.2999	219.40	0.7999	0.2500
350 V	350.0	23.9999	348.8	1.1999	349.20	1.1999	0.2159
450 V	498.8	9.1999	449.4	1.7999	449.80	1.1999	0.0737

$$F(2, 12) 0.05 = 3.78$$

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตาราง 10 จะพบว่า ค่าเฉลี่ยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่ได้จากเครื่องมือแต่ละชนิดก็กล่าว จะมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวัดด้วยเครื่อง
อิเล็กทรอนิกส์โทรนิคส์ มัลติมิเตอร์ โมเดล LV-77 และเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ มีความ
แปรปรวนในการวัดน้อยกว่าเครื่อง Sanwa โมเดล 380-CE

บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

บทสรุป

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้าง เครื่องนับและเครื่อง
คิวิตัลมัลติมิเตอร์ โดยให้เครื่องมือนี้สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าต่อไปนี้ได้ คือ

1. ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ
2. ความต้านทาน
3. ความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า
4. ความถี่ของคลื่นสัญญาณและคาบเวลาของความถี่

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้ากำหนดให้ใช้ชิ้นส่วนของวงจร เป็นสารกึ่งตัวนำ
และวงจรสำเร็จรูป (Integrated circuits) เป็นสำคัญ

วิธีดำเนินการศึกษาค้นคว้า

ได้ออกแบบและสร้าง เครื่องนับและเครื่องคิวิตัลมัลติมิเตอร์ และแบ่งงาน
ออกเป็นลำดับขั้นดังนี้

1. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของวงจรสำเร็จรูปตระกูลที่ทีแอล
จาพวกเกต (Gate) ต่าง ๆ ได้แก่ AND, OR, INVERTER, NAND และ
NOR ฟลิปฟลอป ไคเก้ เจเค ฟลิปฟลอป และ คีเลย์ ฟลิปฟลอป วงจรนับ ไคเก้
วงจรมัลติ และวงจรถอครหัส การศึกษาเบื้องต้นเหล่านี้จะนำไปออกแบบวงจรมัลติ
พร้อมแผนแสดงผล

2. ทำการศึกษาวงจรออปแอมป์ ซึ่งเป็นวงจรสำเร็จรูปแบบเชิงเส้นตรง
เพื่อนำไปออกแบบวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ วงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็น
ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรเปรียบเทียบ

3. ศึกษาวงจรทรานซิสเตอร์ เพื่อการออกแบบวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ เพื่อใช้เป็นวงจรวัดความต้านทาน

4. ทำการศึกษาวงจรเกี่ยวกับเวลา เพื่อการออกแบบวงจรที่สามารถ ออสซิลเลท โดยขึ้นกับค่าของตัวเก็บประจุภายนอก สำหรับใช้เป็นวงจรวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ

5. ออกแบบวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรกกูเลท ขนาด 5 v., +15 v., - 15 v. และ +20 v. เพื่อจ่ายกำลังให้แก่วงจรส่วนต่าง ๆ

6. ตรวจสอบการทำงานและปรับปรุงแก้ไขวงจร บนแผงทดลองแบบเสียบอุปกรณ์ เมื่อเห็นว่าวงจรทำงานได้ดีแล้ว จึงนำไปประกอบลงบนแผงวงจรพิมพ์

7. ทำการออกแบบเรือนเครื่องและสร้างเรือนเครื่องควยวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนสภาพแวดล้อมได้พอสมควร

ผลของการศึกษาก่อนหน้า

1. ไขชิ้นส่วนวงจรที่เป็นสารกึ่งตัวนำและวงจรสำเร็จรูป
2. มีสมรรถภาพการทำงานดังนี้
 - 2.1 สามารถนับความถี่จาก 20 Hz - 100 MHz ความผิดพลาด $\pm 10 \%$
 - 2.2 วัดความต้านทานศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับได้หลายพิสัย คือ 5 v., 50 v., (ความผิดพลาด $\pm 5\%$) 500 v. และ 1,000 v. ความผิดพลาด $\pm 10 \%$
 - 2.3 วัดความต้านทานได้หลายพิสัย คือ x100, x1k, x10k, x100k, และ x1M แต่ละพิสัยมีความผิดพลาด $\pm 10 \%$
 - 2.4 วัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ ได้สามพิสัยคือ 0 - 1 μF , 1 μF - 10 μF , ความผิดพลาด $\pm 5 \%$ และ 10 μF - 50 μF ความผิดพลาด $\pm 10 \%$
 - 2.5 สามารถใช้ไคกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220v. ความถี่ 50 Hz

การอภิปรายผล

ในการออกแบบและสร้างเครื่องนับและเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ประสบปัญหาและมีประสบการณ์ดังนี้คือ

1. วงจรสำเร็จรูปเชิงเส้นตรง (คือวงจร $\mu A 741$ หรือมีรหัสเรียกชื่อเป็นอย่างอื่น เช่น SN 72741 เป็นต้น) ถึงแม้จะผลิตจากโรงงานและในช่วงเวลาเดียวกัน แต่ก็มีความแตกต่าง (Characteristics) จริง ๆ แตกต่างกันไปทุกวงจร โดยเฉพาะศักย์ออฟเซต (Offset voltage) ของแต่ละวงจร จะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการปรับศักย์ออฟเซตจึงต้องทำควยความระมัดระวังและทำซ้ำ ๆ

2. ความคลาดเคลื่อนของเครื่องนับ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสองประการ คือ

2.1 ความแม่นยำในการกำหนดฐานเวลา ในด้านเกี่ยวกับฐานเวลา จะจะเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่จะกำหนดความถูกต้องของการวัด เพราะเวลาที่ยอมให้สัญญาณผ่านเข้านับและเวลาที่ใช้รีเซ็ต ผิดพลาดจากความเป็นจริงแล้ว การแสดงผลจะมีความผิดพลาดควย

2.2 ความคงที่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ถ้าหากมีเสถียรภาพดีมาก คือศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไม่ลดลงเมื่อถูกดึงกระแสมาก ๆ การทำงานของวงจรจะผิดพลาดน้อยลง เนื่องจากรปสัญญาณที่ใดแต่ละตอนจะมีความเพี้ยนน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใดจากวงจรฟรีรันนิ่งออสซิลเลเตอร์ จะมีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของสภาวะแวดล้อม การใช้ฐานเวลาจากส่วนนี้จะทำให้ผลการวัดผิดพลาดไปประมาณ 5 - 20 % เมื่อเทียบผลการวัดโดยใช้ฐานเวลาจากวงจรคริสตัลออสซิลเลเตอร์

3. การวัดศักย์ไฟฟ้าและความต้านทาน จะถูกต้องตรงกับค่าที่จะวัด ขึ้นอยู่กับวงจรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเป็นความถี่ ซึ่งจะตองสามารถผลิตความถี่เข้าสู่เครื่องนับได้อย่างมีประสิทธิภาพตรงต่อศักย์ไฟฟ้าเข้าจริง ๆ (1 V. ต่อ 1,000 Hz) และความถี่ออกจากวงจรจะต้องเปลี่ยนแปลงไป 1Hz เมื่อศักย์ไฟฟ้าเข้าเปลี่ยนแปลง 1 V. และวงจรส่วนนี้ตองสามารถผลิตความถี่ได้เมื่อศักย์ไฟฟ้าเข้าน้อย ๆ เป็น มิลลิโวลต์

4. เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญ เป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ (Active components) การอุ่นเครื่องโดยการเปิดสวิทช์ให้กระแสไฟฟ้าผ่านวงจรสักระยะหนึ่ง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

5. การต่อตัวเก็บประจุค่าน้อย ๆ (หน่วย μmf) ระหว่างแหล่งจ่ายกำลังกับดิน ครอมระหว่างวงจรสำเร็จรูปประเภทที่ที่แอด ที่ต่ออนุกรมกันมากกว่าสี่อันคืบ จะทำให้สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนระหว่างอันคืบได้ดีกว่าการใช้ตัวเก็บประจุที่มีความมากพอไว้ที่จุดหัวท้ายเพียงแห่งใดแห่งหนึ่ง

6. การต่อวงจรจากวงจรถอดรหัสไปยังภาคแสดงผล ไม่ควรให้สายยาวมากกว่าสี่นิ้ว เพราะอาจทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณและการสูญเสียกำลังงานภายในสายโคจาย

7. เนื่องจากวงจรสำเร็จรูป LM 555 มีความไวต่อสัญญาณรบกวนสูงมาก การต่ออุปกรณ์ภายนอกและการเดินสายต่าง ๆ ควรให้อยู่ใกล้กับวงจร LM 555 มากที่สุด

8. ถ้ามอแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรไม่ได้ออกแบบให้มีฝาเหล็กครอบหุ้ม (Shield) ควรใช้แผ่นเหล็กกันระหว่างตัวหม้อแปลงไฟฟ้กับวงจรภาคอื่น ๆ เพื่อลดสนามแม่เหล็กที่จะไปรบกวนวงจรอื่นในนอยลง

ขอเสนอแนะ

เครื่องนับและเครื่องคิิจิตัลมัลติมิเตอร์ อาจจะมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่านี้ ถ้าหากได้รับการปรับปรุงส่วนประกอบบางประการดังต่อไปนี้

1. การเลือกอุปกรณ์ภายนอกวงจรสำเร็จรูป โดยเฉพาะความต้านทานที่มีความผิดพลาดน้อยเป็นส่วนประกอบของบางวงจร โดยเฉพาะวงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นวงจรในการกำหนดพิสัยการวัด ถ้าสามารถกระทำได้ ควรเลือกความต้านทานที่ผิดพลาด $\pm 1\%$ หรือ $\pm 0.1\%$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วความต้านทานที่มีความแม่นยำสูงมักจะหาไม่ค่อยได้ในตลาดประเทศไทย ในวงจรที่สร้างขึ้นนี้ใช้ความต้านทานที่มีค่าผิดพลาด $\pm 5\%$ ซึ่งพอหาซื้อได้ในตลาดทั่วไป

2. การเพิ่มค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรวัดความต้านทานและวัดศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยการใช้อุปกรณ์แอกทิฟประเภท PNP มาประกอบเป็นวงจรเชื่อมต่อ (Input follower) ระหว่างวงจรวัดกับวงจรทนกำเนิดสัญญาณ จะช่วยลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากต้นกำเนิดสัญญาณเมื่อเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำได้

3. การควบคุมอุณหภูมิของวงจรสำเร็จรูปโดยเฉพาะวงจร $\mu A 741$ ให้คงที่จะทำให้เสถียรภาพการทำงานของวงจรดีขึ้น

4. ควรสร้างเครื่องนับความถี่ให้เป็นสัดส่วนไวต่างหากจากวงจรวัดส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วงจรสร้างฐานเวลาความถี่สูงในภาคเครื่องนับจะไปรบกวนการทำงานของวงจรอื่น ๆ ไปด้วย

5. ถ้าต้องการเครื่องนับหรือเครื่องวัดที่สามารถแสดงผลเป็นตัวเลขได้มากกว่าหกหลัก ควรใช้วงจรนับประเภทอื่น ที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าวงจรนี้ นอกจากนี้ยังสามารถลดทอนจำนวนชิ้นส่วนลงได้อีกมาก ความยุ่งยากในการประกอบและปรับแต่งวงจรจะลดน้อยลง เป็นผลที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องมือนี้ยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ชิตชัย สุทธาสวิน และ ประจักษ์ กสิศิลป์ ทรานซิสเตอร์ นิยมวิทยา 2517,
353 หน้า

มัญญ แก้วราตรี การออกแบบและสร้างเครื่องสัญญาณแกนเวลาเชิงเส้นตรงสำหรับ
เครื่องบันทึกสัญญาณเอก-วาย/ที ปริญญาโท กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา
ประสานมิตร 2517, 57 หน้า อักสำเนา

ยี่น ภาววรรณ เทคนิคการประยุกต์และใช้งานไอซีทีทีแอล ซีไอเคยูเคชั่น 2521,
282 หน้า

สุชาย ธนเสถียร หลักการออกแบบวงจรตรรก ซีไอเคยูเคชั่น 2519, 238 หน้า
อนันต์ ศรีโสภา สถิติเบื้องต้น ไทยวัฒนาพานิช 2521, 396 หน้า

Alley, Charles L. and Kenneth W. Atwood. Electronic Engineering. Singapore, Toppan Company, Ltd., 1973. 838 p.

Dage, David H. "Autoranging Digital Capacitance Meter," Popular Electronics. 48 - 54, February, 1978.

Greame, Jerald G., Gene E. Tobey and Lawrence P. Hulsman. Operational Amplifier : Design and Application. Tokyo, McGraw-Hill, Kogokusha, Ltd., 1971. 473 p.

Green, Bill. "A 40 MHz Frequency Counter," Popular Electronics. 64 - 66, June, 1977.

Green, W.L. "Build an Auto Polarity, Auto Zero Digital Multimeter for Under \$100," Popular Electronics. 33 - 37, December, 1974.

Halliday, David and Robert Resnick. Physics. New York, Wiley, 1966. 1025 p.

Hallmark, Clayton L. "Multimeters for Electronics Part 2 : Digital Multimeter," Popular Electronics. 31 - 34, 37 - 39, February, 1977.

Houpis, Constantine H. and Jerzy Lubelfeld. Pulse Circuits. Revised Edition, New York, Simon and Schuster, 1970. 212 p.

Huffnagle, Normal P. "Digital Low Cost 1 Hz to 1 MHz Frequency Counter," Popular Electronics. 48 - 49, August, 1976.

- Kostopoulos, George K. Digital Engineering. New York, John Wiley and Sons, 1975. 508 p.
- Malmstadt, Howard V., Christie G. Enke and Stanley R. Crough. Electronic Measurements for Scientists. New York, Benjamin, Inc., 1974. 906 p.
- Malmstadt, H.V. and C.G. Enke. Digital Electronics for Scientist. New York, Benjamin, Inc., 1969. 545 p.
- Marcus, Abraham and John D. Lenk. Measurement for Techniciens. New York, McGraw-Hill, Inc., 1971. 370 p.
- Morris, Robert L. and John R. Miller. Designing with TTL Integrated Circuits. Tokyo, McGraw-Hill Kogorusha, Ltd., 1971. 318 p.
- Olive, Bernard M. and John M. Cage. Electronic Measurement and Instrumentation. New York, McGraw-Hill, Inc., 1971. 729 p.
- Siebert, Jame E. "Digital Multiplexers Reduce Chip Count in Logic Design," Electronics. 120 - 121, April, 1977.
- Texas Instruments Incorporated. The TTL Data Book for Design Engineers. Texas, Texas Instrument Incorporated, 1973. 640 p.
- Wait, John V., Lawrance P. Hulsman and Granino A. Korn. Introduction to Operational Amplifier : Theory and Application. New York, McGraw-Hill, Inc., 1975. 396 p.
- Wedlock, John. Electronic Instrument. New York, McGraw-Hill, Inc., 1969. 213 p.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณเกี่ยวกับวงจรภาคจ่ายกำลังไฟฟ้า

การคำนวณเกี่ยวกับวงจรภาคจ่ายกำลังไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า

1. การหาค่ากักเก็บไฟฟ้าออกของซกทิตยภูมิ

สูตร $V_m = V_{DC} + \frac{I_{DC}}{4fC}$ (Millman and Halkias.

1972 : 133)

$$V_{rms} = V_m / \sqrt{2}$$

เมื่อ V_{DC} แทน ค่ายไฟฟ้าตรงก่อนเข้าวงจรเร็กกูเลเตอร์ ในที่นี้
ต้องการให้วงจรเร็กกูเลเตอร์มีเสถียรภาพดีมาก
จึงกำหนด V_{DC} ไว้เป็น 15 V และ 21.2 V
สำหรับกระแสตรง +5 V ก็กับกลุ่มกระแสตรง
 ± 15 V และ 20 V ตามลำดับ

I_{DC} แทน กระแสการจ่ายให้แก่ภาระซึ่งจะต้องกำหนดไว้ให้
สูงกว่าการจ่ายจริง กำหนดให้เป็น 2 A และ
300 mA ตามลำดับ

f แทน ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ประมาณ 50 รอบ
ต่อวินาที

C แทน ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวกรอง
กำหนดใหม่ค่า 4,000 μF และ 2,000 μF
ตามลำดับ

V_m แทน ค่ายสูงสุดของค่ายไฟฟ้าออกทางซกทิตยภูมิ

V_{rms} แทน ค่ายไฟฟ้าคาร์รากำลังสองเฉลี่ย

การคำนวณแต่ละขดเป็นตามลำดับดังนี้

1.1 สำหรับขดที่จะจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ + 5 V

$$V_m = 15 + \frac{2}{4 \times 50 \times 4,000 \times 15^{-6}}$$

$$= 17.5 \text{ V}$$

และ $V_{rms} = 12 \text{ V}$ (1)...

1.2 สำหรับขดจ่ายศักย์ไฟฟ้า $\pm 15 \text{ V}$ และ 120 V กำหนดให้เป็นขดเดียวกัน แต่จะให้แอมแปร์จรรักษาระดับเป็นสามวงจร

$$V_m = 21.2 + \frac{300 \times 10^{-3}}{4 \times 50 \times 2,000 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 23 \text{ V}$$

และ $V_{rms} = 23/2 \approx 17$

2. การคำนวณหาค่ากำลังการจ่ายของขดทุติยภูมิ

กำลังไฟฟ้าที่ต่อวงจรในแต่ละขดคำนวณได้ดังต่อไปนี้

2.1 ขดจ่ายศักย์ไฟฟ้า + 5 V

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ต่อวงจร} \quad 5 \text{ V} \times 1.5 \text{ A} = 7.5 \text{ W}$$

$$\text{กำลังสูญเสียในเรกติไฟเออร์ไดโอด} \quad 2 \text{ V} \times 1.5 \text{ A} = 3 \text{ W}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียในเร็กกูเลเตอร์} \quad 10 \text{ V} \times 1.5 \text{ A} = 15 \text{ W}$$

$$\text{รวมกำลังไฟฟ้า} \quad 25.5 \text{ W}$$

2.2 ขดจ่ายศักย์ไฟฟ้า $\pm 15 \text{ V}$, + 20 V

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ต่อวงจร} \quad 2 \times 15 \text{ V} \times 150 \text{ mA} = 1.5 \text{ W}$$

$$20 \text{ V} \times 20 \text{ mA} = 0.4 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในเรกติไฟเออร์ไดโอด

$$2 \text{ V} \times 170 \text{ mA} = 0.34 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในเรกติฟายเอเตอร์

$$2 \times 10 \text{ V} \times 150 \text{ mA} = 3 \text{ W}$$

$$5 \text{ V} \times 20 \text{ mA} = 0.1 \text{ W}$$

รวมกำลังไฟฟ้า

$$5.34 \text{ W}$$

รวมกำลังไฟฟ้าที่ถ่วงการ 30.84 W

3. การหากระแสเข้าชดปรุณภูมิ

กำหนดประสิทธิภาพหม้อแปลง 0.75 (= 75%)

$$\therefore \text{กำลังไฟฟ้ชดปรุณภูมิ} = \frac{W_s}{\eta} = \frac{30.84}{0.75} = 35.45 \text{ W}$$

$$\text{กระแสเข้าชดปรุณภูมิ} = \frac{35.26}{220} \approx 160 \text{ mA}$$

4. การหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก} = \frac{\sqrt{W_s}}{5.5} = \frac{\sqrt{30.84}}{5.5} = 1.004 \text{ Sq.in.}$$

เลือกใช้แกนขนาด 28 X 28 mm ซึ่งให้พื้นที่หน้าตัดใกล้เคียง

5. การหาจำนวนรอบของขลวด

$$5.1 \text{ จำนวนรอบปรุณภูมิ (NP)} = \frac{E_p \times 10^8}{4fBA} \quad \text{รอบ}$$

เมื่อ E_p แทน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าหม้อแปลง = 220 V

f แทน ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ = 50 รอบ/วินาที

B แทน ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งตารางนิ้ว
= 84,000 เกาส์

A แทน พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$N_p = \frac{220 \times 10^8}{4 \times 50 \times 84,000 \times 1.00}$$

$$= 1,310 \text{ รอบ}$$

5.2 จำนวนรอบขดหตุยภูมิ (NS)

$$N(s) = \frac{E_s}{E_p} \cdot \frac{N_p}{\sqrt{n}}$$

เมื่อ E_s แทน ศักย์ไฟฟ้าสลับออกที่ต้องการ

$$N(s) \quad 9 \text{ V} = 62 \text{ รอบ}$$

$$N(s) \quad 12 \text{ V} = 83 \text{ รอบ}$$

$$N(s) \quad 17 \text{ V} = 118 \text{ รอบ}$$

6. การหาขนาดของเส้นลวด

ลวดที่ใช้ในการพันหม้อแปลงต้องใช้ลวดอาบนํ้ายาคังนี้

6.1 ก้านขดปฐมภูมิ กระแสเข้า 120 mA

กระแสเข้า 1A ต่อพื้นที่หน้าตัด 600 Cir.mil.

120 mA ต่อพื้นที่หน้าตัด $600 \times 120 = 72 \text{ Cir.mil.}$

เลือกใช้ลวด นัมเบอร์ 35 ซึ่งให้กระแสนํ้าได้ใกล้เคียงกัน

6.2 ขดหตุยภูมิ มีสามขด คํานวณโดยใช้หลักเดียวกัน

ขด 12 V ใช้ลวดนัมเบอร์ 19

ขด 17 V ใช้ลวดนัมเบอร์ 28

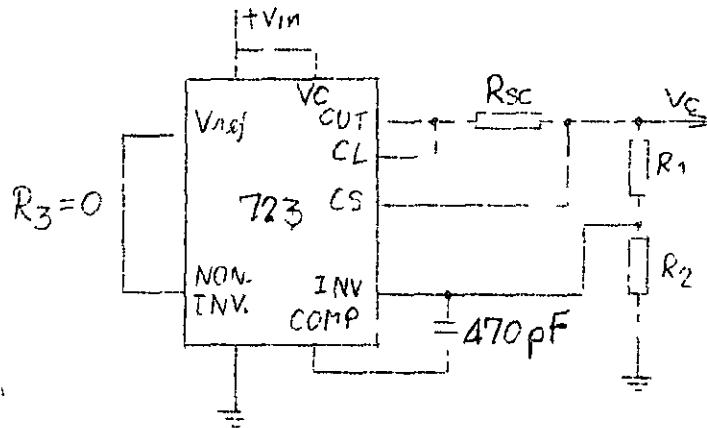
ขด 9 V ใช้ลวดนัมเบอร์ 21

หมายเหตุ การประมาณค่าให้รับค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าที่คํานวณได้ เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์ต่าง ๆ

การคํานวณหาส่วนประกอบวงจร เร็กกูเลเตอร์

วงจรเร็กกูเลเตอร์ที่ใช้เป็น วงจรตัวเร็กกูรูป นัมเบอร์ 723

หรือ เบอร์อื่นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าในกลุ่มเดียวกัน วงจรที่ใช้ เป็นคังภาพประกอบ 51



ภาพประกอบ 51 วงจรเรีกุเลเตอร์ ± 15 V และ $+ 20$ V

สมการที่จะกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บริษัทผู้ผลิตวงจรสำเร็จรูปเบอร์ 723 ให้ไว้ คือ

$$I(\text{limit}) = \frac{0.65}{R_{sc}} \quad (1)$$

$$V_o = V_{ref} \times \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2)$$

$$\text{และ } R_3 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

ในที่นี้ R_3 คิดค่าเป็นศูนย์เสียได้ การคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. วงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า ± 15 V

ถ้า R_{sc} , R_1 และ R_2 จะเท่ากัน แต่การป้อน V_{in} และการต่อลงดิน จะแตกต่างกัน ค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_{sc} &= \frac{0.65 \text{ V}}{I \text{ lim.}} \\ &= \frac{0.65}{.150} = 4.3 \text{ โห้ม เกือบได้ } 4.7 \text{ " โห้ม} \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า V_{ref} แต่ละวงจรจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.15 V ในการใช้งานจริง ๆ จะต้องทำการวัดค่า V_{ref} ว่าเป็นเท่าใด แต่เพื่อความสะดวกจะออกแบบให้ปรับค่า V_o ได้บ้างเล็กน้อยด้วย การปรับค่าของ R_2 แทน

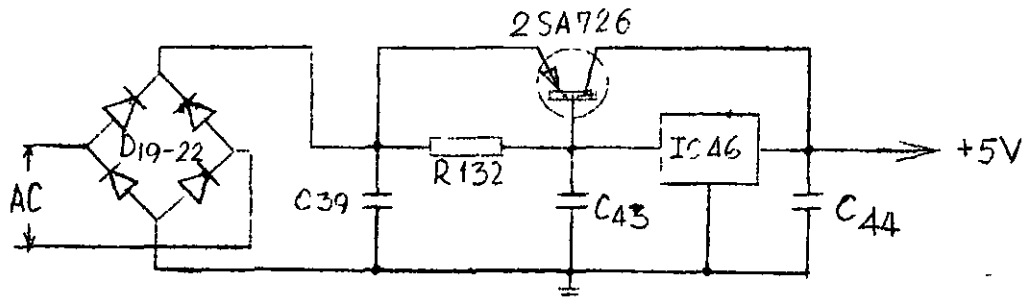
กำหนดค่า	R_1	=	5.6	กิโลโอห์ม
	R_2	=	5090	โอห์ม
เลือกใช้	R_2	=	4.7	กิโลโอห์ม + 500 โอห์ม

2. วงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า + 20 V

	R_{sc}	=	10	โอห์ม (กระแส 50 mA)
+ 20 V,	R_{sc}	=	.56	โอห์ม
กำหนดค่า	R_1	=	3.3	กิโลโอห์ม
ดังนั้น	R_2	=	1833	โอห์ม
เลือกใช้	R_2	=	1.5	กิโลโอห์ม + 500 โอห์ม

3. วงจรจ่ายศักย์ไฟฟ้า + 5 V

เนื่องจากมีวงจรสำเร็จรูปที่สามารถใช้เป็นวงจรเรกกูเลเตอร์ขนาด + 5 V ได้ จึงเลือกใช้วงจรสำเร็จรูปเบอร์ MC 7805 แต่เนื่องจากวงจรนี้จ่ายกระแสได้ไม่มากจึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง 2 SA 726 ต่อเป็นวงจรขยายกระแสจ่ายให้กับวงจรอีกครั้งหนึ่ง วงจรที่ได้ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 52 วงจรเรกกูเลเตอร์ + 5 V

ประเภทผนวก ข.

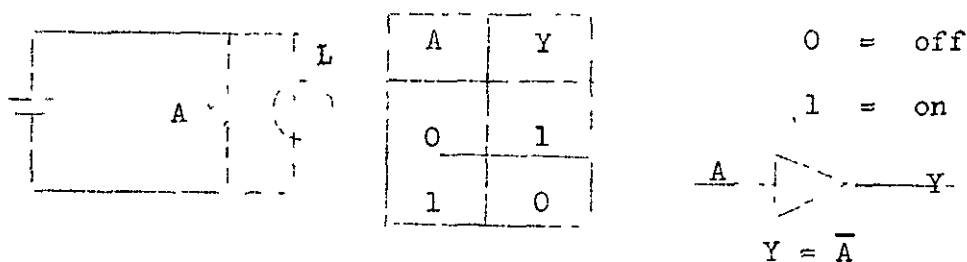
วงจรรรทก

วงจรรวม

วงจรรวม หมายถึง วงจรไฟฟ้าที่ทำงานด้วยสัญญาณระดับสองระดับ คือ "สูง" หรือ "1" และ "ต่ำ" หรือ "0" โดยปกติวงจรที่เป็นตรรกะวงจรรวม "สูง" จะแทนระดับสัญญาณไฟฟ้าตั้งแต่ 3 - 5 V

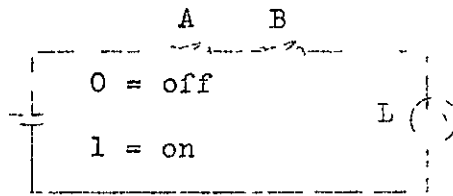
วงจรรวม หมายถึง วงจรไฟฟ้าที่ทำงานโดยอาศัยระดับสัญญาณเพียงสองระดับ ซึ่งเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับจำนวนในระบบฐานสอง (Binary system) สัญญาณระดับแรกเรียกว่า "0" ระดับที่สองเรียกว่า "1" สำหรับวงจรไฟฟ้าระดับสัญญาณ "0" จะหมายถึงสภาวะที่วงจรไม่ยอมให้สัญญาณผ่าน และระดับสัญญาณ "1" ก็หมายถึง สภาวะของวงจรที่ยอมให้สัญญาณผ่านวงจรไปได้ วงจรรวมพื้นฐานที่สำคัญคือ วงจร AND, OR, NOT ส่วนวงจรอื่น ๆ เกิดจากการผสมกันระหว่างวงจรพื้นฐาน วงจรรวมอาจจะมีสัญญาณขาเข้าได้ตั้งแต่หนึ่งสัญญาณเป็นต้นไป

วงจร NOT คือ วงจรรวมที่มีสัญญาณเข้าเพียงสัญญาณเดียว และจะได้สัญญาณออก มีสถานะตรรกะเป็นตรงกันข้ามกับสัญญาณเข้าเสมอ บางครั้งเราเรียกวงจรชนิดนี้ว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เปรียบเทียบวงจร NOT ได้กับวงจรไฟฟ้าคาบจร และสัญลักษณ์ ดังภาพประกอบ 53

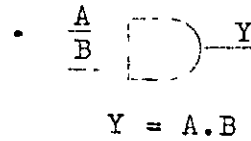


ภาพประกอบ 53 วงจรไฟฟ้า คาบจร และสัญลักษณ์ของวงจร NOT

วงจร AND คือ วงจรรวมที่มีสัญญาณเข้าได้ตั้งแต่สองทางขึ้นไป แต่จะให้สัญญาณออกเพียงสัญญาณเดียว วงจร AND สองอินพุทอาจแทนลักษณะการทำงานได้ด้วยวงจรในภาพประกอบ 54



ก.



$$Y = A \cdot B$$

ข.

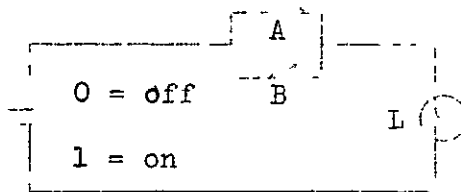
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ค.

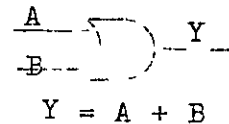
ภาพประกอบ 54 ก. วงจร AND ข. สัญลักษณ์ ค. ตารางค่าความจริง

วงจร OR คือ วงจรตรรกที่มีสัญญาณเข้าได้ตั้งแต่สองทางขึ้นไป โดยจะให้สัญญาณออกเพียงสัญญาณเดียว วงจร OR จะให้ค่าตรรกออกจากวงจรต่างจากวงจร AND บ้าง ลักษณะวงจรไฟฟ้าที่อาจแทนการทำงานวงจร OR จะเป็นดังภาพประกอบ

55



ก.



$$Y = A + B$$

ข.

A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

ค.

ภาพประกอบ 55 ก. วงจร OR ข. สัญลักษณ์ ค. ตารางค่าความจริง

วงจรรทรกอื่น ๆ ที่เกิดจากการผสมกันระหว่างวงจรรทรกพื้นฐาน ได้แก่ วงจร NAND, NOR ซึ่งก็ได้แก่ NOT AND และ NOT OR ตามลำดับ

วงจรร NAND คือ วงจร AND แล้วตามด้วย NOT สัญญาณลักษณะที่ใช้แทนวงจรร NAND และตารางค่าความจริง เป็นดังภาพประกอบ 56 สัญญาณออกจาก NAND จะมีค่าตรรกเป็น "0" ก็ต่อเมื่อทุกค่าของสัญญาณเข้ามีค่าตรรกเป็น "1"

วงจรร NOR คือ วงจร OR ตามด้วย NOT สัญญาณออกจากวงจรร NOR จะมีค่าตรรกเป็น "1" ก็ต่อเมื่อสัญญาณเข้าทุกค่ามีค่าเป็น "0" สัญญาณลักษณะและ ตารางค่าความจริงเป็นดังภาพประกอบ 56



A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

$$Y = \overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$$

$$Y = \overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

ก. NAND Gate

ข. NOR Gate

ภาพประกอบ 56 วงจรรทรก ก. NAND Gate

ข. NOR Gate

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับวงจรรถรกาศัยสัจพจน์ และทฤษฎีเกี่ยวกับพีชคณิตของบูลีน และทฤษฎีอื่น ๆ ดังนี้

สัจพจน์	1a : $A = 1$ if $A \neq 0$	4a : $1 \cdot 0 = 0$
	1b : $A = 0$ if $A \neq 1$	4b : $1 + 0 = 1$
	2a : $0 \cdot 0 = 0$	5a : $\bar{0} = 1$
	2b : $1 + 1 = 1$	5b : $\bar{1} = 0$
	3a : $1 \cdot 1 = 1$	
	3b : $0 + 0 = 0$	

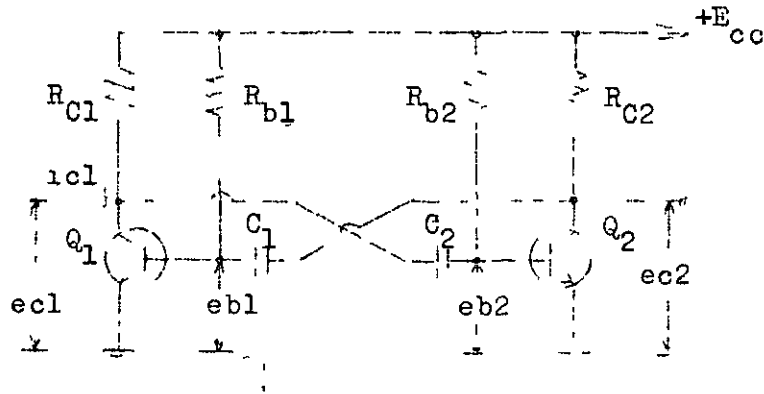
ทฤษฎี	1a : $A + 0 = A$	4a : $\overline{(\bar{A})} = A$	
	1b : $A \cdot 1 = A$	4b : $\overline{(\bar{A})} = A$	
	2a : $A + 1 = 1$	5a : $A + \bar{A} = 1$	
	2b : $A \cdot 0 = 0$	5b : $A \cdot \bar{A} = 0$	
	3a : $A + A = A$		
	3b : $A \cdot A = A$		
	6a : $\overline{A + B + C + \dots} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \dots$	} De Morgan's	
	6b : $\overline{A \cdot B \cdot C \cdot \dots} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots$		
	7a : $A(A + B) = A + AB = A$	} Theorem	
	7b : $A + AB = A(A + AB) = A$		

ภาคผนวก ค.

วงจรอดเตเปิด มีลติไวเบรเตอร์

วงจรออสเตเบิ้ล มัลติไวเบรเตอร์

วงจรมีลักษณะดังภาพประกอบ 57 เพื่อสะดวกต่อการอธิบายการทำงานของวงจร จะสมมติให้ $C_1 = C_2 = C$, $R_{C1} = R_{C2} = R_C$ และ $R_{b1} = R_{b2} = R_b$

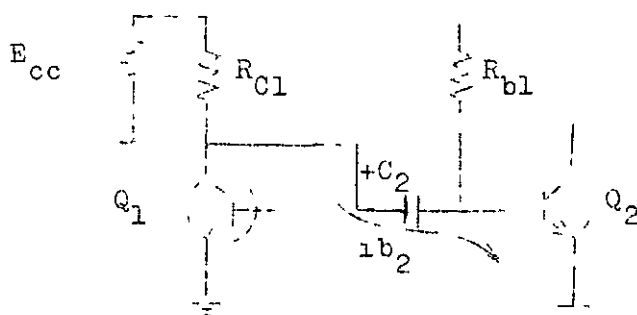


ภาพประกอบ 57 วงจรออสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์

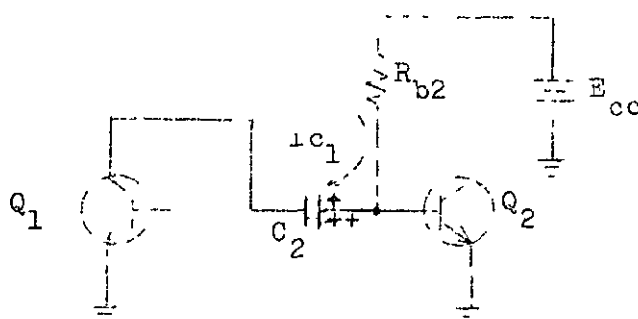
เมื่อต่อวงจรเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า E_{cc} ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะเริ่มค่นำกระแสทันที ถ้า Q_1 และ Q_2 มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ วงจรนี้ จะไม่สามารถออสซิลเลท เพราะ Q_1 และ Q_2 เกิดการนำกระแสไปเรื่อย ๆ ไม่ อิมิตัว แต่โดยความเป็นจริงเรามักจะหาทรานซิสเตอร์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ได้ยาก ดังนั้น เมื่อเริ่มค่นำวงจรทำงาน Q_1 และ Q_2 จะนำกระแสได้ไม่เท่ากัน ถ้า Q_1 นำกระแสได้คึกกว่า Q_2 กระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_1 คือ i_{c1} จะมีค่า เพิ่มขึ้นเร็วกว่าค่าน i_{c2} แต่จากการสมมติข้ต้น คือ $R_{C1} = R_{C2}$ ดังนั้น ศักย์ ไฟฟ้าที่คอลเลคเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 จะโคค่าเป็น $e_{c1} < e_{c2}$ เนื่องจาก วงจรค่นอยู่ในลักษณะให้ส่งสัญญาณจากค่นหนึ่งไปกระค่นให้อีกค่นหนึ่ง สามารถทำงาน ได้เองโดยอัตโนมัติ ดังนั้น การลดลงของศักย์ไฟฟ้า e_{c1} จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขาเบส (eb) ของ Q_2 คือ e_{b2} ลดลงค้วย ผลก็คือ กระแส i_{b2} มีค่าลดลง จาก ภาพประกอบ 39 ทรานซิสเตอร์ทั้งสองถูกค่นให้อยู่ในสภาพที่จะนำกระแสได้ทันที ดังนั้น การลดลงของ i_{b2} จะยังผลให้ i_{c2} มีค่าลดลงค้วย ($i_c \approx \beta i_b$)

แต่จะทำให้ศักย์ e_{c2} และ e_{b1} เพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง Q_2 หยุดนำกระแสสนิท แต่ Q_1 กลับนำกระแสเต็มที่

ช่วงขณะที่ Q_2 นำกระแส ตัวเก็บประจุ C_2 จะถูกประจุ (Charge) ถึงทิศทางที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 58 เวลาคงที่ในการประจุ C_2 คือ $\tau = R_{c1} C_2$ ตัวเก็บประจุ C_2 จะถูกประจุจนมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวมันเกือบเท่า E_{cc} การนำกระแสของ Q_2 จะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ออฟ (Cut off) C_2 ก็จะเริ่มปล่อยประจุ แต่จะมีทิศทางและวงจรคังภาพประกอบ 41 ค่าเวลาคงที่ในการคายประจุ คือ $\tau = R_{b2} C_2$ เมื่อเวลาผ่านไป จุดเบสของ Q_2 จะค่อย ๆ มีศักย์เป็นบวกมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเป็นผลให้ Q_2 นำกระแสอีกครั้งหนึ่ง



ภาพประกอบ 58 ทิศทางที่ C_2 ถูกประจุ Q_2 นำกระแสเท่านั้น

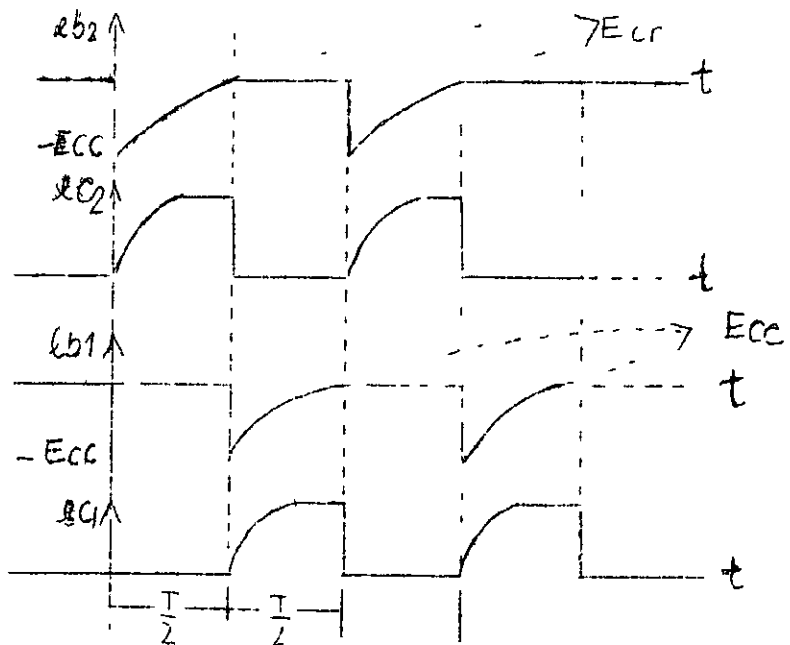


ภาพประกอบ 59 ทิศทางที่ C_2 ปล่อยประจุ Q_1 จะนำกระแสเท่านั้น

การพิจารณาเกี่ยวกับเวลาในระหว่างที่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวอยู่ในช่วงหยุด
นำกระแสจะพิจารณาจาก

1. ขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงที่จุดคอด เลคเตอร์ หรือทรานซิสเตอร์
เปลี่ยนจากหยุดนำกระแสเป็นนำกระแส (ทรานซิสเตอร์ที่ค่อวงจรภายนอกเช่นนี้ เมื่อ
นำกระแสศักย์คอด เลคเตอร์จะลดลงทันที)
2. เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุที่ค่ออยู่ระหว่าง เบส
กับคอด เลคเตอร์ของอีกด้านหนึ่งจะ เริ่มการปล่อยประจุทันที
3. ค่าคาบเวลา ที่ในการประจุและปล่อยประจุที่ถือปฏิบัติโดยทั่วไป
จะมีค่าใกล้เคียง $R_0 C$

ภาพประกอบ 60 คือ รูปคลื่นที่ได้จากวงจรออสเตบิล มัลติไวเบรเตอร์
จากภาพประกอบจะเห็นว่า ศักย์ e_b จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง $-E_{cc}$ กับ 0
แต่ศักย์ e_c จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0 กับ $+E_{cc}$



ภาพประกอบ 60 แสดงรูปร่างและการเพิ่มขึ้นศักย์ไฟฟ้าที่คอด เลคเตอร์และ เบส
เทียบกับดิน

การพิจารณาศักย์ไฟฟ้า จะอ้างอิง ภาพประกอบ 58 ดังนี้

$$e_{c1} = E_{cc} - i_{b2}R_{c1}$$

$$\text{แต่ } i_{b2} = \frac{E_{cc}}{R_{c1}} e^{(-t/R_{c1}C_2)}$$

$$\therefore e_{c1} = E_{cc} - E_{cc} \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } \tau = R_{c1}C_2$$

ถ้าให้วงเวลาที่ C ปลายประจุ $\tau = R_{b1}C_2$ มีค่าน้อย ๆ ทρανซิสเตอร์ Q1 จะอยู่ในสถานะไม่นำกระแสเพียงช่วงสั้น ๆ และการเปลี่ยนจากสถานะไม่นำกระแสเป็นนำกระแส (off to the on state) จะเริ่มต้นก่อนที่กระแส i_{b2} จะหยุดไหล ในกรณีเช่นนี้ศักย์ไฟฟ้า e_{c1} จะไม่มีโอกาสเพิ่มถึงค่า E_{cc} ได้เลย แต่จะมีค่าเป็นคังสมการ (4) ศักย์ e_{c1} จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0 และค่า e_{c1} ตามสมการ (4)

$$e_{c1} = E_{cc} - E_{cc} \cdot e^{(-T/2)} \quad (4)$$

เมื่อ T แทน คาบเวลาของการออสซิลเลทรอบหนึ่งรอบ

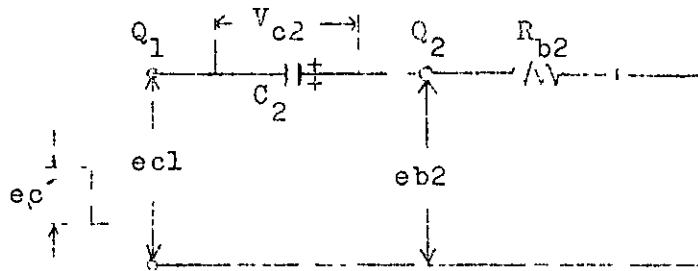
τ แทน ค่าเวลาคงที่ในการคายประจุของตัวเก็บประจุ

วงจรสมมูลของวงจรตามภาพประกอบ 60 จะเป็นคังภาพประกอบ 61 เมื่อ Q2 ไม่นำกระแส จะได้ศักย์ไฟฟ้าที่เบสเป็น $e_{c2} = V_{c2} + e_{c1}$ เมื่อ V_{c2} คือ ศักย์คร่อมตัวเก็บประจุ C_2 และ e_{c1} คือ ขนาดของศักย์ไฟฟ้า ณ จุดคอลเลคเตอร์ Q1 ที่เปลี่ยนแปลงจากสถานะไม่นำกระแสเป็นนำกระแส หรือผลต่างของ e_{c1} เมื่อทρανซิสเตอร์ Q1 อยู่ระหว่างไม่นำกระแสกับนำกระแส คังนั้น

$$e_{c1} = -e_{c1} \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (5)$$

ศักย์ไฟฟ้ากรอม C_2 กำหนดด้วยสมการ

$$V_{c2} = E_{cc} - E_{cc} \cdot e^{(-t/\tau')} \quad (6)$$



ภาพประกอบ 61 วงจรสมมูลของภาพประกอบ 59

จาก (6) และ (5) จะได้ศักย์ไฟฟ้า eb_2 คือ

$$eb_2 = E_{cc} - E_{cc} e^{(-t/\tau')} - e_{c1} \cdot e^{(-t/\tau')} \quad (7)$$

ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะนำกระแส เมื่อ $eb_2 = 0$ และให้ $t = \frac{T}{2}$ จากสมการ (7) จะได้ว่า

$$\frac{T}{2} = \tau' \ln \frac{E_{cc} + e_{c1}}{E_{cc}} \quad (8)$$

โดยทั่วไป เมื่อ ec เพิ่มขึ้นถึงค่า E_{cc} ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส กำหนดโดยประมาณ

$$\frac{T}{2} = \tau' \ln 2 = 0.694 \tau' \quad (9)$$

ภาคผนวก ง.

ลักษณะสมบัติของวงจรรำไรรูป

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

TYPES SN52723, SN72723 PRECISION VOLTAGE REGULATORS

BULLETIN NO. DL 5 7311537 AUGUST 1972 REVISED SEPTEMBER 1973

- 150-mA Load Current without External Power Transistor
- Typically 0.02% Input Regulation and 0.03% Load Regulation (SN52723)
- Adjustable Current Limiting Capability
- Input Voltages to 40 Volts
- Output Adjustable from 2 to 37 Volts
- Designed to be Interchangeable with Fairchild $\mu A723$ and $\mu A723C$ Respectively

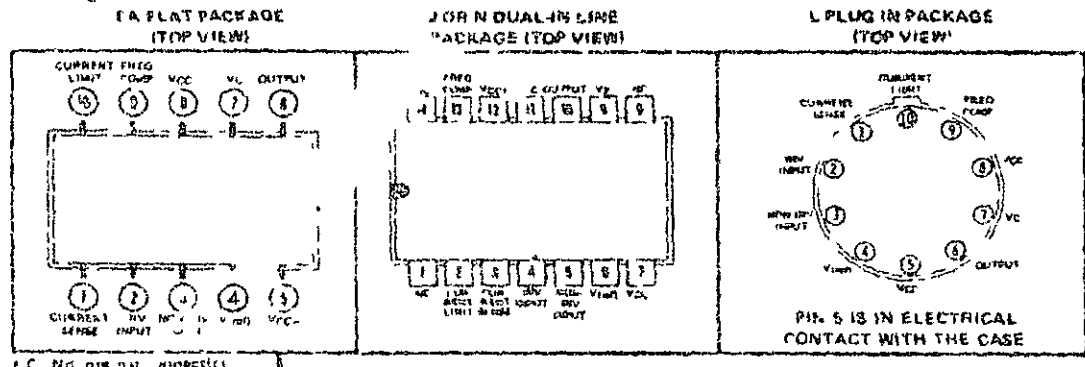
Description

The SN52723 and SN72723 are monolithic integrated circuit voltage regulators featuring high ripple rejection, excellent input and load regulation, excellent temperature stability, and low standby current. The circuit consists of a temperature-compensated reference voltage, amplifier, an error amplifier, a 150-milliampere output transistor, and an adjustable output current limiter.

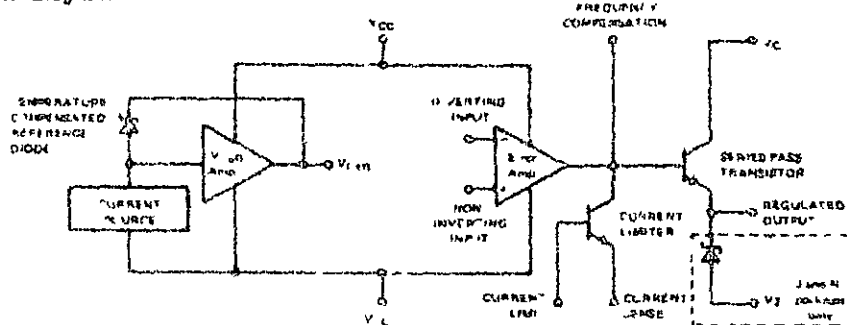
The SN52723 and SN72723 are designed for use in positive or negative power supplies as a series shunt switching or floating regulator. For output currents exceeding 150 mA, additional pass elements may be connected as shown in Figures 4 and 5.

The SN52723 is characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C ; the SN72723 is characterized for operation from 0°C to 70°C .

Terminal assignments:



functional block diagram



TYPES SN52723, SN72723 PRECISION VOLTAGE REGULATORS

absolute maximum ratings over operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Peak voltage from V_{CC+} to V_{CC-} ($t_w \leq 50$ ns)	- 50 V
Continuous voltage from V_{CC+} to V_{CC-}	40 V
Input - output voltage differential	40 V
Current from V_Z	25 mA
Current from $V_{(ref)}$	15 mA
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 1)	
J or N package	1000 mW
L package (see Note 2)	800 mW
FA package	650 mW
Operating free air temperature range	SN52723 Circuits -55°C to 125°C SN72723 Circuits 0°C to 70°C
Storage temperature range	-55°C to 160°C
Lead temperature 1/16 inch from case for 60 seconds, FA, J or L package	300°C
Lead temperature 1/16 inch from case for 10 seconds, N package	260°C

NOTES 1 Power dissipation = $I_{(standby)} + I_{(ref)} (V_{CC+} - V_{CC-} - V_O) I_O$. For operation at elevated temperature refer to Dissipation Derating Curve Figure 13.
2 This rating for the L package requires a heat sink that provides a thermal resistance from case to free air, θ_{CA} , of not more than 55°C/W.

recommended operating conditions

	MIN	MAX	UNIT
Input voltage V_I	9.5	40	V
Output voltage V_O	2	37	V
Input to-output voltage differential $V_{IC} - V_{OC}$	3	38	V
Output current I_O		150	mA

electrical characteristics at specified free-air temperature (see note 3)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		SN52723		SN72723		UNIT		
			MIN	TYP	MAX	MIN		TYP	MAX
Input regulation	$V_I = 12$ V to $V_I = 15$ V	25°C	0.01%	0.1%	0.01%	0.1%			
	$V_I = 12$ V to $V_I = 40$ V	25°C	0.02%	0.2%	0.1%	0.5%			
	$V_I = 12$ V to $V_I = 15$ V	Full range		0.5%		0.3%			
Ripple rejection	$f = 50$ Hz to 10 kHz	$C_{(ref)} = 0$ 25°C		74		74	dB		
	$f = 50$ Hz to 10 kHz	$C_{(ref)} = 5$ μ F 25°C		86		86			
Load regulation	$I_O = 1$ mA to $I_O = 50$ mA	25°C	-0.03%	-0.15%	-0.03%	-0.2%			
		Full range		-0.6%		-0.6%			
Reference voltage $V_{(ref)}$		25°C	6.95	7.15	7.35	6.8	7.15	7.5	V
Standby current	$V_I = 30$ V	$I_O = 0$ 75°C		7	2.3	3.5	7.3	4	mA
Temperature coefficient of output voltage		Full range	0.002	0.015		0.003	0.015		%/°C
Short-circuit output current	$R_{SC} = 10$ Ω	$V_O = 0$ 25°C		65		65			mA
Output noise voltage	$BW = 100$ Hz to 10 kHz	$C_{(ref)} = 0$ 25°C		20		20			μ V
	$BW = 100$ Hz to 10 kHz	$C_{(ref)} = 5$ μ F 25°C		7.5		2.5			

† Full range for SN52723 is -55°C to 125°C and for SN72723 is 0°C to 70°C.
NOTE 3 For all values in this table the device is connected as shown in Figure 1 with the divider resistance as seen by the error amplifier < 10 k Ω . Unless otherwise specified: $V_I = V_{CC+} - V_{CC-} = 12$ V, $V_{CC-} = 0$, $V_O = 5$ V, $I_O = 1$ mA, $R_{SC} = 0$ and $C_{(ref)} = 0$.

TYPES SN52723, SN72723 PRECISION VOLTAGE REGULATORS

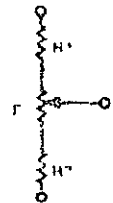
TABLE I
RESISTOR VALUES (Ω) FOR STANDARD OUTPUT VOLTAGES

OUTPUT VOLTAGE (V)	APPLICABLE FIGURES (SEE NOTE 4)	FIXED OUTPUT		ADJUSTABLE OUTPUT (SEE NOTE 5)			OUTPUT VOLTAGE (V)	APPLICABLE FULL RES (SEE NOTE 4)	FIXED OUTPUT		ADJUSTABLE OUTPUT (SEE NOTE 5)		
		R1 (Ω)	R2 (Ω)	R1 (Ω)	R1 (Ω)	R2 (Ω)			R1 (Ω)	R2 (Ω)	R1 (Ω)	R1 (Ω)	R2 (Ω)
-1.0	1 2 6 9 11 12 14	43	304	10	0.5	1.7	0.0	7	157	10	0.5	1.0	0.1
-3.6	1 5 6 9 11 12 (4)	357	31	1	0	1.1	(0.0)	7	157	150	2.2	0.5	1.40
+5.0	1 5 6 9 11 12 (4)	215	118	0.75	0.1	2.2	1.0 (1)	10	157	2.3	1.2	0.5	0.75
+6.0	1 5 6 9 11 12 (4)	115	604	0.5	0.5	2.2	9	10	146	1.36	1.2	0.5	2.1
+9.0	2 4 (5 6 9 11)	487	715	0.75	1.0	2.7	12	11	157	1.45	1.2	0.5	3.1
+12	2 4 (5 6 9 12)	487	15	2.0	1.0	3.0	13	10	157	1.1	1.2	0.5	4.1
+15	4 (5 6 9 11)	787	715	3.1	1.0	3.0	20	10	157	1.43	1.2	0.5	10
+28	2 4 (5 6, 9 11)	210	715	5.6	1.0	2.0	45	10	157	11.2	2.2	0	5.7
+45	7	157	182	2.7	1.0	3.0	-10 (1)	8	157	15.1	2.2	0	9.1
75	7	157	787	2.2	1.0	6.8	-250	8	15	210	2.2	1.0	24.0

TABLE II
FORMULAS FOR INTERMEDIATE OUTPUT VOLTAGES

<p>Outputs from +2 to +7 volt (Figures 1, 5, 6, 9, 11, 12, 14)</p> $V_O = V_{ref} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	<p>Output from +4 to +150 volt (Figure 2)</p> $V_{ref} = \frac{R_2}{R_1} \times R$ <p>R = 10</p>	<p>Current Limiting (Figure 3)</p> $I_{limit} = \frac{0.6V}{R_{sc}}$
<p>Outputs from +7 to +12 volt (Figures 2, 4 (6, 9, 11, 12))</p> $V_O = V_{ref} \times \frac{R_1 + R_2}{R_2}$	<p>Output from 6 to +250 volt (Figures 1, 6, 9, 11)</p> $V_{ref} = \frac{V_{ref}(1)}{R_1} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ <p>R1 = R</p>	<p>Feedback Current Limiting (Figure 4)</p> $I_{limit} = \frac{V_O R_1 + (R_1 + R_2) 0.65V}{R_1 R_2}$ $I_{sc} = \frac{0.6V}{R_{sc}} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1}$

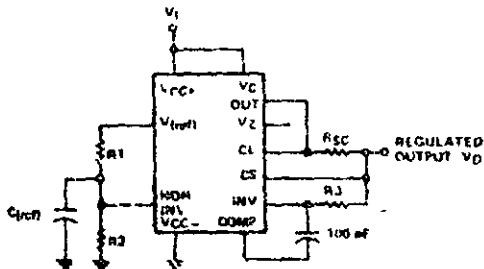
- NOTE: 4 Figures 1 through 4 show the 1.2 volt 10 ohm V_{ref} or $V_{ref}(1)$ (the numbers in parentheses) may be used with the R_1/R_2 ratio since the circuit voltage (V_{ref} or $V_{ref}(1)$) is always placed at the same position relative to the resistors.
 5 To make the circuit adjustable the R_1/R_2 ratio shows with R_1 as a variable resistor by the circular arrow to the right.
 6 For negative output voltages, use the V_{ref} and $V_{ref}(1)$ as indicated on the positive supply supply (at the voltage between V_{ref} and $V_{ref}(1)$ supply).
 7 For a 10 load (SN 72723) and a 10 ohm load (SN 52723) use the V_{ref} and $V_{ref}(1)$ as indicated on the 0.6 V regulator circuit. For a 10 ohm load use the V_{ref} and $V_{ref}(1)$ as indicated.



ADJUSTABLE OUTPUT CIRCUITS

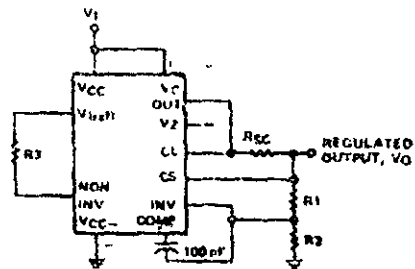
TYPES SN52723, SN72723 PRECISION VOLTAGE REGULATORS

TYPICAL APPLICATION DATA



NOTES A $R3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$ for minimum μV_0
 B $R3$ may be eliminated if minimum component count is direct connection (i.e. $R3 = 0$)

FIGURE 1—BASIC LOW VOLTAGE REGULATOR
($V_0 = 2$ TO 7 VOLTS)



NOTES A $R3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$ for minimum μV_0
 B $R3$ may be eliminated for minimum component count. Use direct connection (i.e. $R3 = 0$)

FIGURE 2—BASIC HIGH VOLTAGE REGULATOR
($V_0 = 7$ TO 37 VOLTS)

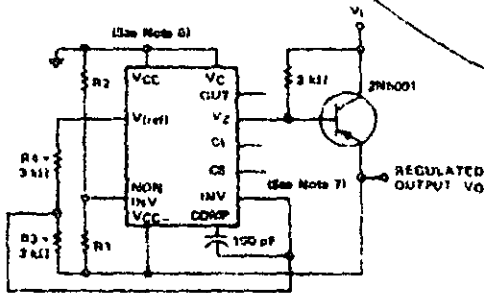


FIGURE 3—NEGATIVE VOLTAGE REGULATOR

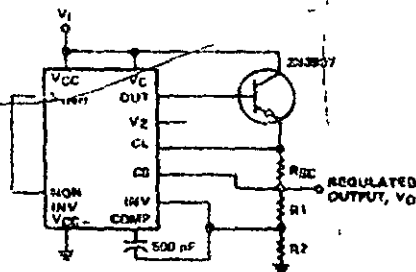


FIGURE 4—POSITIVE VOLTAGE REGULATOR
(EXTERNAL N-P-N PASS TRANSISTOR)

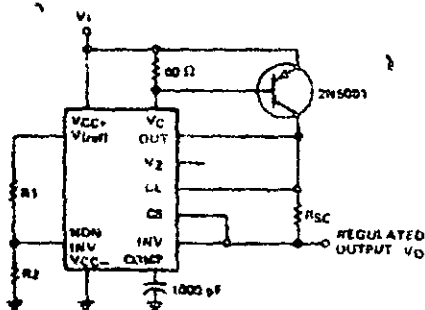


FIGURE 5—POSITIVE VOLTAGE REGULATOR
(EXTERNAL P-N-P PASS TRANSISTOR)

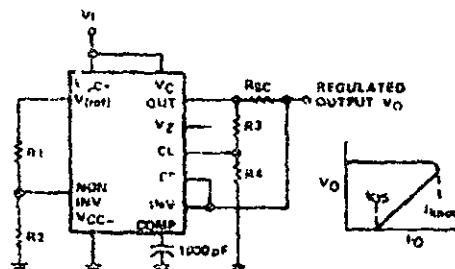


FIGURE 6—FOLDBACK CURRENT LIMITING

**TYPES SN5446A, SN5447A, SN5448, SN5449, SN54L46, SN54L47,
SN7446A, SN7447A, SN7448, SN7449, SN74L46, SN74L47
BCD-TO-SEVEN-SEGMENT DECODERS/DRIVERS**

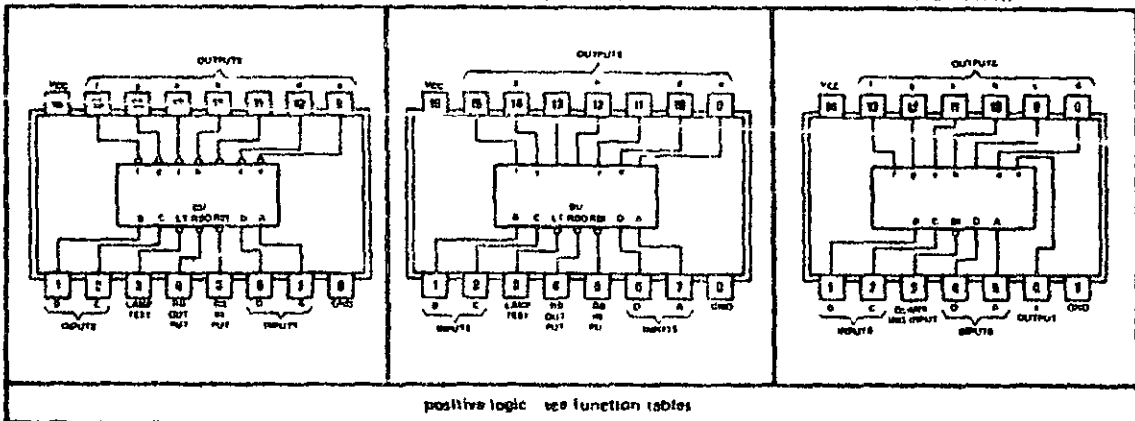
BULLETIN NO. DLS 7211811 DECEMBER 1972

- | | | |
|---|--|---|
| <p>'46A, '47A, 'L46, 'L47
feature</p> <ul style="list-style-type: none"> • Open-Collector Outputs Drive Indicators Directly • Lamp-Test Provision • Leading/Trailing Zero Suppression | <p>'48
features</p> <ul style="list-style-type: none"> • Internal Pull Ups Eliminate Need for External Resistors • Lamp-Test Provision • Leading/Trailing Zero Suppression | <p>'49
features</p> <ul style="list-style-type: none"> • Open-Collector Outputs • Blanking Input |
|---|--|---|
- All Circuit Types Feature Lamp Intensity Modulation Capability

'46A, '47A J OR W PACKAGE
'L46, 'L47 J OR N PACKAGE
(TOP VIEW)

'48 J OR W PACKAGE
(TOP VIEW)

'49 W PACKAGE
(TOP VIEW)



description

Of these BCD-to-seven segment decoder/driver circuits, the 46A, L46, 47A and L47 feature active-low outputs designed for driving indicators directly and the other two, 48 and 49 feature active high outputs for driving lamp buffers. The following table summarizes the differences in the driver outputs and gives the typical power dissipation.

TYPE	DRIVER OUTPUTS				TYPICAL POWER DISSIPATION
	ACTIVE LEVEL	OUTPUT CONFIGURATION	IDL SINK CURRENT	MAX VOLTAGE	
46A	low	open-collector	40 mA	30 V	370 mW
L46	low	open collector	20 mA	30 V	160 mW
47A	low	open-collector	40 mA	15 V	320 mW
L47	low	open-collector	20 mA	15 V	160 mW
48A	high	2 k Ω pull up	6.4 mA	5.5 V	265 mW
48A	high	open-collector	10 mA	5.5 V	165 mW

All of the circuits except '49 have full ripple blanking input/output controls and a lamp test input. The '49 circuit incorporates a direct blanking input. Segment identification with resultant displays are shown on the following page. Display patterns for BCD input counts above 9 are unique symbols to authenticate input conditions.

**TYPES SN5446A, SN5447A, SN5448, SN5449, SN54L46, SN54L47,
SN7446A, SN7447A, SN7448, SN7449, SN74L46, SN74L47
BCD-TO-SEVEN-SEGMENT DECODERS/DRIVERS**

48
FUNCTION TABLE

DECIMAL OR FUNCTION	INPUTS						BI/RBO†	OUTPUTS							NOTE
	LT	RBI	D	C	B	A		a	b	c	d	e	f	g	
0	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	1
1	H	X	L	L	L	H	H	L	H	H	L	L	L	L	1
2	H	X	L	L	H	L	H	H	H	L	H	H	L	H	
3	H	X	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H	
4	H	X	L	H	L	L	H	L	H	H	L	L	H	H	
5	H	X	L	H	L	H	H	H	L	H	H	L	H	H	
6	H	X	L	H	H	L	H	L	L	H	H	H	H	H	
7	H	X	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	
8	H	X	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	
9	H	X	H	L	L	H	H	H	H	H	L	L	H	H	
10	H	X	H	L	H	L	H	L	L	L	H	H	L	H	
11	H	X	H	L	H	H	H	L	L	H	H	L	L	H	
12	H	X	H	H	L	L	H	L	H	L	L	L	H	H	
13	H	X	H	H	L	H	H	H	L	L	H	L	H	H	
14	H	X	H	H	H	L	H	L	L	L	H	H	H	H	
15	H	X	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	
RBI	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	2
LT	L	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	4

H = high level L = low level X = irrelevant

- NOTES**
- 1 The blanking input (BI) must be open or held at a high logic level when output functions 0 through 16 are desired. The ripple-blanking input (RBI) must be open or high if blanking of a digit zero is not desired.
 - 2 When a low logic level is applied directly to the blanking input (BI) all segment outputs are low regardless of the level of any other input.
 - 3 When ripple-blanking is used, BI and inputs A, B, C, and D are at a low level with the lamp-test input high, all segment outputs are low and the ripple-blanking output goes to a low level (response condition).
 - 4 When the blanking input/ripple-blanking output (BI/RBO) is open or held high and a low is applied to the lamp-test input, all segment outputs are high.

BI/RBO is wire-AND logic serving as blanking input (BI) and/or ripple-blanking output (RBO)

49
FUNCTION TABLE

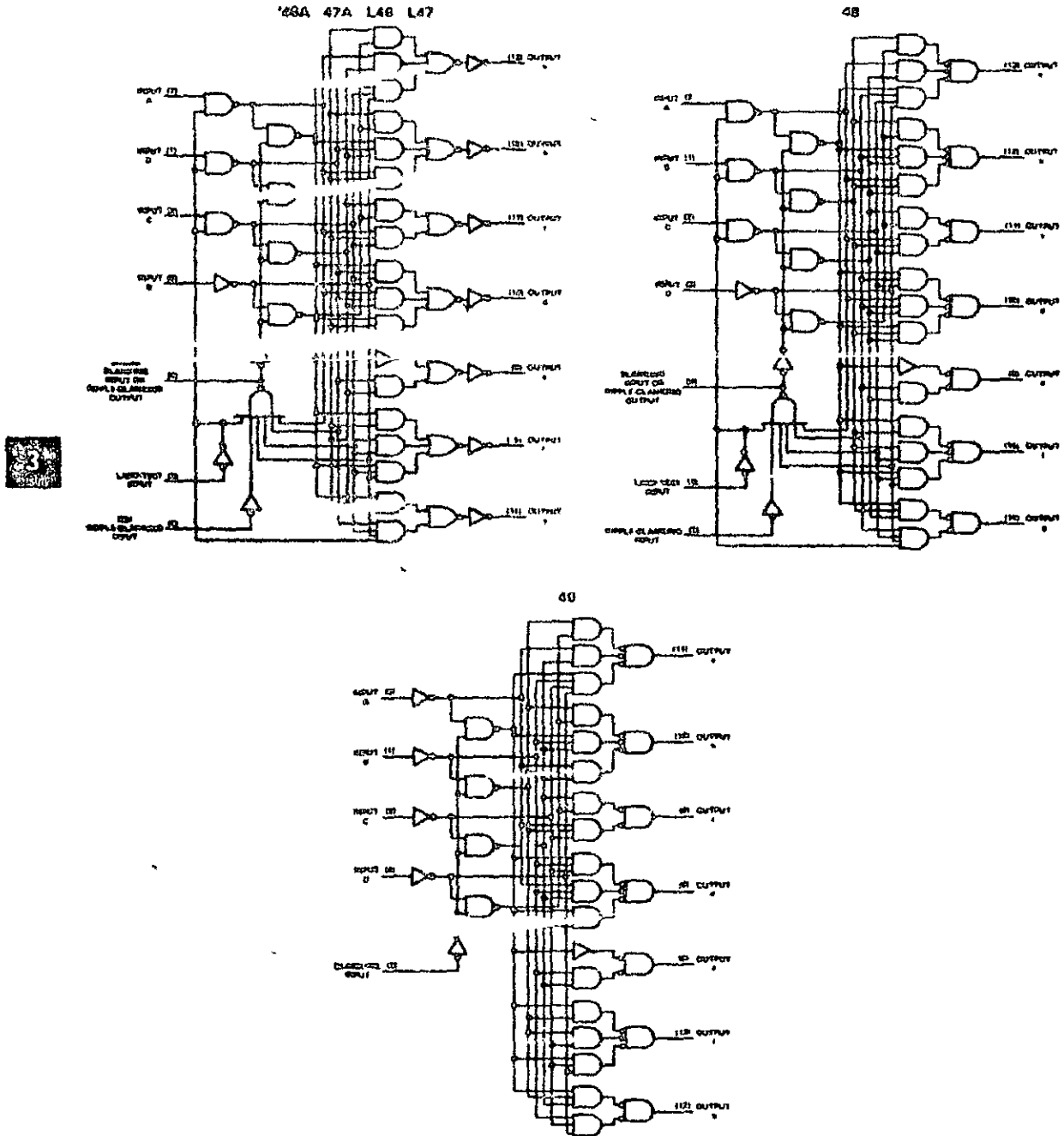
DECIMAL OR FUNCTION	INPUTS						OUTPUTS							NOTE
	J	C	B	A	BI	a	b	c	d	e	f	g		
0	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	1	
1	L	L	L	H	H	L	H	H	L	L	L	L		
2	L	L	H	L	H	H	H	L	H	H	L	H		
3	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H		
4	L	H	L	L	H	L	H	H	L	L	L	H		
5	L	H	L	H	H	H	L	H	H	L	H	H		
6	L	H	H	L	H	L	L	H	H	H	H	H		
7	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L		
8	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H		
9	H	L	L	H	H	H	H	H	L	L	H	H		
10	H	L	H	L	H	L	L	L	H	H	L	H		
11	H	L	H	H	H	L	L	H	H	L	L	H		
12	H	H	L	L	H	H	L	L	L	L	H	H		
13	H	H	L	H	H	H	L	L	L	H	L	H		
14	H	H	H	L	H	L	L	L	L	H	H	H		
15	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L		
BI	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L	2	

H = high level L = low level X = irrelevant

- NOTES**
- 1 The blanking input (BI) must be open or held at a high logic level when output functions 0 through 16 are desired.
 - 2 When a low logic level is applied directly to the blanking input (BI) all segment outputs are low regardless of the level of any other input.

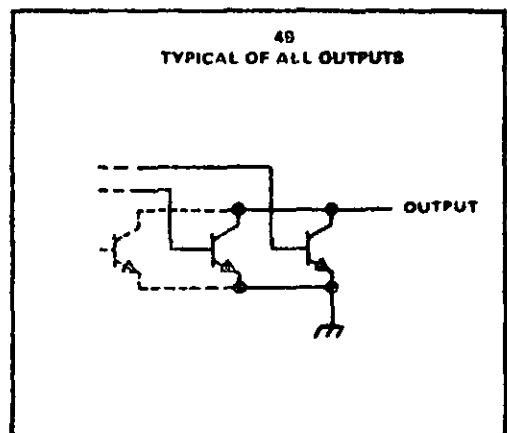
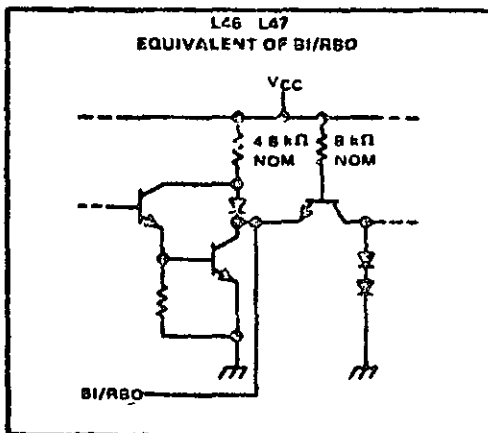
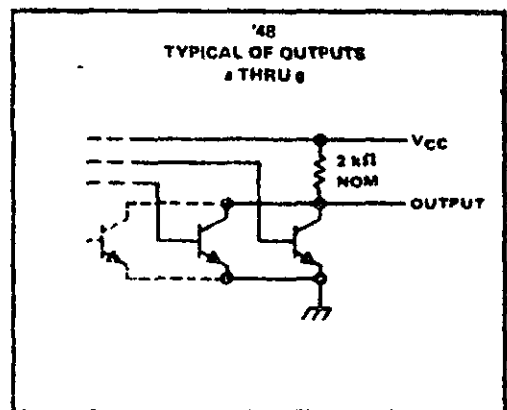
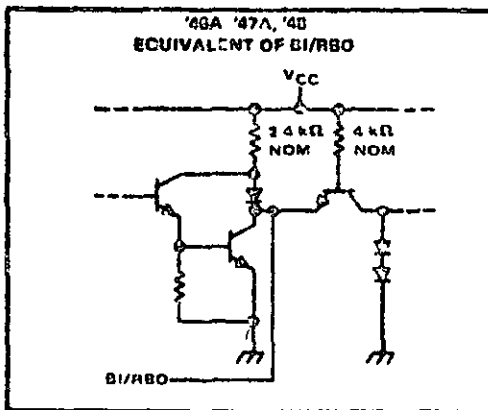
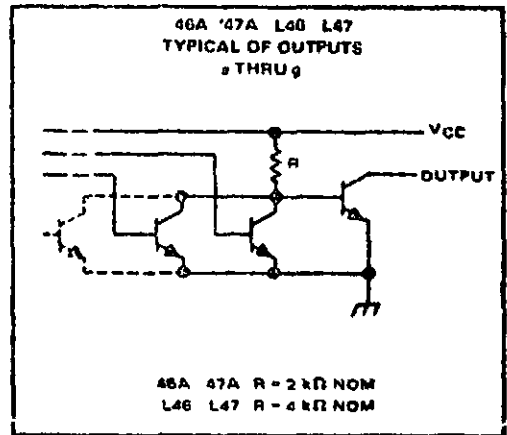
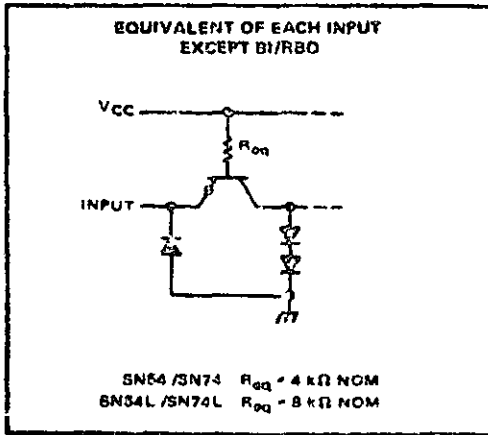
**TYPES SN5446A, SN5447A, SN5448, SN5449, SN54L46, SN54L47,
SN7446A, SN7447A, SN7448, SN7449, SN74L46, SN74L47
BCD-TO-SEVEN-SEGMENT DECODERS/DRIVERS**

functional block diagrams



**TYPES SN5446A, SN5447A, SN5448, SN5449, SN54L46, SN54L47,
SN7446A, SN7447A, SN7448, SN7449, SN74L46, SN74L47
BCD-TO-SEVEN-SEGMENT DECODERS/DRIVERS**

schematics of inputs and outputs



3

TYPES SN5446A, SN5447A, SN7446A, SN7447A, BCD-TO-SEVEN-SEGMENT DECODERS/DRIVERS

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	7 V
Input voltage	5.5 V
Current forced into any output in the off state	1 mA
Operating free-air temperature range	SN5446A SN5447A Circuits: -55°C to 125°C SN7446A, SN7447A Circuits: 0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C

NOTE 1 Voltage values are with respect to network ground terminal

recommended operating conditions

	SN5446A			SN5447A			SN7446A			SN7447A			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V_{CC}	4.5	5	5.5	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	4.75	5	5.25	V
Off-state output voltage, $V_{O(off)}$ a thru g	30			15			30			15			V
On-state output current, $I_{O(on)}$ a thru g	40			40			40			40			mA
High-level output current, I_{OH} BI/RBO	-200			-200			-200			-200			μA
Low-level output current, I_{OL} BI/RBO	8			8			8			8			mA
Operating free-air temperature, T_A	-55			125			0			70			$^{\circ}\text{C}$

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IH} High-level input voltage		2			V
V_{IL} Low-level input voltage				0.8	V
V_I Input clamp voltage any input except BI/RBO	$V_{CC} = \text{MIN}$ $I_I = -10 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH} High-level output voltage	BI/RBO $V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IH} = 2 \text{ V}$ $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$ $I_{OH} = -200 \mu\text{A}$	2.4	3.7		V
V_{OL} Low-level output voltage	BI/RBO $V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IH} = 2 \text{ V}$, $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$ $I_{OL} = 8 \text{ mA}$		0.3	0.4	V
$I_{O(off)}$ Off-state output current	a thru g $V_{CC} = \text{MAX}$ $V_{IH} = 2 \text{ V}$, $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$ $V_{O(off)} = \text{MAX}$			260	μA
$V_{O(on)}$ On-state output voltage	a thru g $V_{CC} = \text{MAX}$, $V_{IH} = 2 \text{ V}$ $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$, $I_{O(on)} = 40 \text{ mA}$		0.3	0.4	V
I_I Input current at maximum input voltage	Any input except BI/RBO $V_{CC} = \text{MAX}$ $V_I = 5.5 \text{ V}$			1	mA
I_{IH} High-level input current	Any input except BI/RBO $V_{CC} = \text{MAX}$ $V_I = 2.4 \text{ V}$			40	μA
I_{IL} Low-level input current	Any input except BI/RBO $V_{CC} = \text{MAX}$ $V_I = 0.4 \text{ V}$			-1.6	mA
I_{OS} Short-circuit output current	BI/RBO $V_{CC} = \text{MAX}$			-4	mA
I_{CC} Supply current	$V_{CC} = \text{MAX}$ See Note 2			64	85
				64	103
					mA

¹ For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions for the applicable type

² All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

NOTE 2 I_{CC} is measured with all outputs open and all inputs at $\sim 5 \text{ V}$

switching characteristics, $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{off} Turn-off time from A input	$C_L = 15 \text{ pF}$ $R_L = 120 \Omega$ See Note 3			100	ns
t_{on} Turn-on time from A input				100	ns
t_{off} Turn-off time from RBI input				100	ns
t_{on} Turn-on time from RBI input				100	ns

NOTE 3 Load circuit and voltage waveforms are shown on page 148. t_{off} corresponds to t_{PLH} and t_{on} corresponds to t_{PHL}

TTL
MSI

TYPES SN5490A, SN5492A, SN5493A, SN54L90 SN54L93,
SN7490A, SN7492A, SN7493A, SN74L90, SN74L93
DECADE, DIVIDE-BY-TWELVE, AND BINARY COUNTERS

HULLETIN NO. DLS 7211807 DECEMBER 1972

- '90A, 'L90 DECADE COUNTERS
- 92A DIVIDE BY TWELVE COUNTER
- '93A, 'L93 4 BIT BINARY COUNTERS

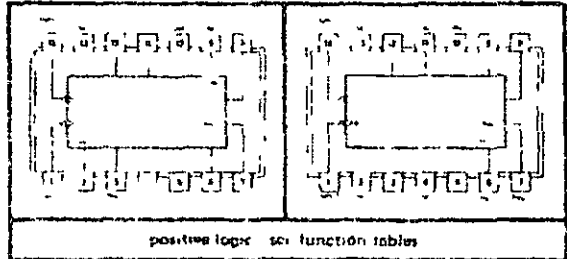
description

Each of these monolithic counters contains four master-slave flip-flops and additional gating to provide a divide-by-two counter and a three-stage binary counter for which the count cycle length is divide-by-five for the 90A and L90 divide-by-six for the 92A and divide-by-eight for the '93A and 'L93

All of these counters have a gated zero reset and the 90A and L90 also have gated set to nine inputs for use in BCD nine's complement applications

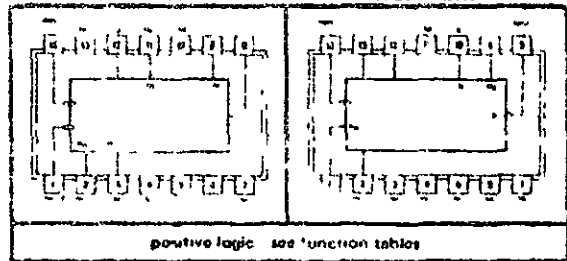
To use their maximum count length (decade divide by twelve or four-bit binary) of these counters the B input is connected to the Q_A output. The input count pulses are applied to input A and the outputs are as described in the appropriate function table. A symmetrical divide-by-ten count can be obtained from the 90A or L90 counters by connecting the Q_D output to the A input and applying the input count to the B input which gives a divide-by-ten square wave at output Q_A .

'90A J N OR W PACKAGE
L90 J N OR T PACKAGE
(TOP VIEW) 92A J N OR W PACKAGE
(TOP VIEW)



positive logic see function tables

'93A J N OR W PACKAGE
(TOP VIEW) L93 J N OR T PACKAGE
(TOP VIEW)

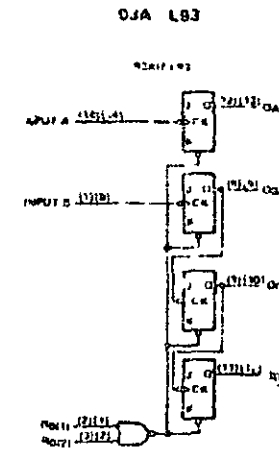
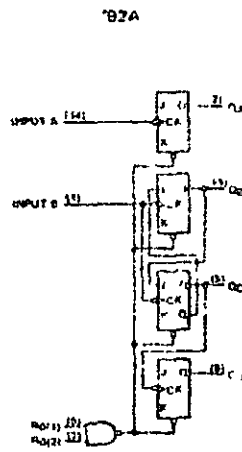
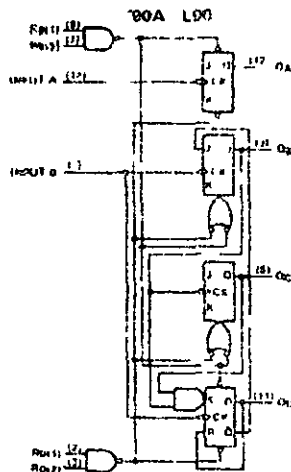


positive logic see function tables

NC No internal connection

TYPES	TYPICAL POWER DISSIPATION
90A	145 mW
L90	20 mW
'92A 93A	130 mW
L93	16 mW

functional block diagrams



dynamic input activated by transition from a high level to a low level

The J and K inputs shown without connection are for reference only and are functionally at a high level

**TYPES SN5490A, SN5492A, SN5493A, SN54L90, SN54L93,
SN7490A, SN7492A, SN7493A, SN74L90, SN74L93
DECADE, DIVIDE-BY-TWELVE, AND BINARY COUNTERS**

**90A L90
BCD COUNT SEQUENCE**
(See Note A)

COUNT	OUTPUT			
	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H

**90A L90
BINARY COUNT SEQUENCE**
(See Note B)

COUNT	OUTPUT			
	Q _A	Q _B	Q _C	Q _D
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H

**90A L93
RESET/COUNT FUNCTION TABLE**

RESET INPUTS				OUTPUT			
R ₀₍₁₎	R ₀₍₂₎	R ₀₍₃₎	R ₀₍₄₎	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
H	H	L	X	L	L	L	L
H	H	X	L	L	L	L	H
X	X	H	H	H	L	L	H
X	L	X	L	COUNT			
L	X	L	X	COUNT			
L	X	X	L	COUNT			
X	L	L	X	COUNT			

**92A
COUNT SEQUENCE**
(See Note C)

COUNT	OUTPUT			
	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	H	L	L	L
7	H	L	L	H
8	H	L	H	L
9	H	L	H	H
10	H	H	L	L
11	H	H	L	H

**93A L93
COUNT SEQUENCE**
(See Note C)

COUNT	OUTPUT			
	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H
10	H	L	H	L
11	H	L	H	H
12	H	H	L	L
13	H	H	L	H
14	H	H	H	L
15	H	H	H	H

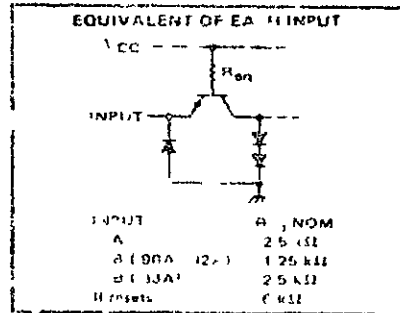
**93A 93A L93
RESET/COUNT FUNCTION TABLE**

RESET INPUTS		OUTPUT			
R ₀₍₁₎	R ₀₍₂₎	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A
H	H	L	L	L	L
L	X	COUNT			
X	L	COUNT			

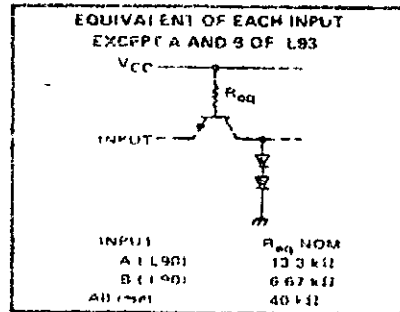
- NOTES**
- A Output Q_A is connected to input B for BCD output
 - B Output Q_D is connected to input A for binary count
 - C Output Q_A is connected to input B
 - D H = high level L = low level X = irrelevant

schematics of inputs and outputs

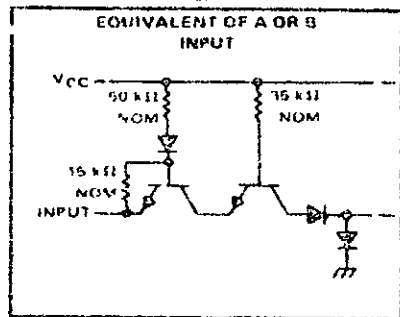
90A 92A 93A



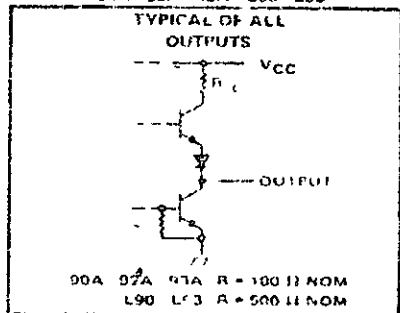
190 L93



L93



90A 92A 93A L90 L93



TYPES SN5490A, SN5492A, SN5493A, SN7490A, SN7492A, SN7493A DECADE, DIVIDE-BY-TWELVE, AND BINARY COUNTERS

absolute maximum ratings over operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage V_{CC} (see Note 1)		7 V
Input voltage		5.5 V
Interemitter voltage (see Note 2)		5.5 V
Operating free air temperature range	SN5490A SN5492A SN5493A SN7490A SN7492A SN7493A	55°C to 125°C 0°C to 70°C -65°C to 150°C
Storage temperature range		

NOTES 1 Voltage values (except interemitter voltage) are with respect to network ground terminal.
2 This is the voltage between two emitters of a multiple-emitter transistor. For those circuits this string applies between the two R_B inputs and for the DDA circuit it also applies between the two R_B inputs.

recommended operating conditions

	SN5490A SN5492A SN5493A			SN7490A SN7492A SN7493A			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage V_{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High level output current I_{OH}			-800			-800	μ A
Low level output current I_{OL}			16			16	mA
Count frequency f_{count} (see Figure 1)	A input	0	32	0		32	MHz
	B input	0	16	0		16	
Pulse width t_w	A input	15		15			ns
	B input	30		30			
	Reset input	15		15			
Reset (inactive state) setup t_{setup}		25		25			ns
Operating free air temperature T_A		55	125	0		70	°C

electrical characteristics over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	90A			92A			93A			UNIT
		MIN	TYP ²	MAX	MIN	TYP ²	MAX	MIN	TYP ²	MAX	
V_{IH} High level input voltage		2			2			2			V
V_{IL} Low level input voltage				0.8			0.8			0.8	V
V_I Input trip voltage	$V_{CC} - \text{MIN}$ $I_I = 12 \text{ mA}$			5			-1.5			1.5	V
V_{OH} High level output voltage	$V_{CC} - \text{MIN}$ $V_{IH} = 2 \text{ V}$ $V_{IL} = 0 \text{ V}$ $I_{OH} = 800 \mu\text{A}$	2.4	3.4		2.4	3.4		2.4	3.4		V
V_{OL} Low level output voltage	$V_{IC} - \text{MIN}$ $V_{IH} = 2 \text{ V}$ $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$ $I_{OL} = 16 \text{ mA}^4$		0.2	0.4		0.2	0.4		0.2	0.4	V
I_I Input current at maximum input voltage	$V_{CC} - \text{MAX}$ $V_I = 5.5 \text{ V}$			1			1			1	mA
I_{IH} High level input current	Any input			40			40			40	μ A
	A input	$V_{CC} - \text{MAX}$ $V_I = 2.4 \text{ V}$		60			60			60	μ A
	B input			120			120			80	μ A
I_{IL} Low level input current	Any reset			1.0			-1.0			-1.0	mA
	A input	$V_{CC} - \text{MAX}$ $V_I = 0 \text{ V}$		3.2			-1.7			-3.2	mA
	B input			4.8			-4.8			-3.2	mA
I_{OS} Short circuit output current ³	$V_{CC} - \text{MAX}$	SN54	-20	57	-20	-57	20	-57		57	mA
		SN74	-18	57	18	57	18	-57			
I_{CC} Supply current	$V_{CC} - \text{MAX}$ See Note 3		29	42		26	39		26	39	mA

¹ For conditions shown as MIN or MAX use the appropriate value specified under recommended operating conditions for the applicable type.

² All typical values are at $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$.

³ Not more than one output should be shorted at a time.

⁴ Outputs are tested at $I_{OL} = 16 \text{ mA}$ plus the limit value for I_{IL} for the B input. This permits driving the B input while maintaining full fan out capability.

NOTE 3 I_{CC} is measured with all outputs open, both R_B inputs grounded following momentary connection to 4.5 V and all other inputs grounded.

**TYPES SN5490A, SN5492A, SN5493A, SN7490A, SN7492A, SN7493A
DECADE, DIVIDE-BY-TWELVE, AND BINARY COUNTERS**

switching characteristics, $V_{CC} = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

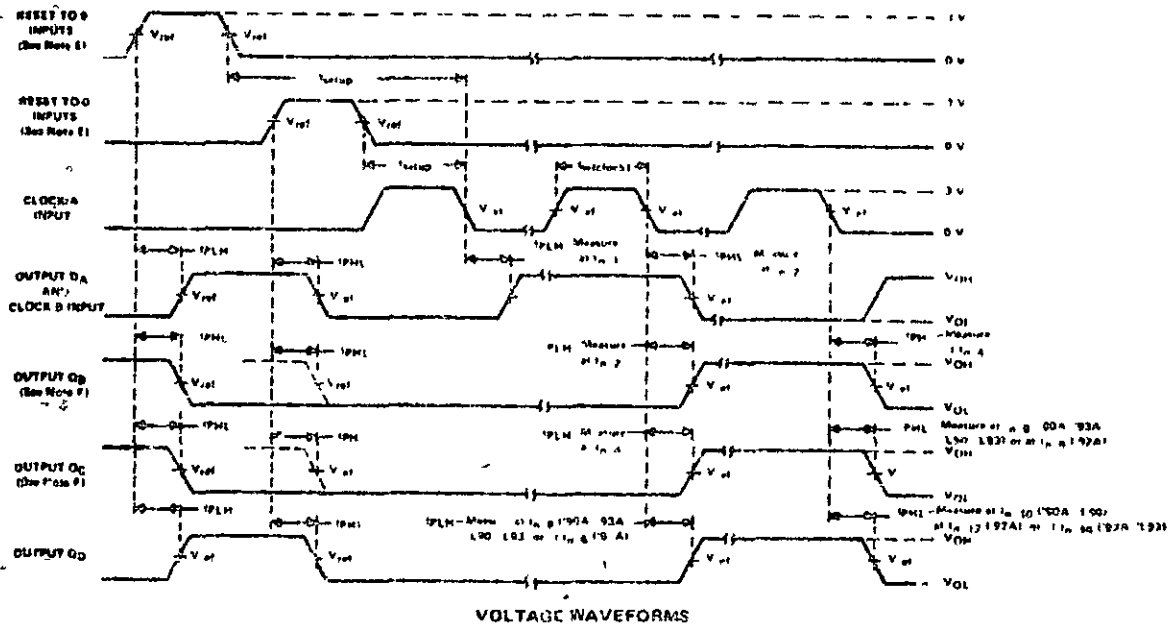
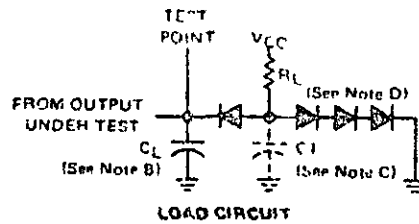
PARAMETER†	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	'60A			'82A			'93A			UNIT
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
f_{max}	A	Q_A	$C_L = 15\text{ pF}$ $R_L = 400\ \Omega$ See Figure 1	32	42		J2	42		12	12		MHz
	B	Q_B		18			16			16			
t_{PLM}	A	Q_A		10	16		10	16		10	16		ns
t_{PHL}		Q_B		12	18		12	18		12	18		
t_{PLM}	A	Q_D		32	48		J2	48		46	70		ns
t_{PHL}		Q_C		14	50		34	50		46	70		
t_{PLM}	B	Q_B		10	16		10	16		10	16		ns
t_{PHL}		Q_C		14	21		14	21		14	21		
t_{PLM}	B	Q_C		21	32		10	16		21	32		ns
t_{PHL}		Q_D		23	35		14	21		23	35		
t_{PLM}	B	Q_D		21	32		21	32		34	61		ns
t_{PHL}		Q_C		23	35		23	36		34	61		
t_{PLM}	Set to 0	Any		20	40		26	40		26	40		ns
t_{PLM}	Set to 9	Q_A Q_D		20	30								ns
t_{PHL}		Q_B Q_C		26	24								

† f_{max} = maximum count frequency
 t_{PLM} = propagation delay time low to high level output
 t_{PHL} = propagation delay time high to low level output



TYPES SN5490A, SN5492A, SN5493A, SN54L90, SN54L93,
SN7490A, SN7492A, SN7493A, SN74L90, SN74L93
DECADE, DIVIDE-BY-TWELVE, AND BINARY COUNTERS

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



- NOTES
- A Input pulses are supplied by a generator having the following characteristics:
 - for 90A, 92A, 93A $t_r \leq 5$ ns, $t_f \leq 5$ ns, PRR = 1 MHz, duty cycle = 50%, $Z_{out} = 50$ ohms
 - for L90 $t_r \leq 10$ ns, $t_f \leq 10$ ns, PRR = 500 kHz, duty cycle = 50%, $Z_{out} = 50$ ohms
 - for L93 $t_r \leq 15$ ns, $t_f \leq 15$ ns, PRR = 100 kHz, duty cycle = 50%, $Z_{out} = 50$ ohms
 - B C_L includes probe and jig capacitance
 - C C1 (30 pF) is appl cable for timing L90 and L93
 - D All diodes are 1N91C or 1N3004
 - E Each reset input is tested separately with the other reset at 4.5 V
 - F Reference waveforms are shown with dashed lines
 - G For 90A, 92A and 93A $V_{ref} = 1.5$ V. For L90 and L93 $V_{ref} = 1.3$ V

FIGURE 1