บทที่ 3

การออกแบบและสร้างวงจร

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรต่างๆในเครื่องวิเคราะห์วงจรแบบดิจิทอล การออกแบบจะทำทีละภาคของแผนภาพของเครื่องที่แสดงในรูปที่ 2.3 ในการออกแบบวงจรต่างๆ เรามุ่งหวังที่จะให้ได้เครื่องวิเคราะห์วงจรที่มีคุณสมบัติดังนี้

3.1.1 ความผิดพลาดของการวัดอัตราขยายน้อยกว่า 0.01 โวลท์ต่อโวลท์โดย สามารถวัดอัตราขยายภายในช่วง 0.1 ถึง 10 เท่า

3.1.2 ความผิดพลาดของการวัดความแตกต่างมุมน้อยกว่า 1 องศา โดย ความแตกต่างของขนาดของสัญญาณเข้าทั้งสองน้อยกว่า 10 เท่า

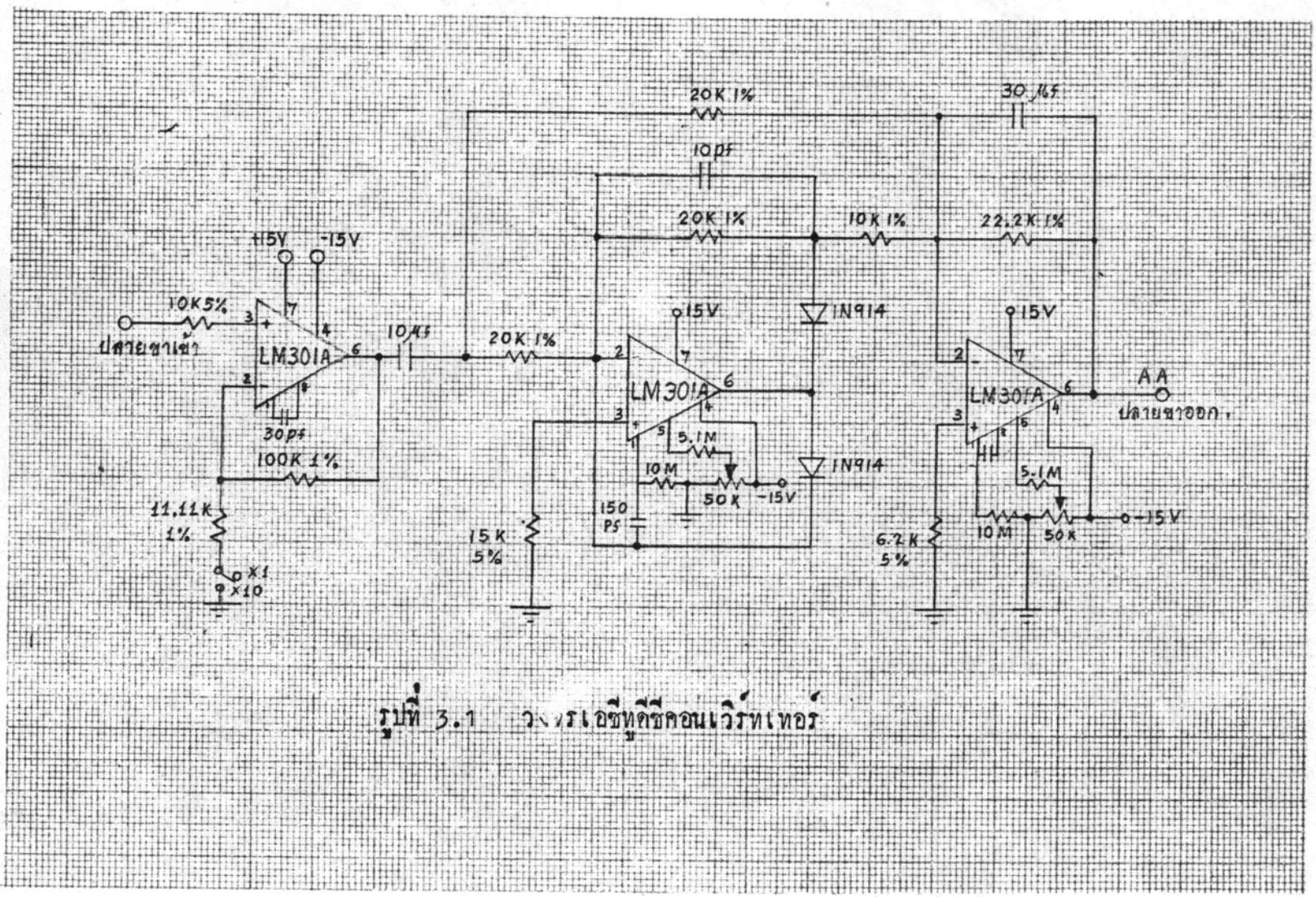
3.2 ภาคเอซีทูดีซี คอนเวิร์ทเทอร์

ภาคนี้ใช้เปลี่ยนขนาดแรงดันของสัญญาณกระแสสลับขาเข้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.1[3] วงจรที่แสดงนี้มีสัญญาณรบกวนต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ในย่านความถี่ 10 เฮิร์ท ถึง 100 กิโลเฮิร์ท ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในภาคแรกของส่วนวัดอัตราขยายโดยได้เพิ่มเติมวงจรบัฟเฟอร์แอมปริฟลายเออร์เข้าไปตรงปลายขาเข้าของวงจร ทำให้เราสามารถเลือกอัตราขยายให้เป็น 1 หรือ 10 เท่าได้ตามต้องการ

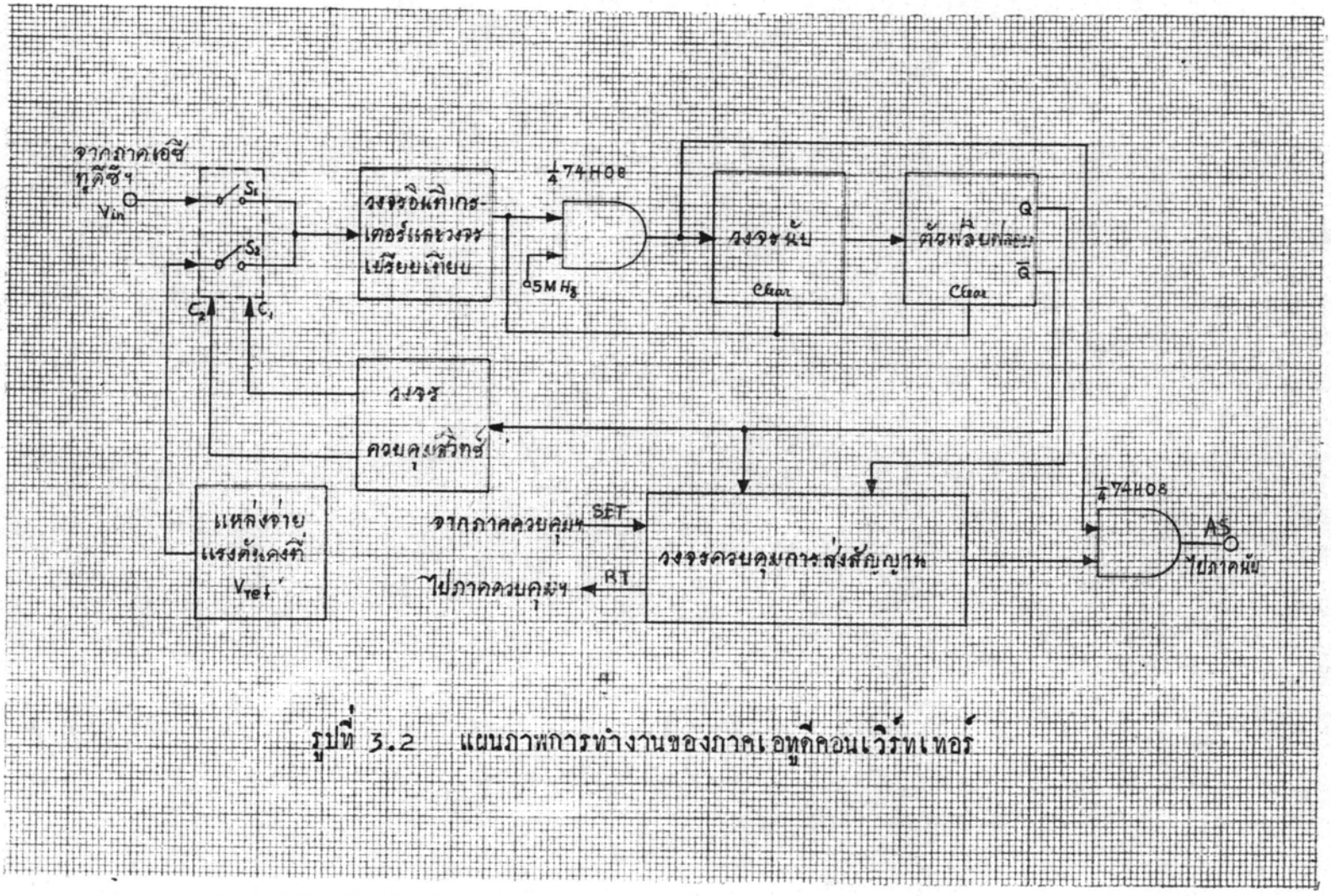
3.3 ภาคเอทูดี คอนเวิร์ทเทอร์

เนื่องจากภาคนี้ต้องการความแม่นยำสูง เราจึงเลือกใช้วิธีดูแอลสโลปอินทีเกรชั่น (Dual Slope Integration) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลาย แผนภาพการทำงานของวงจรเอทูดี คอนเวิร์ทแบบดูแอลสโลปอินทิเกรชั่นได้แสดงในรูปที่ 3.2 [4] หลักการทำ

0015552



รูปที่ 3.1 วงจรอิฐดิจิตอลเวิร์ทเทอร์



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของภาคเอทูดีคอนเวิร์ทเทอร์

งานของวงจรแบบนี้คือเมื่อมีสัญญาณเข้ามาตัวอินทิเกรเตอร์จะอินทิเกรทสัญญาณขาเข้า (Vin) ด้วยเวลาคงที่ T วินาที หลังจากนั้นจะอินทิเกรทแรงดันคงที่จนกระทั่งแรงดันขาออกของตัวอินทิเกรเตอร์เป็นศูนย์โวลท์ ดังนั้นแรงดันขาออกของตัวอินทิเกรเตอร์เมื่อสิ้นสุดเวลา T วินาที คือ

$$\text{แรงดันขาออก} = -\frac{1}{RC}\int_0^T V_{in}\,dt$$

$$= -\frac{V_{in}T}{RC} \qquad (3.1)$$

โดยค่า RC เป็นค่า Time constant ของตัวอินทิเกรเตอร์

หลังจากที่ตัวอินทิเกรเตอร์ได้อินทิเกรทแรงดันขาเข้าแล้ว ตัวอินทิเกรเตอร์จะอินทิเกรทแรงดันคงที่ (Vref) ดังนั้นในขณะนี้แรงดันขาออกที่เวลา t ใดๆหาได้จาก

$$\text{แรงดันขาออก} = -\frac{VinT}{RC} - \frac{1}{RC}\int_0^t Vref\,d\tau$$

$$= -\frac{VinT}{RC} - \frac{Vref}{RC}\,t \qquad (3.2)$$

ตัวอินทิเกรทจะอินทิเกรเตอร์จะอินทิเกรทแรงดันคงที่จนกระทั่งแรงดันขาออกเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า

$$\text{เวลาทั้งหมดที่อินทิเกรทแรงดันคงที่} = -\frac{VinT}{Vref} \qquad (3.3)$$

เราจะเห็นได้ว่าเวลาทั้งหมดที่อินทิเกรทแรงดันคงที่จะแปรผันโดยตรงกับขนาดของแรงดันขาเข้า (V_{in}) และช่วงเวลานี้จะต้องเป็นบวกเสมอ ดังนั้นแรงดันขาเข้าจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับแรงดันคงที่ เนื่องจากแรงดันขาเข้ามาจากภาคเอซี ทู ดีซี คอนเวิร์ทเทอร์จะเป็นบวกเสมอ ดังนั้นเมื่อเริ่มอินทิเกรทสัญญาณขาเข้าจะทำให้แรงดันขาออกของตัวอินทิเกรเตอร์เป็นลบ ขณะเดียวกันตัวเปรียบเทียบจะให้แรงดันขาออกเป็น "1" ทำให้วงจรนับเริ่มนับสัญญาณความถี่คงที่ 5เมกกะเฮิร์ท จนกระทั่งเต็มหลักทั้งหมดของวงจรนับจะทำให้ฟลิบฟลอบตัวสุดท้ายเปลี่ยนสภาวะ จะเป็นผลให้วงจรควบคุมสวิทช์ทำการเปิดสวิทช์ S_1 และปิดสวิทช์ S_2 ทำให้อินทิเกรเตอร์อินทิเกรทแรงดันคงที่ที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งจ่ายจาก

แหล่งจ่ายแรงดันคงที่จนกระทั่งแรงดันขาออกเป็นศูนย์แล้วตัวเปรียบเทียบจะเปลี่ยนสภาวะเป็น "0" ในขณะเดียวกันวงจรนับและฟลิบฟลอบก็จะถูกลบ (Clear) หมด ผลของการที่เราลบฟลิบฟลอบจะทำให้วงจรควบคุมสวิทช์ทำการปิดสวิทช์ S_1 และเปิดสวิทช์ S_2 ซึ่งทำให้อินทิเกรเตอร์เริ่มอินทิเกรทแรงดันขาเข้าอีกครั้งหนึ่ง

วงจรควบคุมการส่งสัญญาณทำหน้าที่ควบคุมการส่งสัญญาณความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ทไปยังภาคนับและมัลทิเพลกเซอร์ การส่งสัญญาณนี้จะส่งต่อเมื่อมีสัญญาณมาจากภาคควบคุม เมื่อภาคควบคุมส่งสัญญาณมาแล้วจะต้องรอจนกระทั่งอินทิเกรเตอร์เริ่มอินทิเกรทแรงดันคงที่วงจรนี้จึงควบคุมให้มีการส่งสัญญาณความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ทไปยังภาคนับและมัลทิเพลกเซอร์ และจะควบคุมให้หยุดส่งสัญญาณนี้เมื่ออินทิเกรเตอร์อินทิเกรทแรงดันคงที่จนกระทั่งแรงดันขาออกเป็นศูนย์โวลท์ หลังจากนั้นวงจรควบคุมการส่งสัญญาณจะส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุมและจะรอสัญญาณจากภาคควบคุมเพื่อทำการจัดส่งสัญญาณครั้งต่อไป

3.3.1 วงจรอินทิเกรเตอร์และตัวเปรียบเทียบ

เนื่องจากภาคเอทูดีคอนเวิร์ทเทอร์ที่จะออกแบบต้องการความแม่นยำหลายหลัก (Digit) จึงจำเป็นต้องออกแบบอินทิเกรเตอร์ให้สามารถทำงานได้ดีแม้จะต้องอินทิเกรทแรงดันขาเข้าและแรงดันคงที่เป็นเวลานานๆ ปกติเราเลือกให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เลี้ยงวงจรของไอซี ออบแอมป์ (I.C. Op-Amp) เป็น +15 และ -15 โวลท์ และเลือกขนาดของแรงดันขาออก (ไม่คิดเครื่องหมาย) ของอินทิเกรเตอร์เป็น 5 โวลท์เพื่อให้ออบแอมป์ยังทำงานในย่านเชิงเส้น ส่วนเวลาคงที่ T วินาทีที่ตัวอินทิเกรเตอร์อินทิเกรทแรงดันขาเข้านั้นเราต้องเลือกให้มันเป็นจำนวนเท่าของค่าของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในบ้านทั้งนี้เพื่อลดผลรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากคาบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับของประเทศไทยเป็น 0.02 วินาที ดังนั้นเราจึงเลือกเวลา T ให้เป็น 0.1 วินาที จากสมการ (3.1) ขนาดของแรงดันขาออกสูงสุดของตัวอินทิเกรเตอร์เกิดขึ้นเมื่ออินทิเกรเตอร์อินทิเกรทแรงดันขาเข้าที่มีขนาดสูงที่สุด (Vin(max)) นั่นคือ

$$\text{ขนาดแรงดันขาออกสูงสุด} = \left|\frac{Vin(max)T}{RC}\right|$$

ดังนั้น $RC = \frac{5 \times 0.1}{5}$

$= 0.1$ วินาที (3.4)

ในการเลือกคาพาซิเตอร์เราต้องใช้ชนิดที่มีกระแสรั่วไหลต่ำที่สุด และมีค่าใหญ่ [4] เราจึงเลือกคาพาซิเตอร์ที่ทำจากสารโพลิสตายรีน (Polystyrene) ขนาด 1 ไมโครฟารัด ดังนั้นจากสมการที่ (3.4) เราจะหาค่า R ได้เท่ากับ 0.1 เมกกะโอห์ม

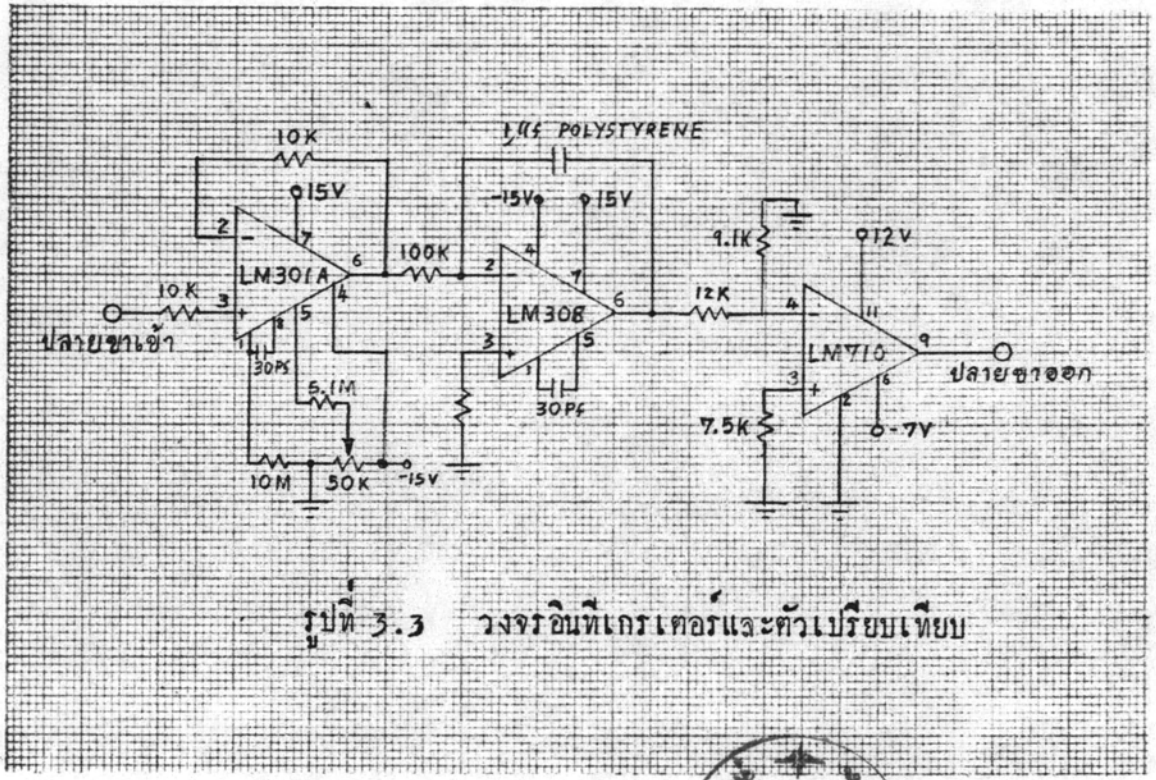
เนื่องจากค่าความต้านทานที่ใช้มีขนาดใหญ่และคาพาซิเตอร์ที่ใช้มีกระแสรั่วไหลต่ำ เราจะต้องเลือกไอซีออบแอม์ปที่มีกระแสไบอัสและกระแสออฟเซ็ทต่ำด้วย ในการออกแบบนี้เราเลือกใช้ไอซีเบอร์ LM308 ซึ่งเป็นไอซีออบแอม์ปที่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดและให้คุณสมบัติตามต้องการได้ดีกว่าไอซีเบอร์อื่นๆ ดังนั้นเราจึงใช้ไอซีเบอร์นี้มาประกอบเป็นตัวอินทิเกรเตอร์ การแก้ปัญหาแรงดันออฟเซ็ทของตัวอินทิเกรเตอร์เราใช้วงจรโวลเท็ตฟอโลเออร์ (Voltage follower) ที่ทำจากไอซีออบแอม์ปเบอร์ LM301A โดยต่อวงจรให้มีตัวปรับแรงดันขาออกในขณะที่แรงดันขาเข้าของวงจรเป็นศูนย์ เป็นตัวปรับแรงดันออฟเซ็ทและเป็นบัฟเฟอร์แอมปลิฟลายเออร์ (Buffer Amplifier) ให้แก่ตัวอินทิเกรเตอร์ และใช้ไอซีเบอร์ LM710 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่โวลเท็ตคอมพาเรเตอร์ (Voltage Comparator) ที่มีอัตราเร็วและความไวในการทำงานสูงมาทำเป็นตัวเปรียบเทียบวงจรอินทิเกรเตอร์ และตัวเปรียบเทียบที่ได้ออกแบบนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3

3.3.2 วงจรนับและฟลิบฟลอบ

เนื่องจากวงจรนี้ทำหน้าที่นับเวลาที่ตัวอินทิเกรเตอร์อินทิเกทแรงดันขาเข้าจนครบ 0.1 วินาที และเราใช้สัญญาณที่จะนับมีความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ท เพื่อที่จะให้ได้เวลาเป็น 0.1 วินาที ความถี่ของสัญญาณขาออกของวงจรนับจะต้องเป็น 10 เฮิร์ท ดังนั้นวงจรนับจะทำหน้าที่หารความถี่จาก 5 เมกกะเฮิร์ทให้เป็น 10 เฮิร์ท

วงจรนับจะต้องหารด้วยค่าคงที่ $= \frac{5 \times 10^6}{10}$

$= 5 \times 10^5$



รูปที่ 3.3 วงจรอินทีเกรเตอร์และตัวเปรียบเทียบ

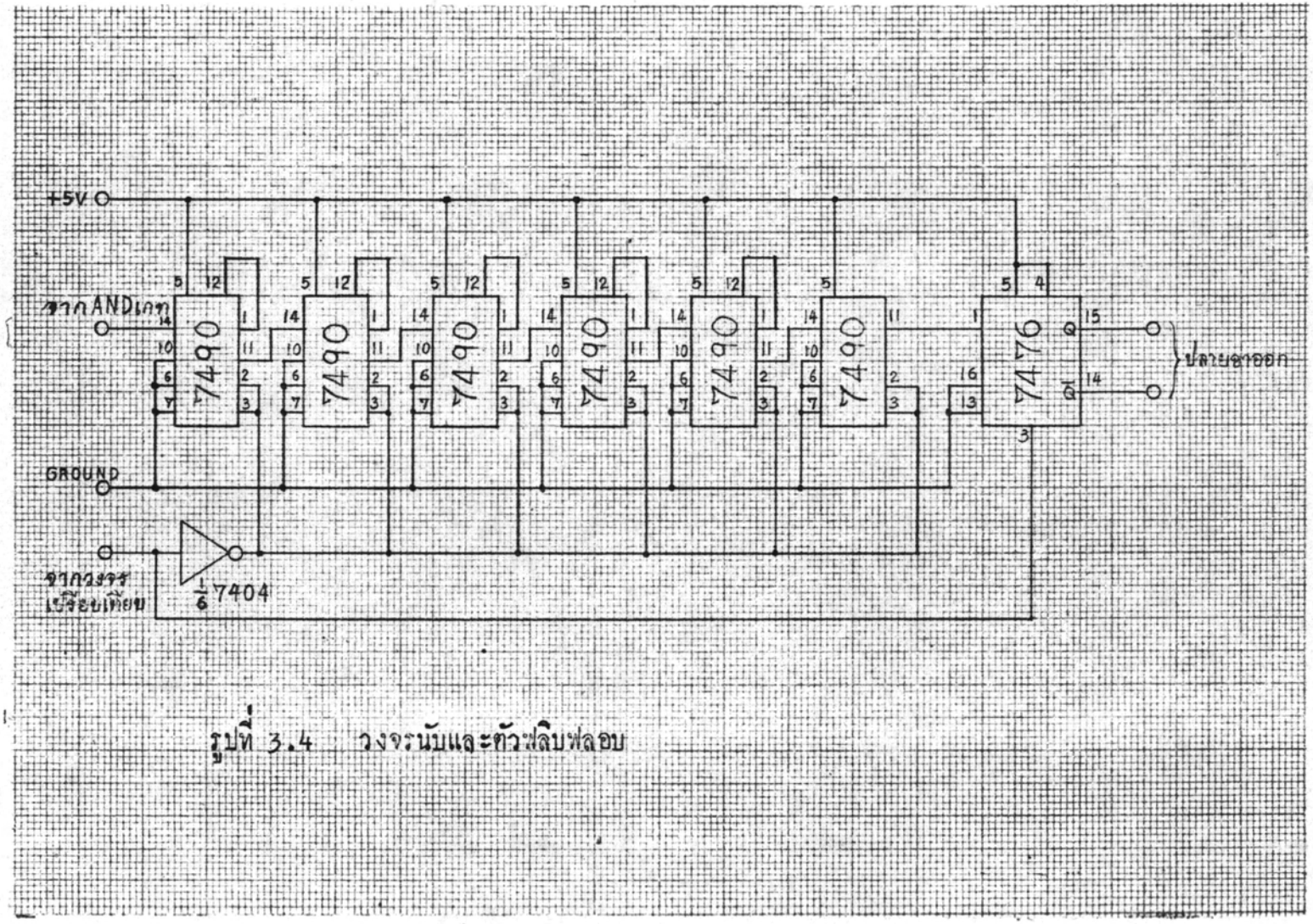
สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นั่นคือเราต้องสร้างวงจรนับสิบห้าตัวและวงจรนับห้าหนึ่งตัว เราเลือกใช้ไอซีเบอร์ 7490 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้เป็นตัวนับสิบมาต่อแคสเคด (cascade) กันห้าตัว โดยต่อขาสัญญาณเข้าที่ฟลิบฟลอบ A ของไอซีและต่อสัญญาณขาออกของฟลิบฟลอบ A เข้ากับปลายขาเข้าของฟลิบฟลอบ B ในไอซีตัวเดียวกัน แล้วจึงเอาสัญญาณขาออกของฟลิบฟลอบ D ต่อไปยังขาเข้าของฟลิบฟลอบ A ของไอซีตัวถัดไป ส่วนตัวนับห้าเราใช้ไอซีเบอร์ 7490 โดยต่อสัญญาณขาเข้าที่ปลายขาเข้าของฟลิบฟลอบ B และต่อปลายขาออกของฟลิบฟลอบ D เป็นปลายส่งสัญญาณให้ตัวฟลิบฟลอบตัวสุดท้ายของวงจร ในการลบ (clear) วงจรนับเราจะเอาสัญญาณจากตัวเปรียบเทียบมาผ่านตัวอินเวิร์ทเทอร์แล้วไปต่อเข้ากับขา 2 และ 3 ของไอซีทุกตัวในวงจรนับ ในขณะเดียวกันก็ต่อขา 6 และ 7 ของไอซีทุกตัวกับสายดิน (ground) วงจรนับและตัวฟลิบฟลอบที่ได้ออกแบบแสดงในรูปที่ 3.4

ตัวฟลิบฟลอบที่ใช้เราใช้ไอซีเบอร์ 7476 ซึ่งเป็น JK Master Slave Flipflop เราต่อขา J เป็น "1" และขา K เป็น "0" ดังนั้นหลังจากฟลิบฟลอบถูกลบ (clear) โดยวงจรเปรียบเทียบแล้วและมีสัญญาณจากวงจรนับเข้ามาแทนที่ขา 'clock' ของฟลิบฟลอบหนึ่งลูกคลื่นจะทำให้ปลาย Q ของฟลิบฟลอบเป็น "1" หลังจากนั้นจะมีสัญญาณจากวงจรนับกี่ลูกคลื่นก็ตามขา Q ของฟลิบฟลอบจะยังคงเป็น "1" เสมอจนกว่าจะมีสัญญาณมาลบ

3.3.3 วงจรควบคุมสวิทช์และตัวสวิทช์

วงจรนี้ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดปิดสวิทช์ S_1 และ S_2 เพื่อที่จะส่งสัญญาณที่ถูกต้องเข้าสู่วงจรอินทิเกรเตอร์ เนื่องจากการเปลี่ยนสัญญาณที่จะอินทิเกรทต้องการความเร็วมากเพื่อให้ผลผิดพลาดของภาคเอาต์พุตน้อยๆ เราจึงใช้สวิทช์อิเลคโทรนิคเพราะมีความเร็วในการทำงานสูง สวิทช์ที่ใช้เป็นไอซีเบอร์ CD4016 ซึ่งเป็นอนาลอกสวิทช์สี่ตัวในไอซีตัวเดียว ในการทำงานแรงดันที่จะให้ผ่านสวิทช์นี้จะต้องอยู่ภายในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เลี้ยงตัวสวิทช์ เนื่องจากเราต้องปล่อยแรงดันขาเข้าซึ่งเป็นบวกและแรงดันคงที่ซึ่งเป็นลบผ่านเข้าตัวอินทิเกรเตอร์ ดังนั้นเราจึงจ่ายแรงดันเลี้ยงสวิทช์นี้ที่ +7 และ -7 โวลท์ ผลก็คือแรงดันควบคุมการเปิดปิดสวิทช์จะต้องอยู่ในระดับ +7 และ -7 โวลท์ด้วย



รูปที่ 3.4 วงจรนับและตัวฟลิปฟลอป

ในการควบคุมสวิทช์เราใช้ไอซีเบอร์ LM311 ซึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบระดับแรงดันทำหน้าที่เปรียบเทียบระดับแรงดันจากขา $\bar{Q}$ ของตัวฟลิบฟลอบว่าเป็น "0" หรือ "1" โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงไอซีตัวนี้ที่ระดับ +7 และ -7 โวลท์ ดังนั้นเมื่อ $\bar{Q}$ ของตัวฟลิบฟลอบเป็น "1" ปลายขาออกจะเป็น -7 โวลท์ และเมื่อ $\bar{Q}$ เป็น "0" ปลายขาออกจะเป็น 7 โวลท์ ปลายขาออกของตัวเปรียบเทียบจะต่อกับวงจรอีมิทเตอร์ฟอโลเออร์และวงจรอินเวิร์ทเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ปลายขาออกของอีมิทเตอร์ฟอโลเออร์จะเป็นปลายควบคุมการเปิดปิดสวิทช์ตัวที่ต่อกับแรงดันคงที่เข้าสู่อินทิเกรเตอร์ ส่วนปลายขาออกของวงจรอินเวิร์ทเตอร์จะต่อกับปลายควบคุมการเปิดปิดสวิทช์ ตัวที่ต่อกับแรงดันขาเข้า วงจรควบคุมสวิทช์และตัวสวิทช์ที่ได้ออกแบบได้แสดงในรูปที่ 3.5

3.3.4 แหล่งจ่ายแรงดันคงที่

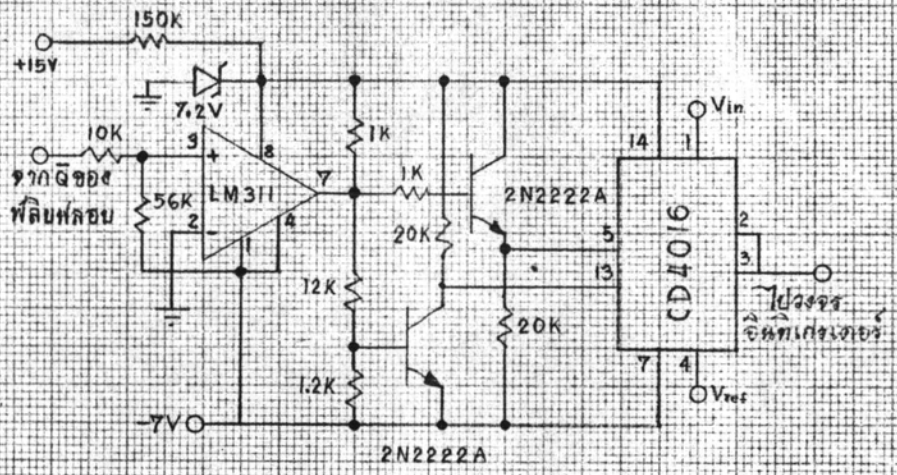
แหล่งจ่ายแรงดันนี้ต้องการเสถียรภาพสูงและต้องการแรงดันที่ค่อนข้างเรียบ จากสมการ (3.3) ถ้าเราต้องการให้เวลาในการอินทิเกรทสูงสุดเป็น 0.5 วินาที เราจะหาขนาดของแรงดันคงที่ได้โดยเวลาสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันขาเข้ามีขนาดสูงสุด

$$V_{ref} = \frac{-V_{inT}}{t(max)}$$

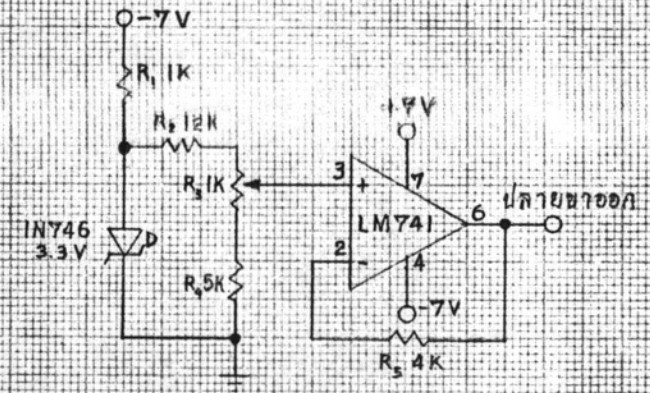
$$= \frac{-5 \times 0.1}{0.5}$$

$$= -1 \quad \text{โวลท์}$$

เนื่องจากขนาดของแรงดันคงที่ที่ใช้ต่ำ เราจึงใช้วงจรแรงดันคงที่ที่ใช้ไอซีออบแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เราต่อออบแอมป์แบบโวลเท็ตฟอโลเออร์ซึ่งมีอัตราขยายเป็นหนึ่งและมีความต้านทานขาเข้าสูงมาก โดยมีซีเนอร์ไดโอด D ทำหน้าที่รักษาแรงดันคงที่ ดังนั้นแรงดันคงที่นี้จะถูกบั่นทอนระดับลงโดยความต้านทาน R_2, R_3 และ R_4 เราสามารถปรับระดับแรงดันที่จะให้เข้าปลายขาเข้าของออบแอมป์ได้โดยปรับความต้านทาน R_3 ซึ่งยังผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายขาออกของออบแอมป์เปลี่ยนแปลงไปด้วย เนื่องจากเวลาจายกระแสตัวไอซีออบแอมป์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสโดยไม่กระทบกระเทือนกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดเลย ดังนั้นระดับแรงดันที่ได้จะค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับขนาดของโหลด ตัวความต้านทาน R_5 ใช้ลดปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากอุณหภูมิของวงจร



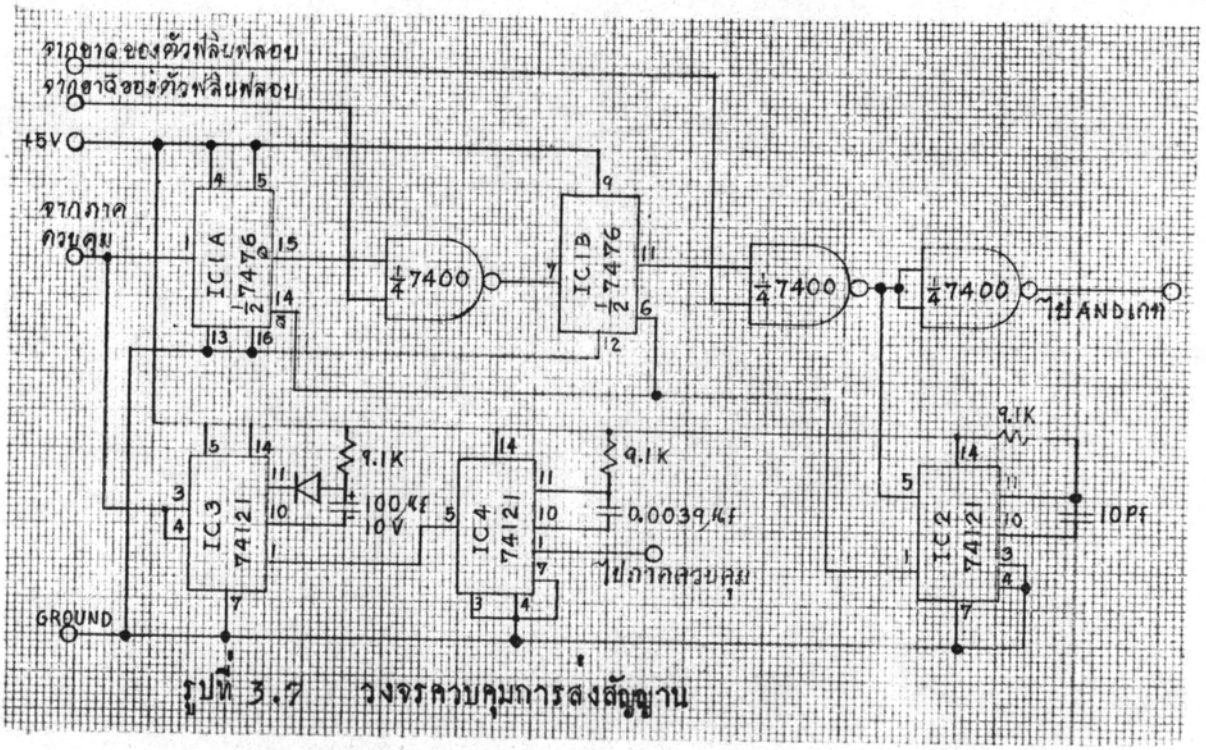
รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมสวิทช์และตัวสวิทช์



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ -1 โวลท์

3.3.5 วงจรควบคุมการส่งสัญญาณ

เมื่อมีสัญญาณจากภาคควบคุมมา วงจรนี้มีหน้าที่เตรียมส่งสัญญาณความถี่ 5 เมกกะเฮิร์ทไปยังภาคนับและมัลทิเพลกเซอร์ การส่งนี้จะเริ่มเมื่อขา Q ของตัวฟลิบฟลอบของวงจรนับฯเริ่มเป็น "1" โดยเปลี่ยนจาก "0" และจะสิ้นสุดการส่งโดยสิ้นเชิงเมื่อขา Q ของตัวฟลิบฟลอบกลับเป็น "0" หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุม ในขณะเดียวกันจะรอสัญญาณจากภาคควบคุมครั้งต่อไป ผลของการออกแบบวงจรควบคุมการส่งสัญญาณได้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในวงจรนี้ตัว IC1A เป็น JK ฟลิบฟลอบทำหน้าที่รับสัญญาณจากภาคควบคุม เมื่อมีสัญญาณจากภาคควบคุมเข้ามาแล้วและสัญญาณจากขา $\bar{Q}$ ของตัวฟลิบฟลอบของวงจรนับฯ เป็น "1" จะทำให้ขา Q ของ IC1B เป็น "1" หลังจากนั้นเมื่อ $\bar{Q}$ ของตัวฟลิบฟลอบของวงจรนับเป็น "0" และขา Q เป็น "1" ปลายขาออกของวงจรควบคุมการส่งสัญญาณจะเป็น "1" ตามขา Q ของฟลิบฟลอบของวงจรนับฯ เมื่อขา Q ของฟลิบฟลอบของวงจรนับเป็น "0" ปลายขาออกของวงจรควบคุมการส่งสัญญาณจะเป็น "0" ด้วย ในขณะนี้ IC2 ซึ่งเป็นไอซีทำหน้าที่เป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียร จะทำงานโดยส่งสัญญาณไปลบ (clear) JK ฟลิบฟลอบทั้งสองตัวของ IC1



รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมการส่งสัญญาน

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากภาคเอทูดีคอนเวิร์ทเทอร์ในเครื่องฯมีอยู่ 2 ชุด และส่งสัญญาณให้แก่ภาคนับแต่ละอันพร้อมๆกับทั้งสองอัน ส่วนวงจรส่งสัญญาณให้แก่ภาคควบคุมฯจะมีเพียงชุดเดียวและต้องส่งสัญญาณเมื่อภาคเอทูดีฯทั้งสองส่งสัญญาณไปยังภาคนับเรียบร้อยแล้ว เราจึงลดปัญหายุ่งยากในการตรวจจับว่ามันลงสัญญาณไปยังภาคนับ ฯ เรียบร้อยหรือยังโดยการยืดเวลาหลังจากที่วงจรควบคุมการส่งสัญญาณรับสัญญาณจากภาคควบคุมมาสักครู่หนึ่งแล้วจึงส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุม เนื่องจากเวลาที่นานที่สุด – ที่เกิดขึ้นได้นับตั้งแต่ภาคควบคุมส่งสัญญาณมาจนกระทั่งภาคเอทูดีฯส่งสัญญาณไปยังภาคนับฯเสร็จสิ้นเกิดขึ้นในกรณีที่แรงดันขาเข้าของภาคเอทูดีฯสูงที่สุด และขณะที่ภาคควบคุมส่งสัญญาณเข้ามายังภาคเอทูดีฯพอดีกับเป็นเวลาที่อินทิเกรเตอร์อินทิเกรทแรงดันขาเข้าพึ่งจะเสร็จสิ้นพอดี ดังนั้นเวลาที่นานที่สุดจะหาได้จาก

เวลานานที่สุด = สองเท่าของเวลาที่อินทิเกรทVref นานที่สุด + เวลาที่อินทิเกรทแรงดันขาเข้า

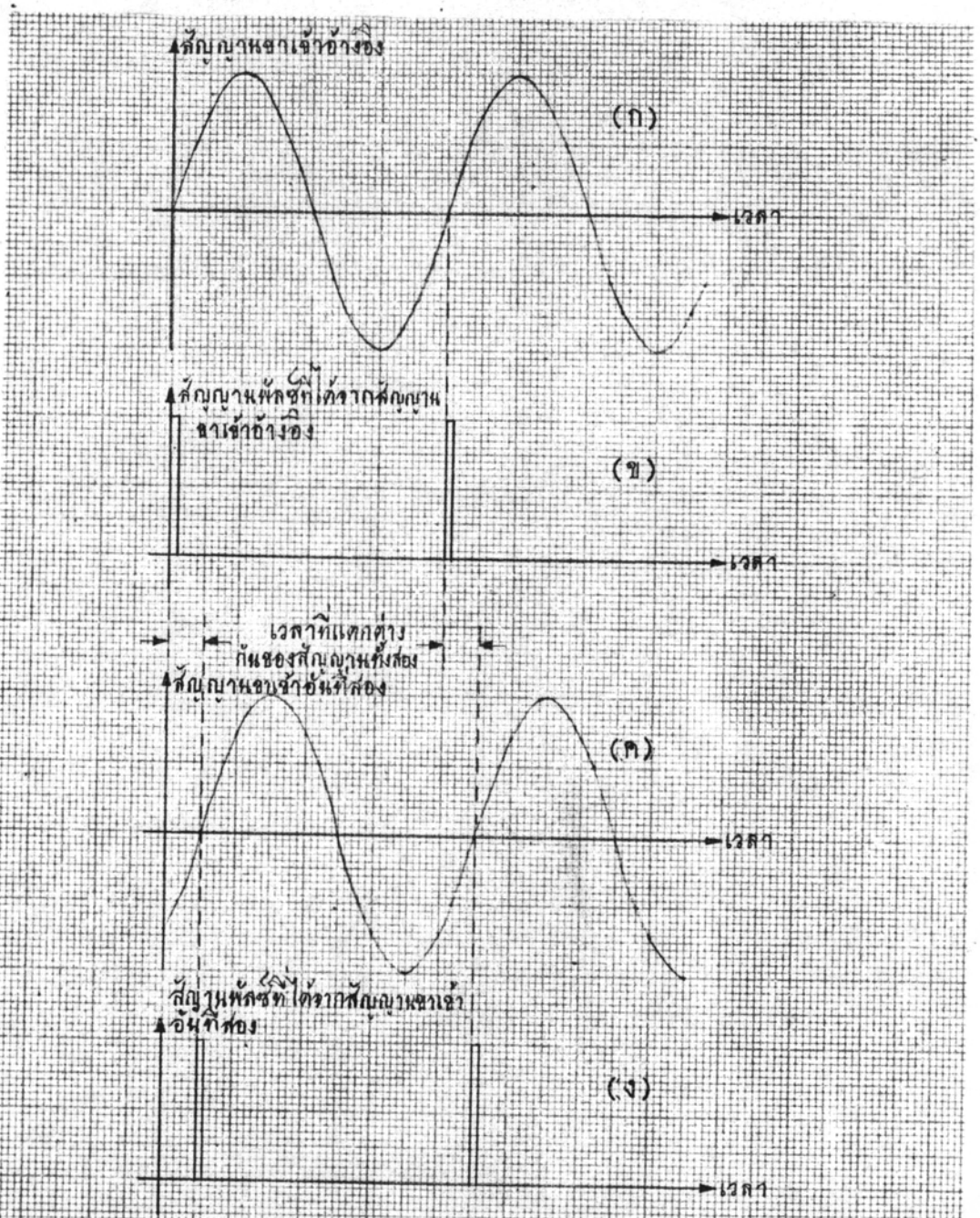
= 2x0.5+0.1

= 1.1 วินาที

ถ้าเรายืดเวลาหลังจากที่ภาคควบคุมส่งสัญญาณมาสัก 2 วินาที เราจะแน่ใจได้ว่าถ้าเราส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุมในขณะนี้ ภาคเอทูดีทั้งสองชุดได้ส่งสัญญาณไปยังภาคนับฯเรียบร้อยแล้ว จากรูปที่ 3.7 ตัว IC3 ซึ่งเป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรจะทำหน้าที่ยืดเวลา ส่วนตัว IC4 จะเป็นตัวส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุม อนึ่ง IC3 และ IC4 จะมีแต่เฉพาะภาคเอทูดีฯชุดใดชุดหนึ่งเท่านั้น

3.4 ภาคตรวจจับความแตกต่างของมุม

ในการตรวจจับความแตกต่างของมุม เราจะใช้วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของสัญญาณ (Zero crossing detector) ทั้งสองเพื่อสร้างสัญญาณพัลซ์ที่มีความกว้างแคบมากๆ ตรงจุดที่สัญญาณผ่านระดับศูนย์อันที่สัญญาณเริ่มเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 3.8 แล้วเอาสัญญาณที่ได้ชุดหนึ่งเป็นตัวตั้งฟลิบฟลอบ ส่วนอีกชุดหนึ่งเป็นตัวลบฟลิบฟลอบ เราจะได้สัญญาณขาออกของฟลิบฟลอบเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับเวลาที่สัญญาณขาเข้าทั้งสองต่างกัน[5] เมื่อมีสัญญาณมาจากภาคควบคุมวงจรนี้จะสร้างสัญญาณพัลซ์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับสิบเท่าของคาบ



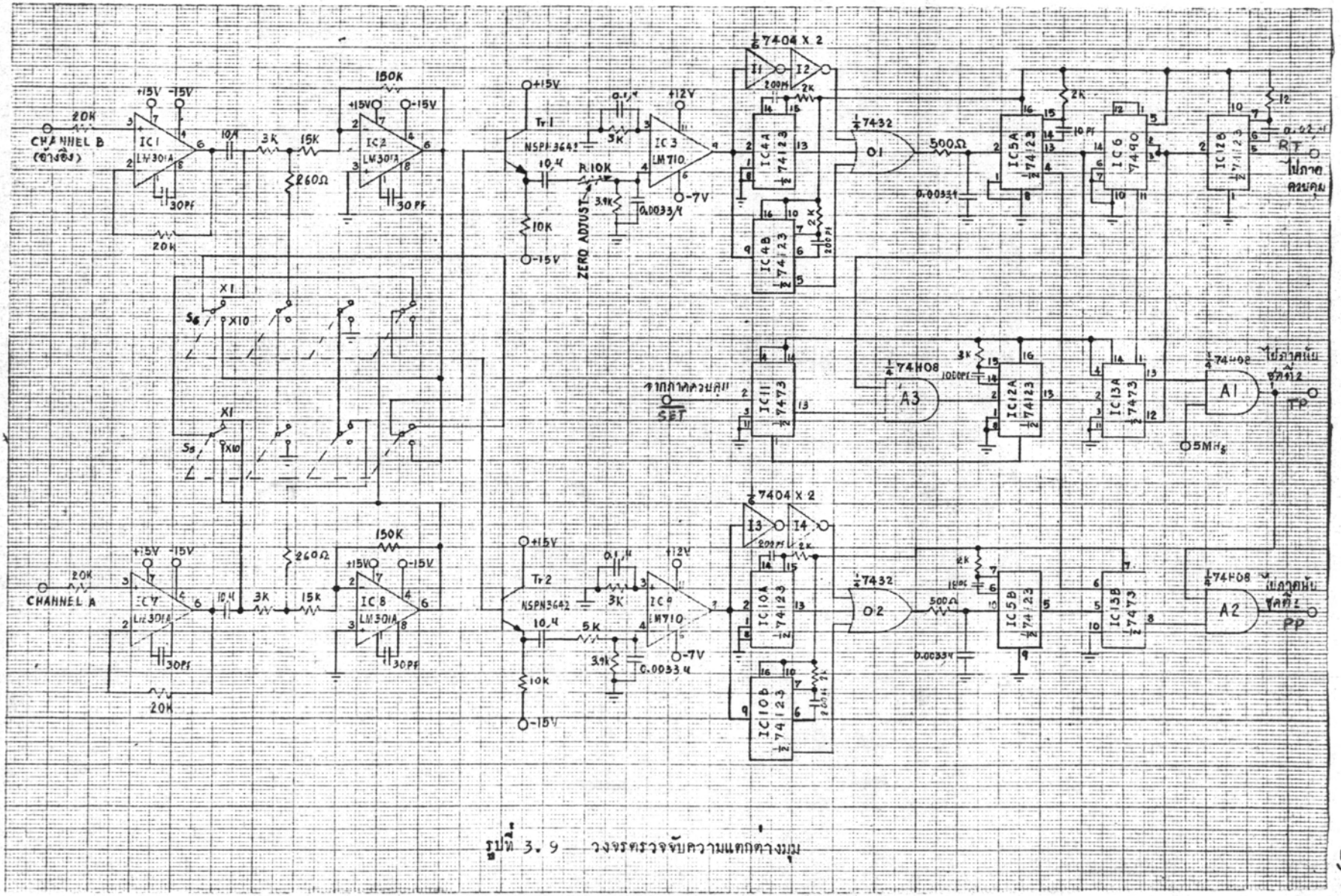
รูปที่ 3.8 ภาพแสดงสัญญาณขาเข้าและพัลซ์ที่สร้างขึ้นในวงจรตรวจจับความแตกต่างมุม

(ก) และ (ค) เป็นสัญญาณขาเข้า

(ข) และ (ค) เป็นพัลซ์ที่สร้างขึ้นจากสัญญาณในรูป (ก) และ (ค)ตามลำดับ

ของสัญญาณขาเข้า เอาสัญญาณที่ได้นี้ไปควบคุมการปล่อยความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ทเข้าสู่ภาคนับๆอันแรก ในขณะเดียวกันก็จะปล่อยความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ทผ่านเข้าสู่ภาคนับอันที่สองซึ่งควบคุมการปล่อยโดยสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับเวลาที่สัญญาณขาเข้าทั้งสองต่างกันสิบลูกคลื่น เมื่อส่งสัญญาณไปยังภาคนับเสร็จแล้ววงจรนี้จะต้องส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุมต่อไป

วงจรตรวจจับความแตกต่างมุมที่ได้ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 3.9 โดยในที่นี้ตัว IC1 และ IC7 เป็นโวทเท็ตฟอโลเออร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์แอมปริฟลายเออร์ IC2 และ IC8 เป็นแอมปริฟลายเออร์ที่มีอัตราขยายเป็นสิบ ซึ่งจะใช้ต่อเมื่อสัญญาณขาเข้ามีขนาดในการใช้งาน IC2 และ IC8 จะใช้งานพร้อมกันโดยสัญญาณปลายใดที่ไม่ต้องการขยายจะถูกบั่นทอนไปสิบเท่าก่อนที่จะเข้าตัวแอมปริฟลายเออร์ และในกรณีที่ต้องการขยายสัญญาณทั้งสองอันวงจรที่ใช้ในการบั่นทอนสัญญาณจะถูกตัดทิ้งไป ทรานซิสเตอร์ Tr1 และ Tr2 ทำหน้าที่เป็นตัวอีมิตเตอร์ฟอโลเออร์ซึ่งมีอิมพิแดนซ์ขาออกต่ำ IC3 และ IC9 จะทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบว่าสัญญาณที่เข้าตัวไอซีมีศักดาสูงกว่าศูนย์โวลท์หรือไม่ ถ้าสูงกว่าศูนย์โวลท์แรงดันขาออกของตัวไอซีจะมีแรงดันในระดับ "1" เนื่องจากแรงดันขาออกของ IC3 และ IC9 มีสัญญาณรบกวนบริเวณที่ใกล้ๆจุดเปลี่ยนระดับแรงดัน เราแก้ปัญหานี้โดยใช้อินเวิร์ทเทอร์ I1 กับ I2 และ IC4A , IC4B กับ OR เกท 01 สำหรับสัญญาณที่ออกจาก IC3และใช้อินเวิร์ทเทอร์ I3 กับ I4 และ IC10A , IC10B กับ OR เกท 02 สำหรับสัญญาณที่ออกจาก IC9 โดยที่ IC4A และ IC10A เป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรชนิดรีทริกเกอร์เรเบิลซึ่งจะสร้างพัลซ์เมื่อแรงดันขาเข้าของตัวมันเปลี่ยนจากระดับ "0" เป็น "1" ส่วน IC4B และIC10B เป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรชนิดรีทริกเกอร์เรเบิล ซึ่งจะทำงานเมื่อสัญญาณขาเข้าเปลี่ยนแรงดันจากระดับ "1" ไปเป็น "0" โดยมี IC5A และ IC5B ซึ่งเป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรมาทำหน้าที่สร้างพัลซ์แคบๆ ขนาดความกว้างน้อยกว่า 1 ไมโครวินาที เมื่อแรงดันขาเข้าของมันเปลี่ยนจากระดับ "0" เป็น "1" สัญญาณของขา 4 ของ IC5A ไปตั้งสัญญาณที่ขา 8 ของ IC13B ซึ่งเป็น JK ฟลิบฟลอบให้เป็น "0" ดังนั้นสัญญาณที่ขา 8 ของ IC13B จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างของรูปคลื่นเท่ากับเวลาที่ต่างกันของสัญญาณขาเข้าทั้งสองของวงจร



รูปที่ 3.9 วงจรตรวจจับความแตกต่างเฟส

เมื่อมีสัญญาณจากภาคควบคุมเข้ามาสัญญาณนี้จะไปตั้งแรงดันที่ขา 13 ของ IC11 ให้เป็น "1" ดังนั้นเมื่อมีพัลซ์จาก IC5A เข้ามายัง AND เกท A3 จะทำให้เกิดพัลซ์มาทำให้ IC12A ซึ่งเป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรสร้างพัลซ์ขนาดความกว้างประมาณ 2 ไมโครวินาทีไปตั้งฟลิบฟลอบใน IC13A ให้ขา 13 มีระดับแรงดันเป็น "1" และลบสัญญาณที่ขา 13 ของ IC11 ให้เป็น "0" ในขณะนี้ขา 13 ของ IC13A จะเป็น "0" ซึ่งจะทำให้ IC6 ซึ่งเป็นไอซีนับสิบเริ่มนับสัญญาณจาก IC5A เมื่อมี IC6 นับพัลซ์ที่สิบที่เข้ามาจะส่งสัญญาณกลับไปลบฟลิบฟลอบใน IC13A ให้มีแรงดันที่ขา 13 เป็น "0" ดังนั้นระดับแรงดันที่ขา 13 ของ IC13A จะเป็น "1" นานเท่ากับ 10 เท่าของคาบของสัญญาณขาเข้าของวงจร เพราะฉนั้นจะเห็นได้ว่าสัญญาณขาออกของ AND เกท A1 จะมีจำนวนพัลซ์แปรผันโดยตรงกับเวลาของคาบสัญญาณเข้าของวงจรและจำนวนพัลซ์ที่ขาออกของ AND เกท A2 จะมีจำนวนพัลซ์แปรผันโดยตรงกับเวลาที่ต่างกันของสัญญาณเข้าทั้งสองของวงจร หลังจากที่ขา 13 ของ IC13A เปลี่ยนระดับแรงดันจาก "1" เป็น "0" เรียบร้อยแล้ว IC12B ทำหน้าที่สร้างพัลซ์แคบๆโดยเริ่มสร้างที่เวลาที่ระดับแรงดันขาเข้าเปลี่ยนจาก "1" เป็น "0" พอดี สัญญาณอันนี้จะเป็นตัวบอกภาคควบคุมว่าส่งผลการวัดไปยังภาคนับฯเสร็จสิ้นแล้ว ความต้านทาน R ใช้เป็นตัวปรับให้สัญญาณขาออกของ AND เกทA2 เป็นศูนย์เมื่อสัญญาณขาเข้าทั้งสองของวงจรมีความแตกต่างมุมเป็นศูนย์

3.5 ภาคนับและมัลทิเพลกเซอร์

ภาคนับและมัลทิเพลกเซอร์ทำหน้าที่นับสัญญาณความถี่คงที่ 5 เมกกะเฮิร์ทที่ส่งมาจากภาคเอทูดีฯ หรือภาคตรวจจับความแตกต่างมุมโดยนับให้อยู่ในระบบเลขฐานสิบ จำนวนลูกคลื่นที่ส่งเข้ามานี้มีปริมาณมากที่สุดในกรณีที่เราวัดความแตกต่างของมุมโดยความถี่ของสัญญาณขาเข้าของเครื่องฯเป็น 10 เฮิร์ท ซึ่งทำให้จำนวนพัลซ์ที่ส่งจากภาคตรวจจับความถี่ของมุมมากถึง 5 ล้านลูกคลื่น เนื่องจากส่งพัลซ์เข้ามาสิบเท่าของคาบของสัญญาณซึ่งเป็นเวลานานถึง 1 วินาที ดังนั้นปริมาณพัลซ์ที่ถูกส่งออกจะเป็น 5 เมกกะเฮิร์ทหารด้วย 1 วินาที ดั้งนั้นเราจึงออกแบบให้วงจรนับมีจำนวนหลักถึง 7 หลักในฐานสิบ หลังจากนับเสร็จแล้วภาคควบคุมจะส่งสัญญาณ

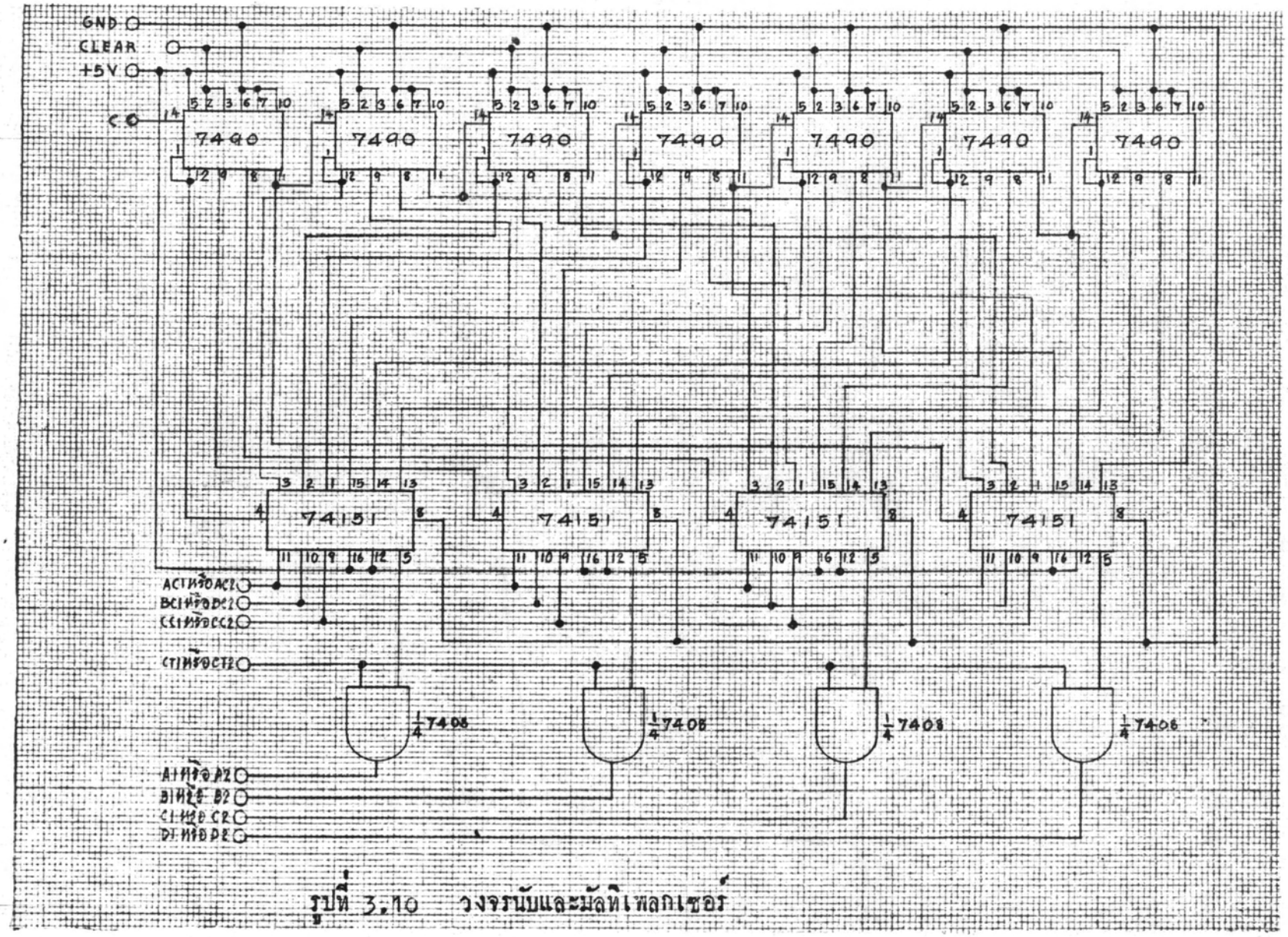
มาให้วงจรนี้แยกส่งสัญญาณออกไปทีละหลักจากหลักหลังสุดไปหลักแรก (หลักที่ใหญ่กว่าจะถูกส่งก่อน) เมื่อจะเริ่มนับใหม่ภาคควบคุมจะสั่งให้ภาคนับฯลบหน่วยความจำในวงจรนับเสียก่อน

ในการออกแบบเราใช้ไอซีเบอร์ 7490 ซึ่งเป็นไอซีนับสิบมาทำหน้าที่ตัวนับจำนวนลูกคลื่นโดยใช้ไอซีเบอร์นี้ 7 ตัว และใช้ไอซีเบอร์ 74151 ซึ่งเป็นตัวเลือกต่อสัญญาณขาออกของมันเข้ากับปลายขาเข้าขาใดขาหนึ่งใน 8 ขา (8 to 1 Line Multiplecer) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแต่ละหลักโดยใช้ไอซีเบอร์นี้ 4 ตัว แต่ละตัวจะทำหน้าที่เลือกส่งรหัสตัวใดตัวหนึ่งในรหัส 4 ตัว ของระบบเลข BCD ของหลักที่จะเลือกจากไอซีเบอร์ 7490 และใช้ 'AND' เกท อีกสี่ตัวเป็นตัวควบคุมว่าจะส่งสัญญาณออกไปยังภาคดีโคดเดอร์ หรือไม่โดยเอาสัญญาณจากภาคควบคุมมาเป็นตัวควบคุม วงจรนับและมัลติเพลกเซอร์ที่ออกแบบไว้ได้แสดงในรูปที่ 3.10

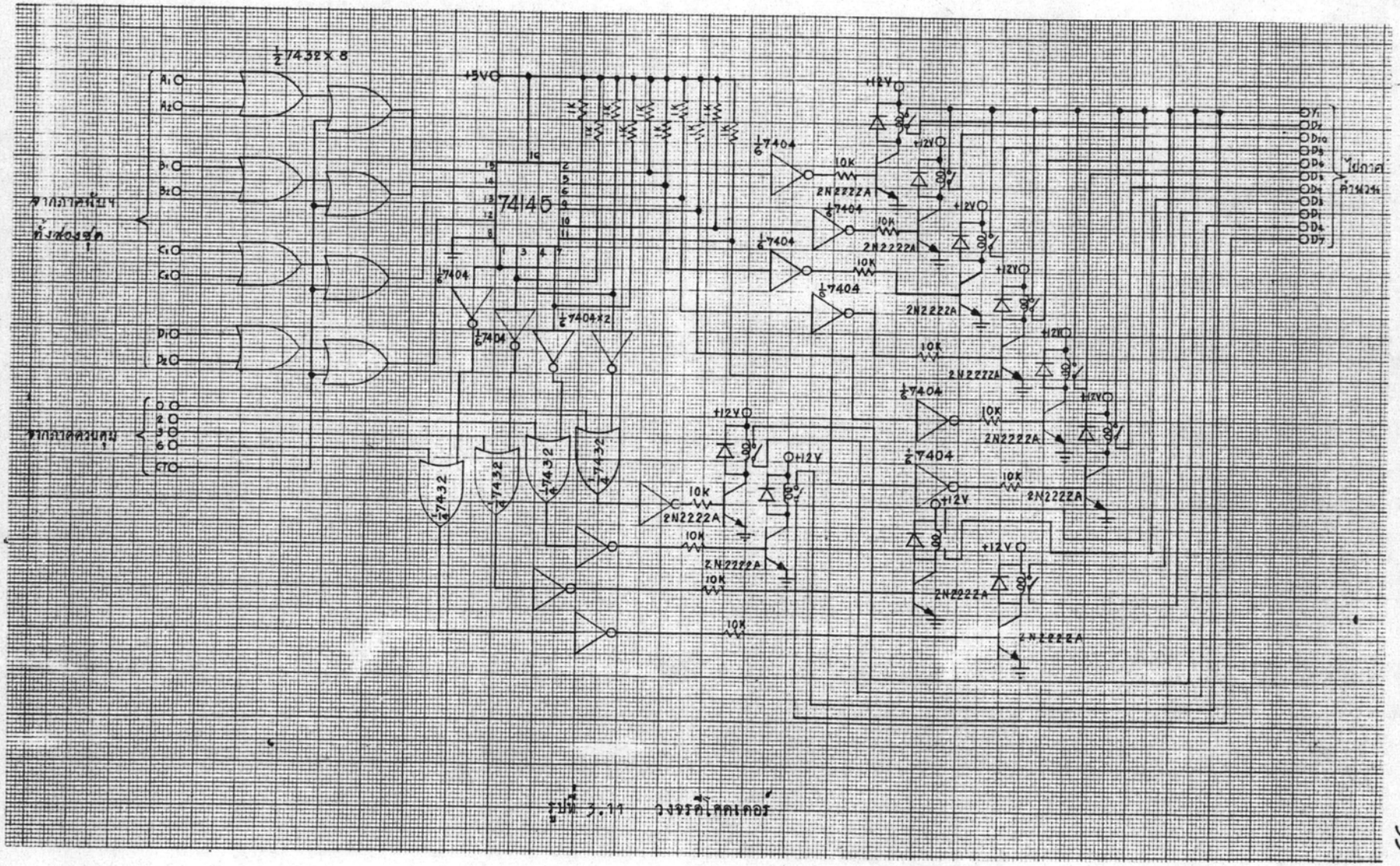
3.6 ภาคดีโคดเดอร์

ภาคดีโคดเดอร์ทำหน้าที่แปรรหัสที่ส่งมาจากภาคนับฯอันใดอันหนึ่งโดยจะแปรรหัสเฉพาะเวลาที่ภาคควบคุมสั่งเท่านั้น การแปรรหัสจะแปรรหัสจากรหัส BCD ไปเป็นรหัสเลขฐานสิบ ถ้าแปรรหัสตรงกับเลขใดในระบบเลขฐานสิบจะต้องไปควบคุมการปิดสวิทช์ที่ตรงกับตำแหน่งของตัวเลขหลักนั้น นอกจากนี้สวิทช์ที่ตรงกับเลข 0,2,3 และ 6 จะต้องถูกควบคุมเปิดปิดสวิทช์จากภาคควบคุมได้โดยตรงอีกชั้นหนึ่ง สวิทช์เหล่านี้จะถูกต่อกับปลายที่เป็นที่รับข้อมูลตัวเลขของภาคคำนวนฯ

เนื่องจากภาคนับฯแต่ละภาคจะส่งข้อมูลมายังภาคดีโคดเดอร์ที่ละภาค ในขณะที่ภาคควบคุมไม่สั่งให้ส่งข้อมูล ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นศูนย์หมด ดังนั้นปลายรับข้อมูลจะใช้ OR เกท เป็นตัวรับข้อมูล ในขณะเดียวกันคำสั่งให้แปรรหัสจะสั่งให้มีการส่งผลลัพธ์เป็นชวงๆโดยส่งสัญญาณจากภาคควบคุมให้เป็น "0" และ "1" สลับกันไป ถ้าเราให้เวลาที่สัญญาณควบคุมเป็น "1" เป็นการสั่งไม่ให้แปรรหัสส่วน "0" ตรงกันข้ามกันแล้วเราจะใช้ OR เกท 1 ตัวสำหรับรหัสหนึ่งตัวของรหัสเลข BCD โดยปลายอีกอันของเกทต่อกับสัญญาณควบคุมนี้ ดังนั้นในขณะที่ไม่ต้องการให้มีการแปรรหัสจะทำให้ปลายขาเข้าของตัวแปรรหัสเป็น "1" ทั้งสี่ปลาย



รูปที่ 3.10 วงจรนับและมัลติเพลกเซอร์



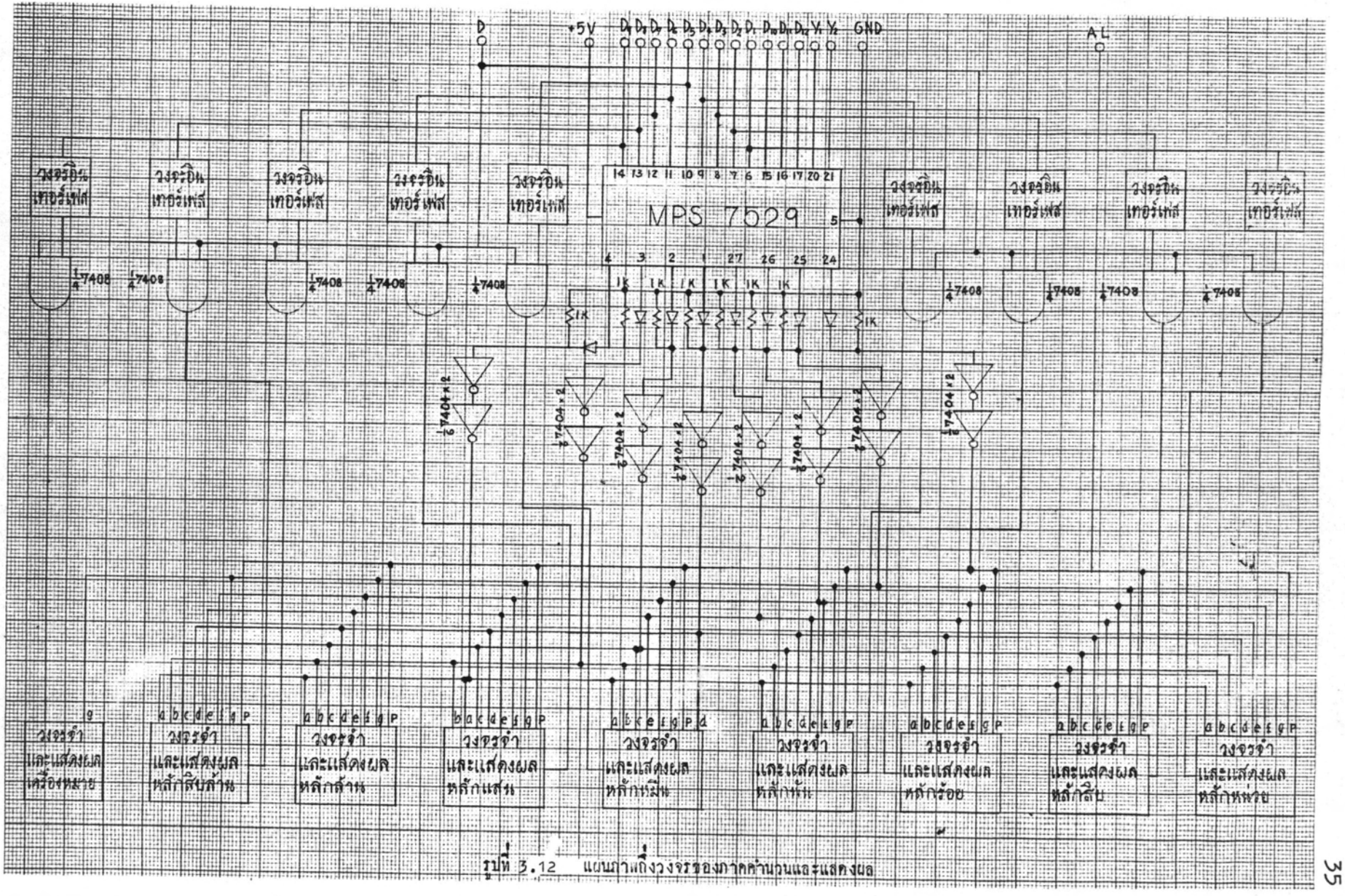
รูปที่ 3.11 วงจรไดรเวอร์

เราใช้ไอซีเบอร์ 74145 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปรรหัสของระบบเลข BCD ไปเป็นรหัสระบบเลขฐานสิบเป็นตัวแปรรหัส เนื่องจากการออกแบบโดยทั่วไปเราใช้ระบบโพซิทีฟโลจิค (Positive Logic) ดังนั้นเราจึงเอาสัญญาณออกของตัวแปรรหัสไปผ่านอินเวิร์ทเตอร์เสียก่อน ทั้งนี้เพราะสัญญาณขาออกของไอซีเบอร์ 74145 เป็นเนกเกทีฟโลจิค (Negative Logic) หลังจากนั้นจะเอาปลายที่มีรหัส 0,2,3และ 6 จากภาคควบคุมมาเข้า OR เกทกับรหัส 0,2,3 และ 6 ที่มาจากตัวแปรรหัสตามลำดับ ผลที่ได้จะผ่านเข้าวงจรรีเลย์ไดรฟเวอร์ (Relay driver) ต่อไป วงจรดีโคดเดอร์ที่ได้ออกแบบแสดงในรูปที่ 3.11

3.7 ภาคคำนวนและแสดงผล

สำหรับภาคคำนวนและแสดงผลเราใช้ไอซีเบอร์ MPS7529 ซึ่งเป็นแคลคูเลเตอร์ชิพที่สามารถคำนวน Scientific Function เป็นตัวคำนวน จากการศึกษาพบว่าการป้อนข้อมูลตัวเลขเข้าตัวไอซีนี้จะต้องให้เวลาทำงานของไอซีครั้งละ 0.2 วินาที ก่อนที่จะป้อนข้อมูลครั้งต่อไป และเวลาในการทำงานของฟังก์ชั่นคำนวนแต่ละอันก็ไม่เท่ากันซึ่งจะกินเวลานานกว่า 0.2 วินาที แต่ไม่เกิน 2 วินาที

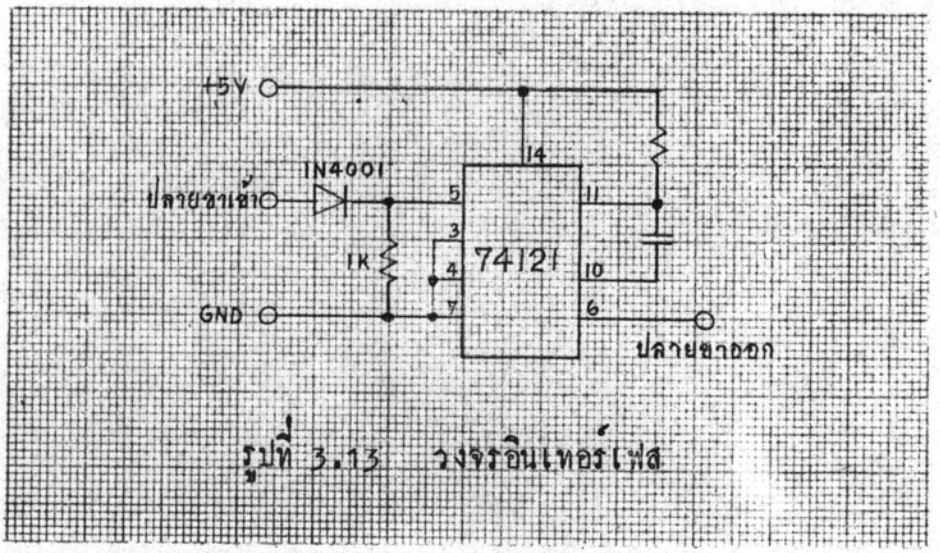
ในการแสดงผลเราต้องการให้แสดงผลลัพธ์ของการคำนวนทุกๆครั้งที่คำนวนเสร็จสิ้นและผลลัพธ์ของการคำนวนครั้งล่าสุดจะถูกรักษาไว้จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ของการคำนวนครั้งต่อไป แต่ไอซีเบอร์ MPS7529 มีสัญญาณขาออกอยู่ในรูปของการมัลทิเพลกทางเวลา (Time Multiplex) ดังนั้นเราจึงใช้ AND เกทมาเป็นตัวควบคุมการส่งผลไปยังส่วนแสดงผล และใช้ D ฟลิบฟลอบเป็นตัวเก็บผลลัพธ์ของการคำนวน สัญญาณขาออกของ D ฟลิบฟลอบจะผ่านเข้าตัวไดรฟเวอร์เพื่อไปไดรฟ LED อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากการส่งสัญญาณจากตัวคำนวนซึ่งเป็นไอซีชนิด MOS ไปยังไอซีต่างๆในวงจรซึ่งทำจากเทคนิคทาง TTL เราจะใช้ไดโอดต่อโดยเอาปลายอาโนดเข้ากับปลายขาออกของตัวคำนวน แล้วต่อคาโถดเข้ากับปลายขาเข้าของตัวไดรฟเวอร์ซึ่งทำจากอินเวิร์ทเตอร์สองตัว และต่อความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์มระหว่างคาโถดของไดโอดกับกราวน์ ส่วนขาดิจิทไดรฟเวอร์ (Digit driver) ของไอซีคำนวนจะผ่านเข้าสู่วงจรอินเทอร์เฟส (Interface) เพื่อเชื่อมโยงและแปลงรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.12 แผนภาพถึงวงจรของภาคคำนวนและแสดงผล

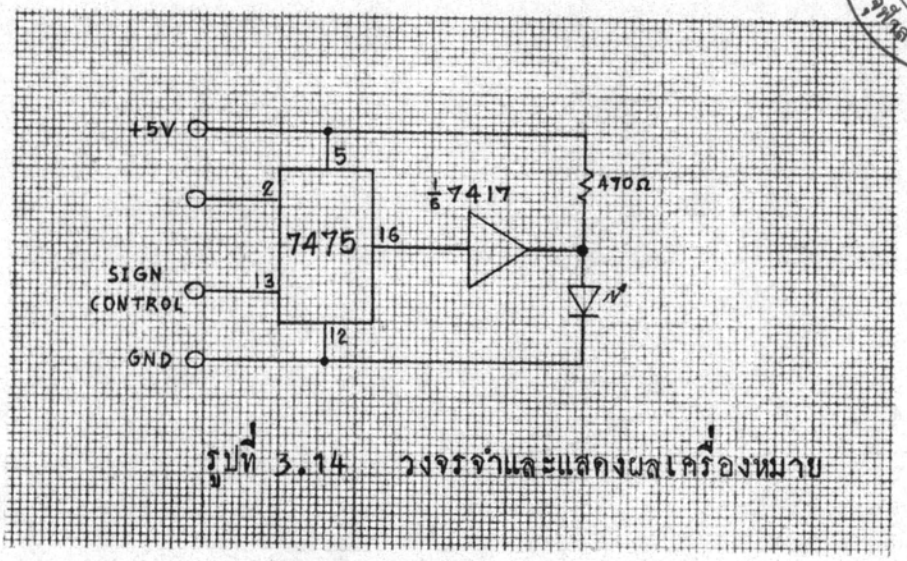
ให้มีความกว้างน้อยลง แผนภาพกึ่งวงจรของภาคคำนวนและแสดงผลได้ แสดงในรูปที่ 3.12

3.7.1 วงจรอินเทอร์เฟส วงจรนี้ทำหน้าที่สร้างพัลซ์แคบๆที่จะไปควบคุมการการจำข้อมูลทั้งหมดในหลักใดหลักหนึ่งเมื่อมีสัญญาณเข้ามา เนื่องจากวงจรนี้ทางปลายขาเข้าต่อกับปลายขาออกของไอซีเบอร์ MPS7529 ดังนั้นมันจะต้องสามารถทำงานได้แม้กระแสเข้าและออกของปลายขาเข้า (Input Sink and Source current) มีขนาดต่ำ ดังนั้นเราจึงใช้ไอซีเบอร์ SN74121 เป็นตัวอินเทอร์เฟสโดยใช้ไดโอดเป็นตัวป้องกันกระแสไหลออกของปลายขาเข้าขณะที่สัญญาณขาเข้าเป็น "0" ในขณะที่สัญญาณขาเข้าเป็น "0" ปลายขาเข้าของไอซีเบอร์ SN74121 จะเป็น "0" ตามด้วย-เนื่องจากผลของความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์มที่ต่อระหว่างปลายขาเข้ากับกราวน์ วงจรอินเทอร์เฟสที่ออกแบบได้แสดงในรูปที่ 3.13



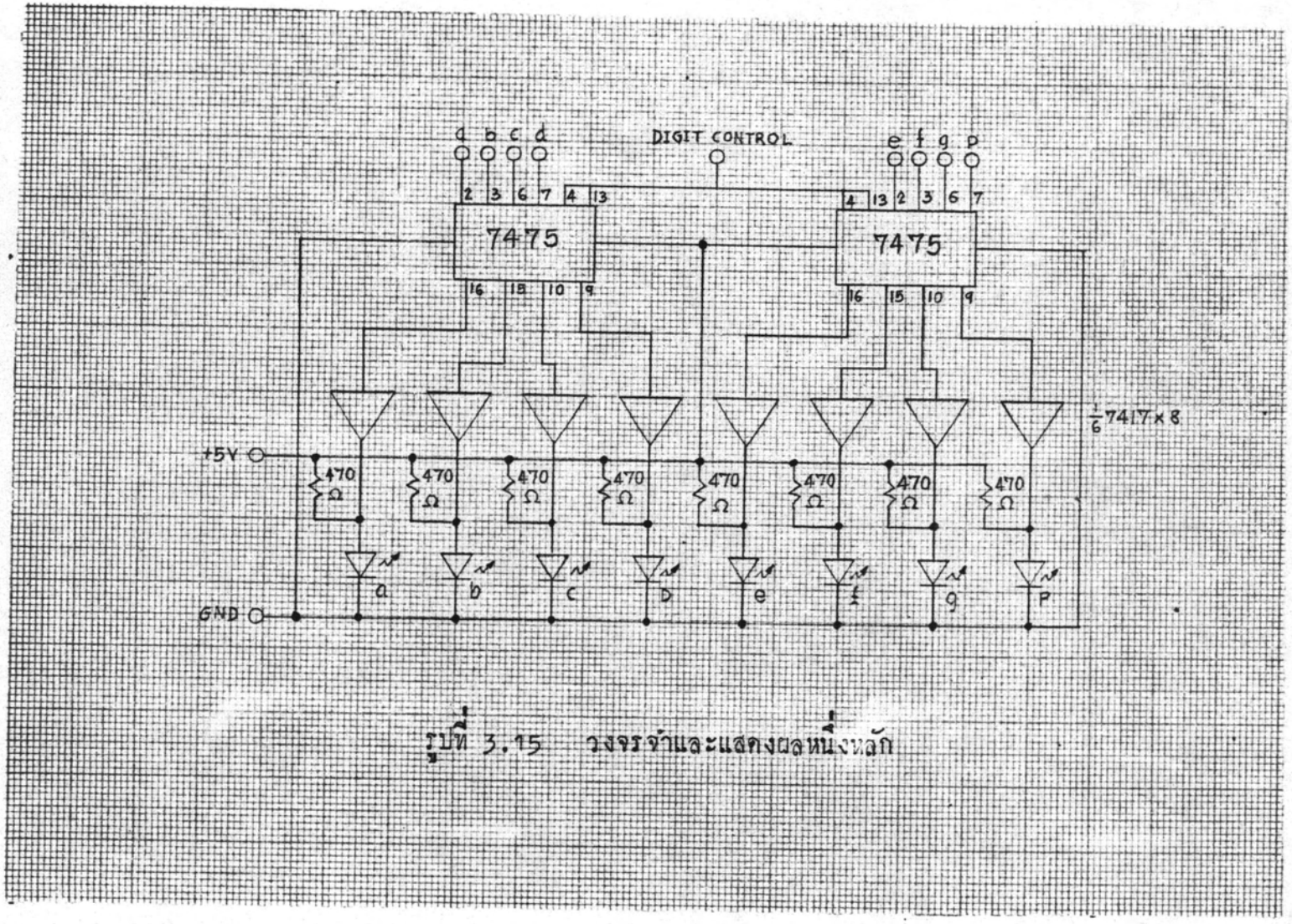
รูปที่ 3.13 วงจรอินเทอร์เฟส

3.7.2 วงจรจำและแสดงผลเครื่องหมาย วงจรนี้ทำหน้าที่จำเครื่องหมายของผลลัพธ์ ข้อมูลของเครื่องหมายจะเกิดขึ้นในขณะที่สัญญาณที่ขา 6 ของไอซีเบอร์ MPS7529 เป็น "1" เราจะเอาสัญญาณจาก AND เกทที่ตรงกับสัญญาณที่ขา 6 ของไอซีเบอร์ MPS7529 นี้มาเป็นตัวควบคุมให้ D ฟลิบฟลอบจำสัญญาณขาเข้าของวงจรนี้ สัญญาณที่ได้จะผ่านเข้าตัวไดรฟ์ LED วงจรจำที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรจำและแสดงผลเครื่องหมาย

3.7.3 วงจรจำและแสดงผลของหลักต่างๆ ส่วนนี้จะคล้ายกับวงจรจำและแสดงผลเครื่องหมาย เพียงแต่สัญญาณควบคุมหลักตรงกับขา 7,8,9,10,11,12,13 และ 14 ของไอซีเบอร์ MPS7529 ซึ่งตรงกับหลักสิบล้าน,ล้าน,แสน,หมื่น,พัน,ร้อย,สิบ และหน่วยตามลำดับ เนื่องจากการแสดงผลแต่ละหลักแสดงโดย Seven Segment LED ดังนั้นเราจึงต้องมี D ฟลิบฟลอบและตัวไดรฟ์เวอร์สำหรับจำและแสดงผลหลักต่างๆ 8 ชุด ต่อหนึ่งหลัก วงจรจำและแสดงผลหนึ่งหลักได้แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรจำและแสดงผลหนึ่งหลัก

3.8 ภาคควบคุม

สำหรับภาคควบคุมนี้เราจัดแบ่งออกได้เป็นสี่ส่วนใหญ่ๆคือ

ก. วงจรรับสัญญาณและควบคุมการมัลทิเพลก

ข. วงจรควบคุมการคำนวนเฟส

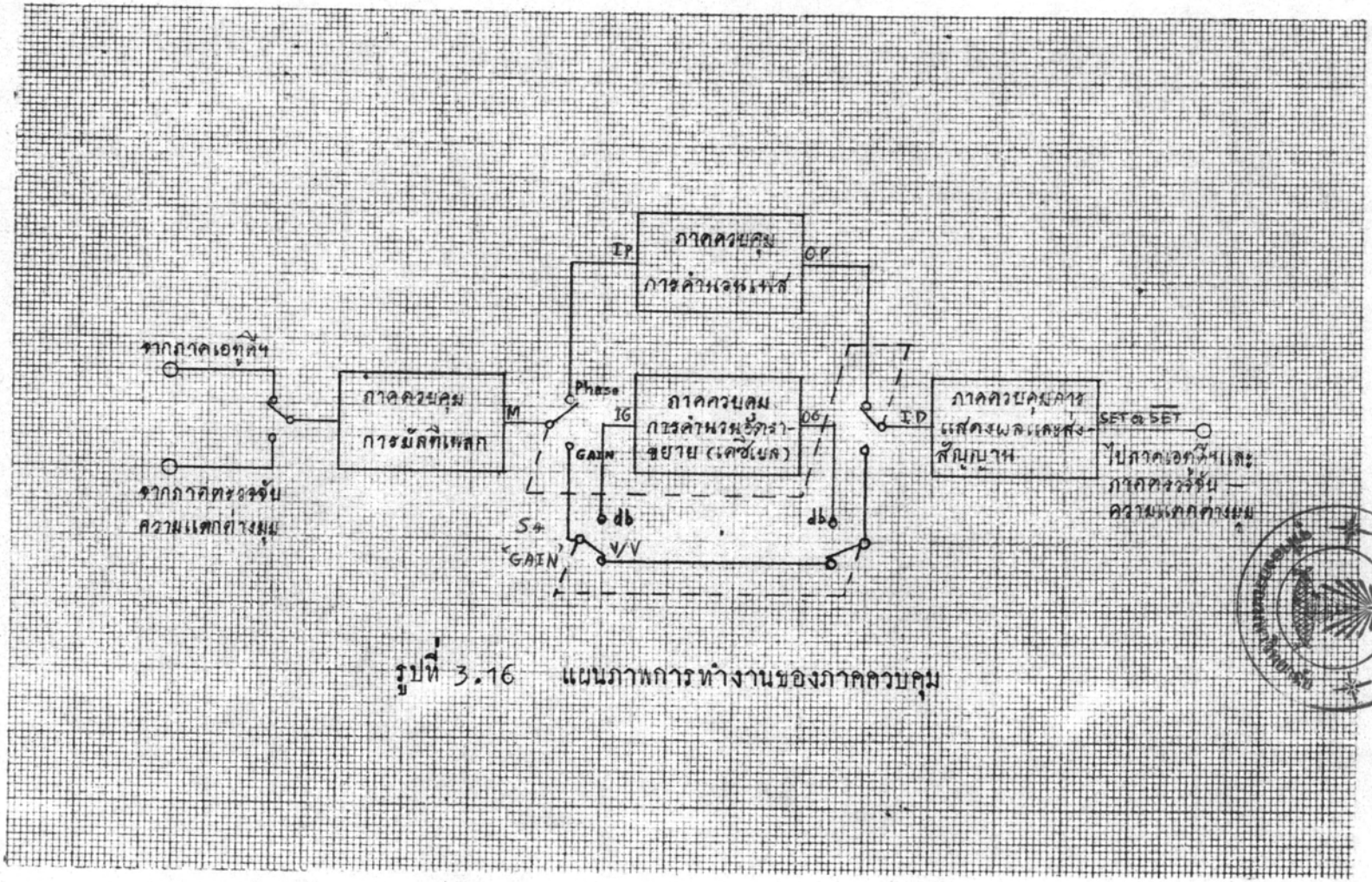
ค. วงจรควบคุมการคำนวนอัตราขยาย

ง. วงจรควบคุมการแสดงผลและส่งสัญญาณ

วงจรทั้งสี่ประกอบกันเป็นแผนภาพของภาคควบคุมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.16

3.8.1 วงจรรับและควบคุมการมัลทิเพลก เนื่องจากไอซีเบอร์ MPS7529 ใช้เวลาระหว่างการรับข้อมูลเข้า 2 อัน ประมาณ 0.2 วินาที เราจึงจำเป็นที่จะต้องส่งสัญญาน ไปภาคดีโคดเดอร์เป็นช่วงๆโดยใช้สัญญาณความถี่ประมาณ 2 เฮิร์ท ที่สมมาตรเป็นตัวควบคุมการดีโคด ในขณะเดียวกันเราจะส่งสัญญาณอันนี้เข้าสู่ตัวนับซึ่งนับในระบบเลขฐานสองได้ 3 บิท 2 ชุด แต่ละชุดจะไปควบคุมภาคนับๆชุดใดชุดหนึ่งให้มัลทิเพลกสัญญาณออกมา โดยจะต้องมัลทิเพลกภาคนับๆทีละชุด ดังนั้นผลที่ได้คือภาคดีโคดเดอร์จะส่งสัญญาณไปให้ภาคคำนวนเป็นระยะๆ

ในการรับสัญญาณเราใช้ JK ฟลิบฟลอบเป็นตัวรับสัญญาณ เมื่อมีสัญญาณเข้ามาสัญญาณจากฟลิบฟลอบจะควบคุมการปล่อยสัญญาณความถี่ 2 เฮิร์ทเข้าสู่วงจรนับซึ่งใช้ไอซีเบอร์ SN7493 ตอนนี้สัญญาณควบคุมการมัลทิเพลกจะต้องเป็น "1" เมื่อตัวนับเริ่มนับจนเป็น "1" ทั้งสามบิทแล้วปลายขาออกของ AND เกท ตัวที่ควบคุมการส่งสัญญาณความถี่ 2 เฮิร์ทจะเป็น "0" ในขณะเดียวกันจะไปสั่งให้ไอซีเบอร์ 74121 ซึ่งเป็นไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรทำงาน โดยสร้างพัลซ์ขนาดความกว้าง 0.5 วินาที สัญญาณพัลซ์นี้จะไป 'clear' ฟลิบฟลอบ และเมื่อ 'NAND' กับสัญญาณ 2 เฮิร์ทแล้ว จะใช้เป็นตัวสั่งให้ส่งข้อมูล "หาร" ให้ภาคคำนวนอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็จะเป็นสัญญาณขาเข้าของชุดควบคุมการมัลทิเพลกสัญญาณในภาคนับอีกชุดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนที่ได้กล่าวมาแล้ว จะแตกต่างกันก็ตรงที่สัญญาณที่ออกจากไอซีเอนกระรัวจะไป 'clear' ฟลิบฟลอบและไปตั้งฟลิบฟลอบอีกตัวหนึ่งให้มีขา Q เป็น "1"



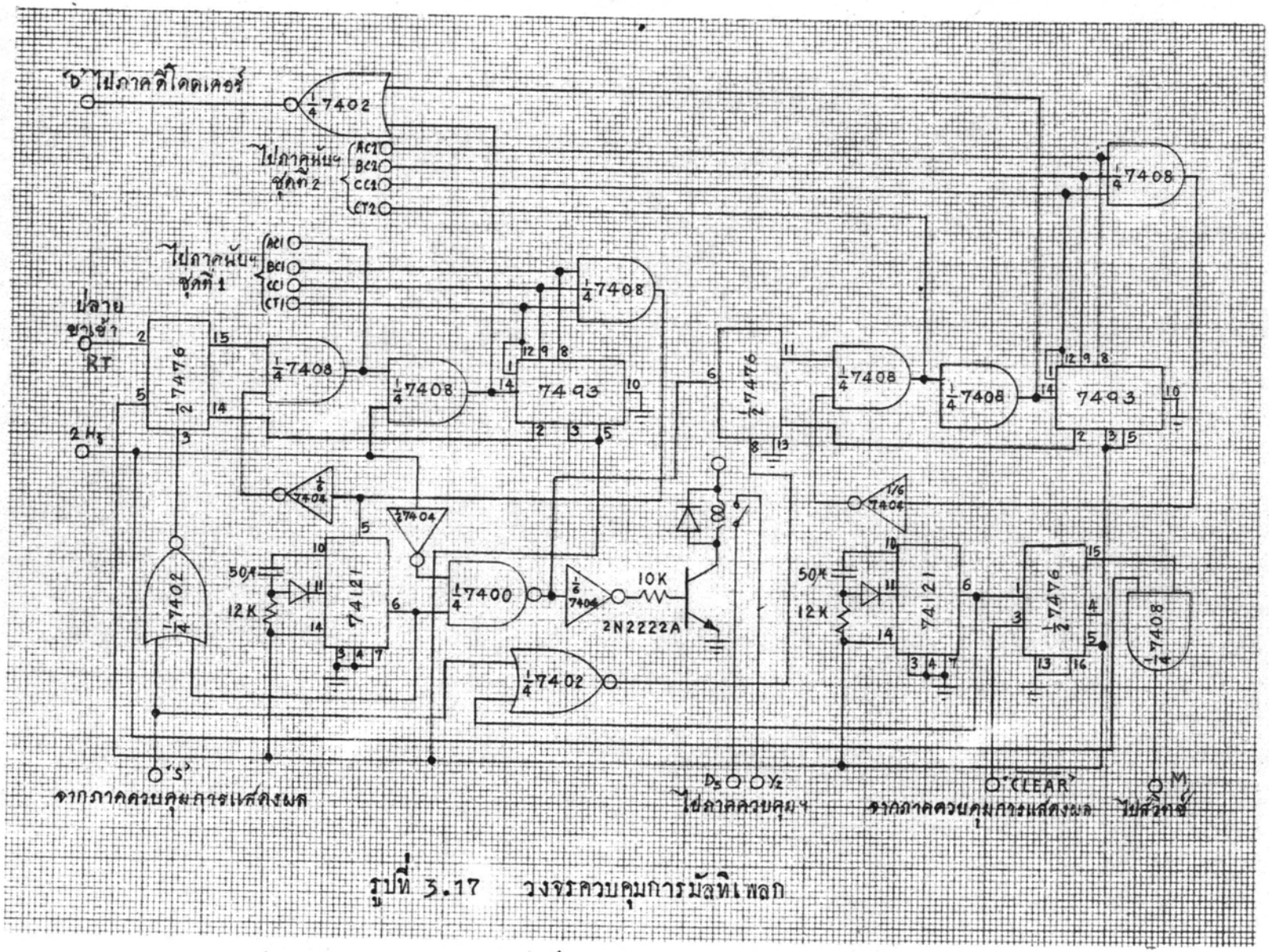
รูปที่ 3.16 แผนภาพการทำงานของภาคควบคุม

ฟลิบฟลอบตัวนี้จะควบคุมการส่งสัญญาณ 2 เฮิร์ทให้ส่งออกจากวงจรควบคุมการมัลทิเพลกนี้ และมันจะถูก 'clear' หลังจากแสดงผลลัพธ์ของการคำนวนเรียบร้อยโดยจะถูก 'clear' โดยวงจรควบคุมการแสดงผล ในการควบคุมการดีโคดนั้นเราเอาสัญญาณขาเข้าของไอซีเบอร์ 7493 ทั้งสองมาเข้า NOR เกท ผลที่ได้จะเอาไปควบคุมการดีโคดสัญญาณ

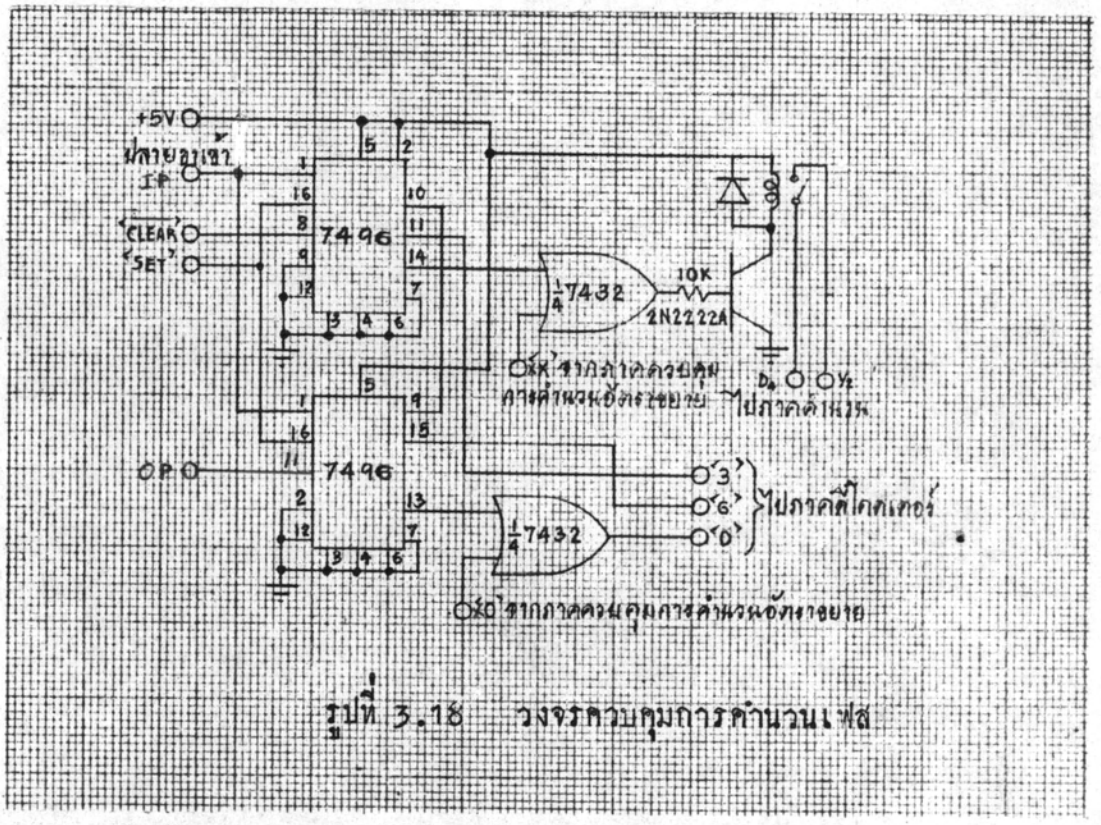
ตอนที่เริ่มจ่ายไฟฟ้าเลี้ยงวงจร ฟลิบฟลอบต่างๆจะมีสัญญาณขาออกเป็นระดับ "0" หรือ "1" ก็ได้ ดังนั้นเราจะเอาสัญญาณซึ่งสร้างขึ้นขณะที่เริ่มจ่ายแรงดันให้แก่วงจรมา 'clear' ฟลิบฟลอบในวงจรนี้ด้วย โดยเอาสัญญาณนี้มา NOR กับสัญญาณจากขา Q ของไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรโดยตรง วงจรควบคุมการมัลทิเพลกที่ได้ออกแบบแสดงในรูปที่ 3.17

3.8.2 วงจรควบคุมการคำนวนเฟส ภาคนี้ได้ออกแบบวงจรดังแสดงในรูป 3.18 จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าเราใช้ชีฟท์รีจีสเตอร์ (ไอซีเบอร์ SN 7496) ที่เลื่อนรหัส "1" ไปเรื่อยๆ เมื่อระดับแรงดัน "1" ถูกเลื่อนไปตำแหน่งใด ฟังก์ชั่นที่ตรงกับตำแหน่งนั้นจะทำงานทันที ตำแหน่งที่มีการทำงานจะมีบิทเว้นบิท หรือบิทเว้นสองบิท แล้วแต่เวลาที่ภาคคำนวนใช้ในการแปรข้อมูลล่าสุด ฟังก์ชั่นที่ภาคนี้ต้องทำคือการส่งข้อมูล "คูณ" ให้ภาคคำนวนโดยตรงและการส่งข้อมูล "3","6" และ "0" ให้ภาคคำนวนโดยผานทางภาคดีโคดเดอร์ เนื่องจากยังมีการสั่งให้สงข้อมูล "คูณ" ให้ภาคคำนวนในวงจรควบคุมการคำนวนอัตราขยาย เราจึงเอาสัญญาณควบคุมให้ส่งข้อมูลคูณทั้งสองมา 'OR' กัน ผลที่ได้เอาไปเป็นสัญญาณเข้าของวงจรรีเลย์ไดรฟเวอร์ เพื่อส่งข้อมูล"คูณ"ไปให้ภาคคำนวนฯ

ก่อนที่จะมีการทำงานในวงจรนี้ชีฟท์รีจีสเตอร์จะต้องถูก 'clear' ให้หมดทุกบิท แล้วจึง 'set' บิทแรกให้เป็น "1" การ 'set' และ 'clear' จะถูกสั่งโดยวงจรควบคุมการคำนวนและแสดงผล



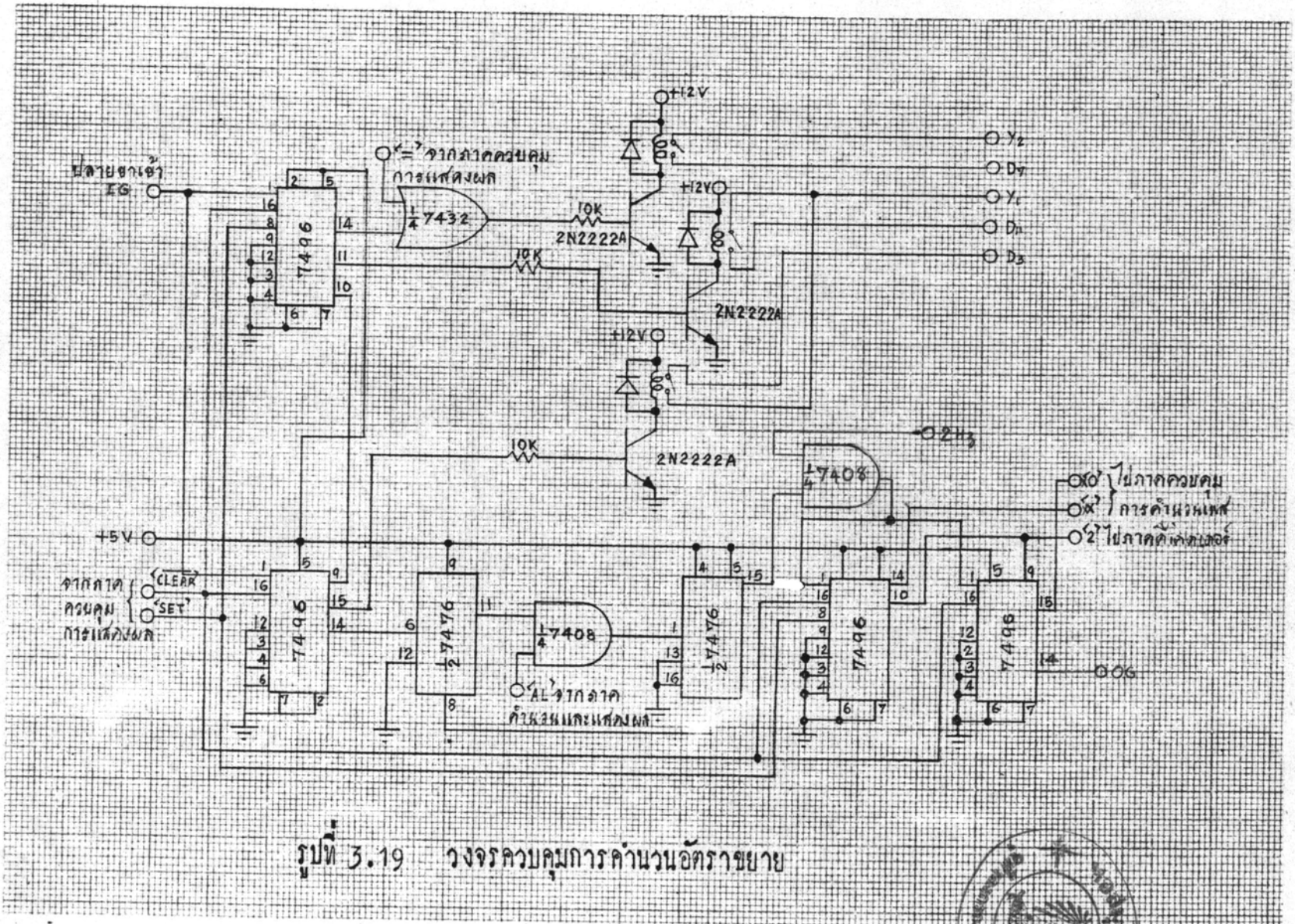
รูปที่ 3.17 วงจรควบคุมการมัลติเพลก



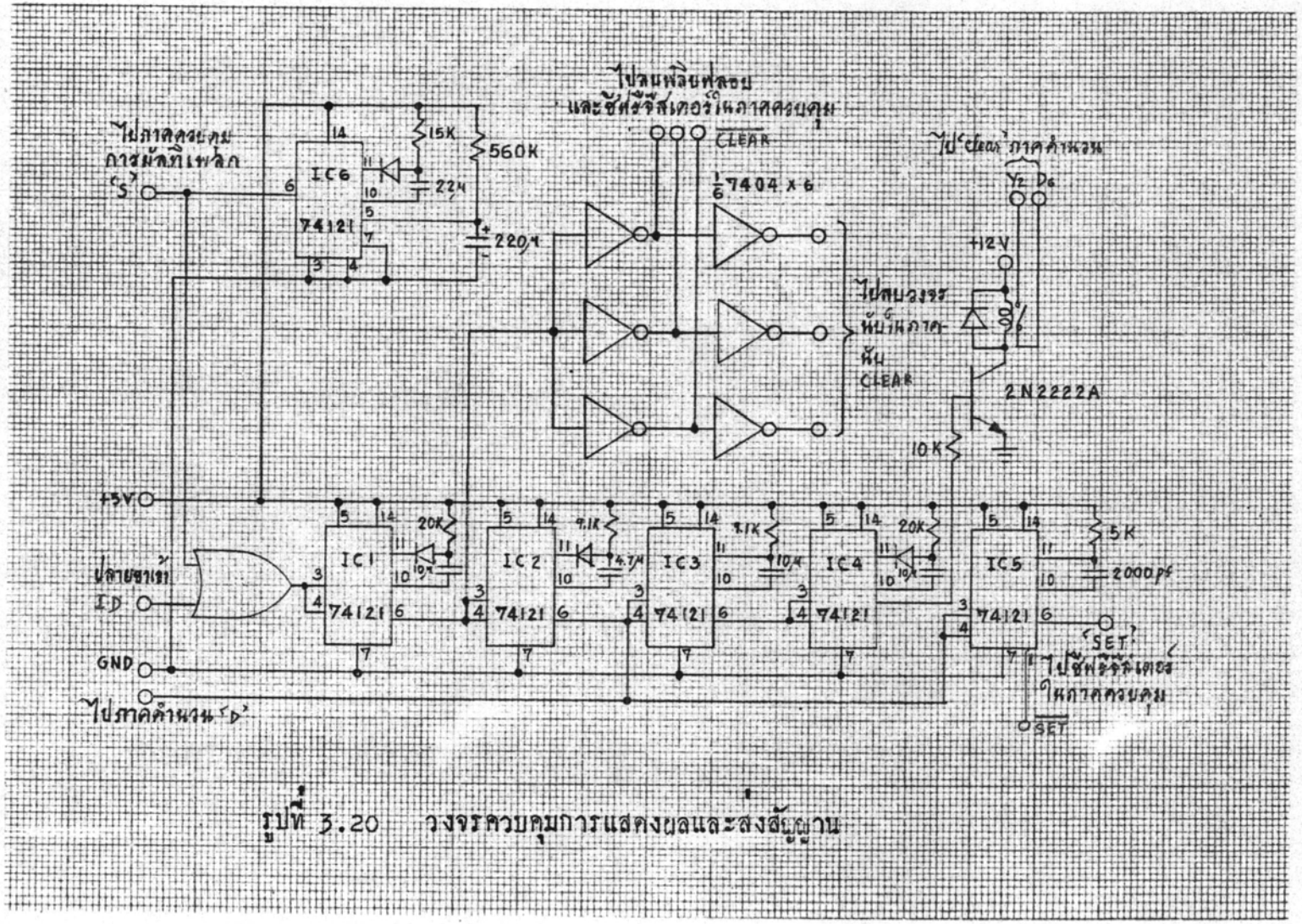
รูปที่ 3.18 วงจรควบคุมการคำนวณเฟส

3.8.3 วงจรควบคุมการคำนวนอัตราขยายเป็นเคซิเยล วงจรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 ลักษณะวงจรนี้คล้ายกับวงจรควบคุมการคำนวนเฟส กล่าวคือมันต้องทำงานตามลำดับก่อนหลังดังนี้

ลำดับที่หนึ่ง ส่งข้อมูล '=' ให้แก่ภาคคำนวนฯ
ลำดับที่สอง ส่งข้อมูล 'F' ให้แก่ภาคคำนวนฯ
ลำดับที่สาม ส่งข้อมูล 'log' ให้แก่ภาคคำนวนฯ
ลำดับที่สี่ รอสัญญาณจากภาคคำนวนว่าคำนวนเสร็จแล้ว
ลำดับที่ห้า ส่งข้อมูล 'x' ให้ภาคคำนวนฯ
ลำดับที่หก ส่งข้อมูล '2' ให้ภาคคำนวนฯ
ลำดับที่เจ็ด ส่งข้อมูล '0' ให้ภาคคำนวนฯ



รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมการคำนวนอัตราขยาย



รูปที่ 3.20 วงจรควบคุมการแสดงผลและสงสัญญาน

เราจะเห็นได้ว่าการทำงานต่าง ๆ กับวงจรควบคุมการคำนวนเฟสตรงมีจุดรอสัญญาณจากภาคคำนวน หลังจากส่งข้อมูล 'log' แล้วเราจะทำการ 'set' ฟลิบฟลอบ ดังนั้นเมื่อมีสัญญาณจากภาคคำนวนฯเข้ามาจะไป set ฟลิบฟลอบอีกตัวให้สัญญาณออกเป็น "1" สัญญาณนี้จะมาเปิดเกทให้สัญญาณความถี่ 2 เฮิร์ทผ่านเข้าสู่ชีฟรีจีสเตอร์อีกชุด ที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูล "คูณ" , "2" และ "0" ตามลำดับ ฟลิบฟลอบและชีฟท์รีจีสเตอร์ทุกตัวจะถูก 'clear' โดยภาคควบคุมการแสดงผล และภาคควบคุมการแสดงผลจะทำการ 'set' ให้บิทแรกของชีฟท์รีจีสเตอร์ทุกชุดเป็น "1" หลังจาก 'clear' ด้วย

3.8.4 วงจรควบคุมการแสดงผลและส่งสัญญาณ วงจรนี้ได้แสดงในรูปที่ 3.20 วงจรนี้ที่ใช้นี้ประกอบด้วยไอซีเอนกระรัวแบบเอกเสถียรเป็นส่วนใหญ่ และทุกๆตัวจะทำงานต่อเมื่อมีสัญญาณขาเข้าเปลี่ยนจาก "1" ไปเป็น "0" ตัว IC1 ทำหน้าที่ส่ง '=' ไปยังภาคคำนวนฯโดยผ่านทางวงจรควบคุมการคำนวนอัตราขยายและ 'clear' ฟลิบฟลอบและชีฟท์รีจีสเตอร์ทุกตัวในภาคควบคุมด้วย ตัว IC2 ทำหน้าที่สั่งให้ภาคคำนวนแสดงผลการคำนวน ตัว IC4 ทำหน้าที่ส่งข้อมูล 'clear' ไปยังภาคคำนวนฯ ตัว IC3 เป็นตัวหน่วงเวลา ตัว IC5 เป็นตัว 'set' ชีฟท์รีจีสเตอร์และส่งสัญญาณไปยังภาคเอทูดีฯ กับภาคตรวจจับความแตกต่างมุม ตัว IC6 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณในขณะที่เริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องฯ โดยขณะเริ่มจ่ายแรงดันศักดาที่ขา 5 จะเป็นศูนย์ หลังจากนั้นคาพาซิเตอร์ที่ต่อระหว่างขา 5 ของไอซีตัวนี้กับกราวน์จะเริ่มสะสมประจุจนกระทั่งแรงดันที่ขา 5 สูงขึ้นถึงประมาณ 2 โวลท์ แล้วตัว IC6 จึงสร้างพัลซ์ออกมาหนึ่งลูกคลื่น

3.9 สรุป

จากการออกแบบวงจรที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจะได้วงจรที่สมบูรณ์ของเครื่องวิเคราะห์วงจรแบบดิจิทอลเพื่อนำไปสร้างต่อไป ผลการทดสอบในแต่ละภาคของเครื่องฯจะได้กล่าวในบทที่ 4 ส่วนการทดสอบการใช้งานของเครื่องฯจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ห้า