

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

AN EXPERIMENTAL KIT FOR TWO-LINK FLEXIBLE ROBOT ARMS



โดย  
นายณัฐวุฒิ เฟื่องจันทร์ทอง รหัสประจำตัว 40012019  
นายสมเกียรติ สีมาเพียงบุญ รหัสประจำตัว 40012031

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ดร. ปิติเขต สุรักษา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2541

เลขหมู่.....	34029
เลขทะเบียน.....	1 ต.ค. 2542
วัน, เดือน, ปี.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าทางใดก็ตาม หากมีเหตุให้ต้องเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการภาษาไทย

ชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ

AN EXPERIMENTAL KIT FOR TWO-LINK FLEXIBLE  
ROBOT ARMS

ผู้จัดทำ

นายณัฐวุฒิ เฟื่องจันทร์ทอง

นายสมเกียรติ สีมาเพียงบุญ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ปิติเขต ผู้รักษา

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2541

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับ  
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

ลงชื่อ

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ดร. ปิติเขต ผู้รักษา )

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

.....กรรมการ

( )

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวข้อสองข้อต่อ

นาย ณัฐวุฒิ	เพ็งจันทอง
นาย สมเกียรติ	สีมาเพียงบุญ
ดร. ปิติเขต	ผู้รักษา (อาจารย์ที่ปรึกษา)
ปีการศึกษา	2541

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการสร้างสรรค์แวร์สำหรับแขนกลอ่อนตัวข้อสองข้อต่อ ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาจากชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดี่ยว โดยใช้การควบคุมตำแหน่งคิซึมอเตอร์และสเตปปีงมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นข้อต่อของแขน แขนกลอ่อนตัวข้อสองข้อต่อที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำงานได้สองโหมดโดยการควบคุมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยตัวผู้ใช้อย่างเดียว หรือการควบคุมโดยอัตโนมัติ แขนกลแบบใหม่นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้เช่นเดียวกับแขนกลแบบดั้งเดิม ในปริญญานิพนธ์นี้ได้สาธิตการประยุกต์การใช้งานของแขนกลอ่อนตัวข้อสองข้อต่อในการเล่นเครื่องดนตรี ชนิดเครื่องดีได้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับเบื้องต้น

## AN EXPERIMENTAL KIT FOR TWO-LINK FLEXIBLE ROBOT ARMS

Mr. Natawut Pengjantong 40012019

Mr. Somkiat Seemapiangbun 40012031

Dr. Pitikhate Sooraksa (Adviser)

Academic Year 1998

### Abstract



This thesis presents hardware for building two-link flexible robot arms. The robot arm is developed from a single-link flexible one by adding a stepping motor as an elbow joint and designing a dc-motor serving as a shoulder joint. The flexible robot arm has two modes, which are manual and automatic modes.

The new type of robot arms can be used and applied similar to a conventional ones. To illustrate the application, the thesis demonstrates the use of the flexible robot arm for playing a xylophone. The result has been successful at a fundamental level.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุกกำลังใจที่ให้ยามหมดกำลังใจที่จะทำงาน ขอขอบคุณผู้ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทุกคำทุกๆ ประโยคที่ช่วยให้ปริญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรมที่ให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบพระคุณคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน และขอขอบคุณท่านอาจารย์ ดร. ปิติเขต ผู้รักษา (อาจารย์ที่ปรึกษา) ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายที่ลืมไม่ได้ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิด ให้ชีวิตและให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ข้าพเจ้า

หากปริญาานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดแต่ประการใด ทางคณะผู้จัดทำยินดีน้อมรับข้อผิดพลาดดังกล่าวด้วยความยินดียิ่ง และก็ต้องกราบขออภัยท่านทั้งหลายไว้ ณ ที่นี้ด้วย เราพร้อมที่จะรับฟังคำติชมจากท่านทั้งหลายด้วยความจริงใจ เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ลงชื่อ.....    
( นายณัฐวุฒิ                      เพ็งจันทอง )

ลงชื่อ.....    
( นายสมเกียรติ                      สิวมาเพียงบุญ )

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ชี้ความสามารถของโครงการ	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบเซอร์โว	4
2.1.1 การควบคุม	4
2.1.2 ระบบควบคุม	6
2.1.3 ระบบเซอร์โว	8
2.1.4 ระบบควบคุมมอเตอร์	12
2.1.5 พื้นฐานของระบบควบคุมดิจิตอล	12
2.1.6 ลักษณะการควบคุมดิจิตอล	14
2.1.6.1 ระบบควบคุมแบบอนาล็อก	14
2.1.6.2 ระบบควบคุมแบบดิจิตอล	14
2.2 องค์ประกอบของระบบเซอร์โว	14
2.2.1 หลักการทำงานของดิจิตอล	14
2.3 การแยกประเภทของดิจิตอล	15
2.3.1 ดิจิตอลแบบปรับเสถียรแม่เหล็กได้	16
2.3.2 มอเตอร์แบบเสถียรแม่เหล็กคงที่	16
2.3.3 ดิจิตอลแบบอานาล็อกเป็นแกนหลัก	17
2.3.4 ดิจิตอลแบบอานาล็อกมีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3.5 คีชีมอเตอร์แบบอาร์เมเจอร์เป็นขดลวดหมุน	18
2.3.6 คีชีมอเตอร์แบบ ไม่มีแปรงถ่าน	18
2.4 อินทรีย์มันท์เอน โคคเคอร์	19
2.4.1 ความละเอียดของอินทรีย์มันท์เอน โคคเคอร์	19
2.4.2 รีโซลเวอร์เป็นเสมือนอินทรีย์มันท์เอน โคคเคอร์	21
2.4.3 อินคักโตซิน	22
2.5 การควบคุมแบบอนาล็อกและแบบดิจิทัล	22
2.6 คุณสมบัติของตัวควบคุม	24
2.6.1 ระบบควบคุมแบบพี	24
2.6.2 การควบคุมแบบพี	27
2.7 สเต็ปป์มอเตอร์	27
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและการสร้าง</b>	
3.1 ส่วนของคีชีมอเตอร์	33
3.1.1 การออกแบบและจัดสร้างชุดควบคุมแบบ พี	33
3.1.2 การสร้างวงจร ไลร์คีชีมอเตอร์	35
3.1.3 การสร้างวงจรเอน โคคเคอร์และวงจรนับ 8 บิท	35
3.2 ส่วนของสเต็ปป์มอเตอร์	37
3.2.1 วงจรสร้างพัลส์ความถี่	37
3.2.2 วงจรนับ 8 บิท และวงจรเปรียบเทียบ 8 บิท	38
3.2.3 ส่วน ไลร์สเต็ปป์มอเตอร์	41
<b>บทที่ 4</b>	
<b>การทดลองและผลการทดลอง</b>	
4.1 การทดลองในส่วนของตัวควบคุมคีชีมอเตอร์	42
4.1.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.1.2 วงจรการกำหนดทิศทางอารมณ์ของดีซีมอเตอร์	43
4.1.3 วงจรไคร์ดีซีมอเตอร์	43
4.1.4 ส่วนของเอนโค้ดเดอร์	43
4.2 ส่วนวงจรไคร์สเต็ปมอเตอร์	44
<b>บทที่ 5</b>	
<b>บทสรุปปัญหาแนวทางแก้ไขและพัฒนา</b>	
5.1 บทสรุป	46
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำโครงการ	46
5.3 แนวทางแก้ไขปัญหาและพัฒนา	47
ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบของชุดทดลอง	
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ	
ภาคผนวก ค. ลายวงจรที่ใช้ในโครงการ	
บรรณานุกรม	

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงภาพแบบจำลองแกนกล่อนตัวสองข้อต่อที่สร้างขึ้นในโครงการนี้	1
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกนกล่อนตัวสองข้อต่อ	3
รูปที่ 2.2 วงจรแสดงการควบคุมแบบเปิด-ปิด	4
รูปที่ 2.3 วงจรแสดงการควบคุมแบบสเกล	5
รูปที่ 2.4 วงจรแสดงการควบคุมแบบต่อเนื่อง	5
รูปที่ 2.5 กระบวนการที่เราจะควบคุม	6
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างระบบควบคุมแบบลูปปิด	6
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบลูปปิด	7
รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบมีตัวแปรหลายตัว	7
รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองของระบบเซอร์โวต่อการเปลี่ยนแปลงสเตปอินพุท	11
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของระบบเซอร์โวต่อการเปลี่ยนแปลงโพลด	11
รูปที่ 2.11 ระบบการควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลแบบพื้นฐาน	13
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกลไกของออฟไดอินคริเมนต์	19
รูปที่ 2.13 แสดงถึงตัวเซนเซอร์มีช่วงปิด-เปิดให้แสงผ่าน ใต้ช่องเคียว	19
รูปที่ 2.14 รูปบนแสดงตัวอย่างรูปคลื่นเอาต์พุตที่เหลื่อมของอุปกรณ์ เอนโคเดอร์ช่องเคียว รูปล่างตัวอย่างสัญญาณเอนโคเดอร์ 2 ช่องมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา	21
รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของลูปการควบคุมมอเตอร์	23
รูปที่ 2.16 แสดงตัวคอนโทรลเลอร์แบบพรีออปพอสชันแนล	24
รูปที่ 2.17 พรีออปพอสชันแนลแบนด์	25
รูปที่ 2.18 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีต่อการเปลี่ยนแปลงโพลด แบบยูนิตสเคป	26
รูปที่ 2.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีต่อการเปลี่ยนแปลง ของอินพุท ( $\theta$ ) แบบยูนิตสเคป	26
รูปที่ 2.20 วงจรควบคุมแบบพี	27
รูปที่ 2.21 ลักษณะของขดลวดสเตเตอร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 4 เฟส	28
รูปที่ 2.22 วงจรสวิตซ์ให้แต่ละเฟสนำกระแสด้านดิฟเฟอเรนเชียล	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 วงจรไคร์เวอร์สำหรับสแต็ปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส	30
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมการทดลองสำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ	32
รูปที่ 3.2 วงจรตัวควบคุมแบบพี	33
รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบพีที่ใช้งานจริง	34
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์	34
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรไคร์ซีมอเตอร์	35
รูปที่ 3.6 วงจรเอนโค้ดเดอร์ที่แปลงสัญญาณเป็นพัลส์	36
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรหารความถี่และวงจรมับ 8 บิต	37
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์	38
รูปที่ 3.9 ผังงานแสดงการทำงานส่วนของสแต็ปป์มอเตอร์	39
รูปที่ 3.10 แสดงวงจรในส่วนของสแต็ปป์มอเตอร์	40
รูปที่ 3.11 แสดงวงจรไคร์สแต็ปป์มอเตอร์	41
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงระดับแรงดันจากตัวควบคุมแบบพีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า	42
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์	43
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่ได้จากการคูณ (AND) กันระหว่างสัญญาณพัลส์กับคอมพิวเตอร์	45

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับอินพุตเป็นแบบ 4 สเตป	29
ตารางที่ 2.2 มอเตอร์ 4 เฟสขับเคลื่อนที่ละ 2 เฟส	29
ตารางที่ 2.3 มอเตอร์แบบ 4 เฟสขับเคลื่อนแบบ 1-2 เฟสสลับกัน	29
ตารางที่ 2.4 มอเตอร์แบบ 4 เฟสขับเคลื่อนที่ละเฟส	30
ตารางที่ 4.1 การเซตค่าตำแหน่งตัว โน้ต	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

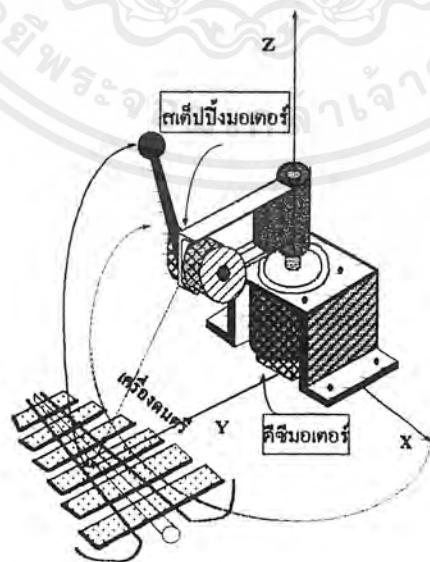
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันแขนกลหรือแขนหุ่นยนต์ก็เป็นเครื่องจักรกลอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป และเหตุที่ต้องเป็นแขนกลก็เพื่อ

1. งานที่กระทำซ้ำ ๆ บ่อย ๆ
2. งานที่ทำแล้วเกิดอันตรายได้ง่าย เช่น งานประเภทเชื่อมในที่สูงเหนือศีรษะ งานใต้ดิน หรือใต้ทะเลลึก ๆ
3. งานที่ใช้ความละเอียดค่อนข้างสูง
4. งานที่สิ่งแวดล้อมไม่เอื้ออำนวย เช่น งานในอวกาศ

แขนกลที่พบส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแขนกลแบบหลายข้อต่อ แต่ในโครงการนี้เราจะสร้างแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อซึ่งพัฒนามาจากแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียวแบบดั้งเดิม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการตีเครื่องดนตรี โดยการควบคุมจากตัวผู้ใช้เอง และการควบคุมโดยอัตโนมัติจากเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งปัญหาที่แก้จะต้องมีแน่นอนในเรื่องของการเกิดโอเวอร์ชูท, การคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของแขนกล แล้วจะมีผลทำให้แขนกลตีโน้ตไม่ตรงตามตัวโน้ตที่ต้องการ ดังนั้นเราจึงนำระบบควบคุมเข้ามาเกี่ยวข้องกับโดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมดิซิมอเตอร์ และสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการควบคุมแขนกล



รูปที่ 1.1 แสดงภาพแบบจำลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อที่สร้างขึ้นในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ชี้วัดความสามารถของโครงการ

1. สามารถใช้ชุดทดลองในการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ได้อย่างถูกต้อง
2. สามารถใช้ชุดทดลองในการควบคุมตำแหน่งองศาในการเคลื่อนที่ได้ตรงตามค่าที่กำหนดไว้อย่างถูกต้อง
3. สามารถใช้ชุดทดลองแขนกลนี้ตีเครื่องดนตรีได้ตามตัวโน้ตที่กำหนด
4. สามารถใช้ชุดทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงระบบควบคุมที่สูงยิ่ง ๆ ขึ้นไป

## 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

บทที่ 2 จะเป็นทฤษฎีและหลักการที่จะกล่าวถึงในเรื่องของ ระบบดิจิทัลเซอร์โวมอเตอร์ สเต็ปปีงมอเตอร์ ตัวเซนเซอร์ความเร็วรอบมอเตอร์ ระบบคอนโทรล

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง กล่าวถึงการออกแบบการสร้างวงจรตัวควบคุมแบบพี วจรขับเคลื่อนกระแสตรง วงจรตรวจสอบความเร็วรอบมอเตอร์ วงจรนับ วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง มีเนื้อหาเกี่ยวกับสัญญาณของตัวควบคุมแบบพี ตำแหน่งและองศาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกล

บทที่ 5 ปัญหาแนวทางแก้ไขและพัฒนา กล่าวถึงข้อสรุปข้อบกพร่องต่าง ๆ ของชุดทดลอง ปัญหาที่เกิดในการจัดสร้างและกล่าวถึงแนวทางในการปรับปรุง การแก้ไขและการพัฒนาชุดทดลองนี้ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

สำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อที่สร้างขึ้นนี้จะอาศัยหลักการของมอเตอร์ทั้งในแบบดีซีมอเตอร์และสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อนี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนแรกจะเป็นข้อต่อส่วนที่หนึ่ง โดยจะใช้ดีซีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในระนาบ x-y (x-y plane) ก็คือ จะทำการหมุนไปตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งจะต้องมีแรงบิดและมีคุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ให้ได้เหมาะสมกับรูปแบบของแขนกลที่จะนำไปใช้งาน ส่วนที่สองก็จะเป็นข้อต่อที่สองซึ่งจะใช้สเต็ปปีงมอเตอร์เป็นตัวควบคุมในระนาบ x-y (y-z plane) ก็คือจะทำการตีขึ้นตีลง และทั้งสองส่วนประกอบนี้เองก็จะนำมารวมเป็นแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อเพื่อใช้ในการตีเครื่องดนตรี โดยแสดงส่วนประกอบได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

แต่ก่อนที่จะนำสิ่งเหล่านี้มาประยุกต์ใช้งานได้นั้นยังต้องมีความรู้ในเรื่องทฤษฎีและหลักการของส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย ที่จะต้องนำมาใช้ร่วมกับการสร้างแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบเซอร์โวต่างๆ , ดีซีมอเตอร์, สเต็ปปีงมอเตอร์, ระบบควบคุม, พื้นฐานทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่านวจรคิจิตอล, วงจรไครเวอร์ต่างๆ , เอนโค้ดเดอร์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดต่างๆ สามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

## 2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบเซอร์โว ( Basic Principle of Servo Systems )

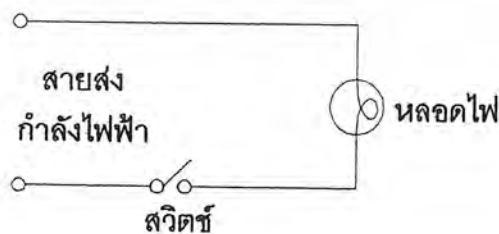
ปัญหาของมนุษย์ชาติตั้งแต่สมัยเริ่มต้นก็คือ การหาแหล่งกำลังงานเพื่อนำมาใช้งานหรือเพื่อที่จะควบคุม ในการแก้ปัญหาที่พวกเขาได้เริ่มใช้กำลังแรงกายของคนแรงสัตว์เลี้ยง น้าตก ถ่านหิน อะตอม และพระอาทิตย์ จนกระทั่งปัจจุบันนี้ก็ตามพวกเราก็ตั้งค้นหาแหล่งกำเนิดกำลังงานแหล่งใหม่ ๆ กันอยู่และทำงานวิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกลให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนั้นก็คือวิธีการควบคุมเครื่องจักรกล

เราต้องการควบคุมทิศทางและความเร็วของรถยนต์ เรือเดินทะเลและยานอวกาศให้เป็นไปโดยอัตโนมัติ เรายังต้องการออกแบบระบบการควบคุมอัตโนมัติสำหรับผลิตอาหารสำหรับคนและสัตว์ผลิตสบู่และน้ำมันแกสโซลีนพอกๆ กับการผลิตส่วนประกอบของเครื่องยนต์ แผ่นเหล็กกล้าและกระดาษ นอกจากนั้นก็เป็นการควบคุมพวกอาวุธสมัยใหม่ได้แก่พวกเรือดำน้ำนิวเคลียร์ เครื่องบินเร็วกว่าเสียง เครื่องยิงจรวดและยานอวกาศ การพัฒนาระบบที่อยู่ยากเหล่านี้เป็นที่มาของทฤษฎีวิสวกรรมระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

### 2.1.1 การควบคุม

การควบคุมคือ การควบคุมการไหลของพลังงานจากแหล่งกำเนิดที่จะจ่ายไปยังโหลดลักษณะการควบคุมการไหลของพลังงานจำแนกออกได้เป็น 3 แบบคือ การควบคุมแบบเปิด-ปิด การควบคุมแบบสแต็ป และการควบคุมแบบต่อเนื่อง

#### การควบคุมแบบเปิด-ปิด



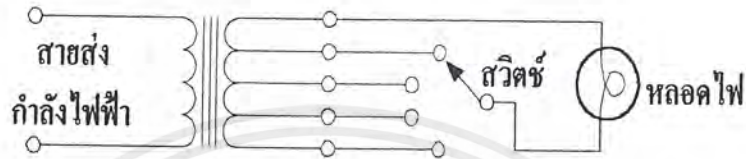
รูปที่ 2.2 วงจรแสดงการควบคุมแบบเปิด-ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์เป็นตัวควบคุมที่ทำหน้าที่เปิดและปิดการส่งถ่ายพลังงานให้กับโหลด(หลอดไฟ) ด้วยอัตราที่กำหนดได้จากช่วงเวลาที่สวิตช์เปิดต่อช่วงเวลาที่สวิตช์ปิด

การควบคุมแบบนี้พลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งถ่ายจากสายส่งพลังงานไปยังหลอดไฟ อัตราการส่งถ่ายพลังงานขึ้นอยู่กับสัณฐานของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของสายส่ง และอิมพีแดนซ์ของหลอดไฟ

การควบคุมแบบสแต็ป



รูปที่ 2.3 วงจรแสดงการควบคุมแบบสแต็ป

ตัวควบคุม (สวิตช์) สามารถเลือกการควบคุมการส่งถ่ายพลังงานให้กับโหลดด้วยอัตราใดอัตราหนึ่งโดยจะแปรเปลี่ยนในลักษณะเป็นสแต็ป

การควบคุมแบบต่อเนื่อง



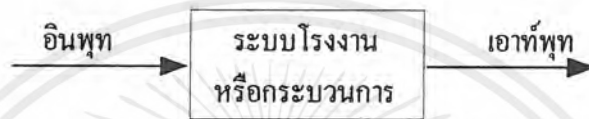
รูปที่ 2.4 วงจรแสดงการควบคุมแบบต่อเนื่อง

ตัวควบคุม (สวิตช์) สามารถเลือกการควบคุมการส่งถ่ายพลังงานให้กับโหลดด้วยอัตราใดอัตราหนึ่งได้ด้วยการปรับปรุ่ค่าความต้านทานซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งถ่ายพลังงานที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทุกอัตราจากค่าสูงสุดถึงค่าต่ำสุด

## 2.1.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ระบบที่อาศัยพื้นฐานการป้อนกลับเพื่อควบคุมให้ได้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่เราต้องการ

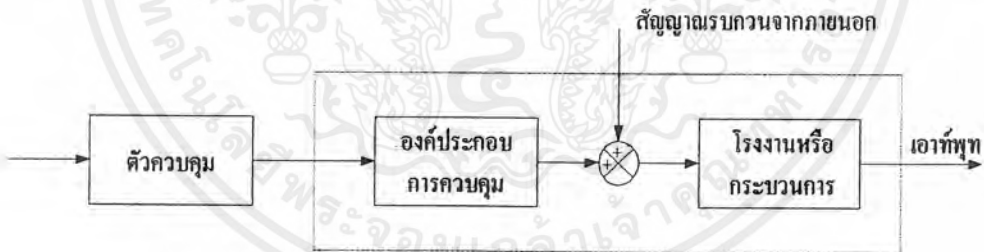
พื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบควบคุมกระทำได้โดยอาศัยหลักทฤษฎีระบบลิเนียร์ โดยกำหนดถึงความสัมพันธ์ของอินพุต-เอาต์พุตของส่วนประกอบของระบบ ดังนั้นส่วนประกอบของระบบหรือกระบวนการที่เราจะทำการควบคุมสามารถแสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการที่เราจะควบคุม

ระบบควบคุมแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

ก. ระบบควบคุมแบบลูปเปิด คือ ระบบที่มีตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการ ระบบแบบนี้ไม่มีการป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.6



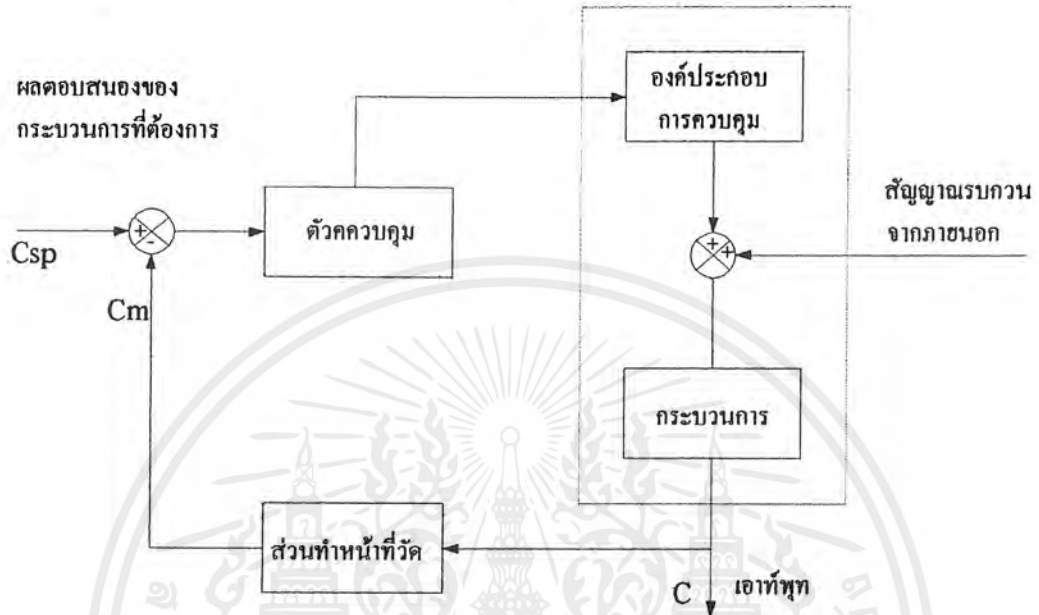
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างระบบควบคุมแบบลูปเปิด

ข. ระบบควบคุมแบบลูปปิดหรือแบบมีการป้อนกลับ คือ ระบบที่มีการป้อนกลับเอาเอาต์พุตของระบบกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุตของระบบจะได้เป็นความแตกต่างหรือสัญญาณผิดพลาดป้อนไปให้ตัวควบคุมเพื่อไปควบคุมระบบหรือกระบวนการให้ได้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการ ระบบควบคุมป้อนกลับแบบลูปปิดแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

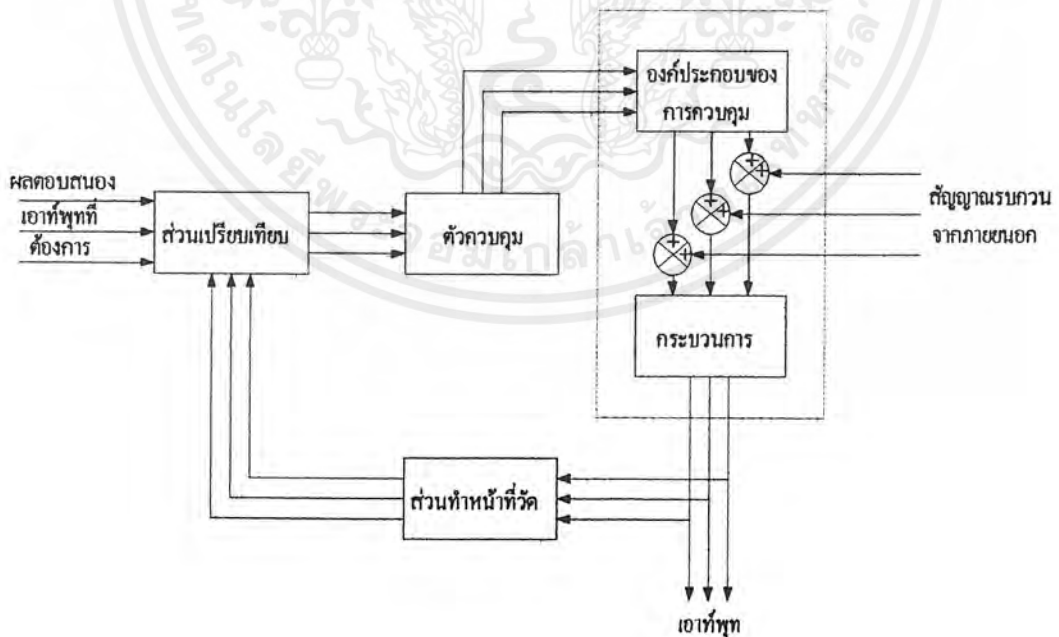
การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมจะอยู่บนพื้นฐานในแนวความคิดของการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นแล้วระบบที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ถูกคอนโทรลต่าง ๆ จะต้องพิจารณาในแบบแผนการควบคุมที่อยู่ในลักษณะบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบมีตัวแปรหลายตัวแสดงดังในรูปที่ 2.8



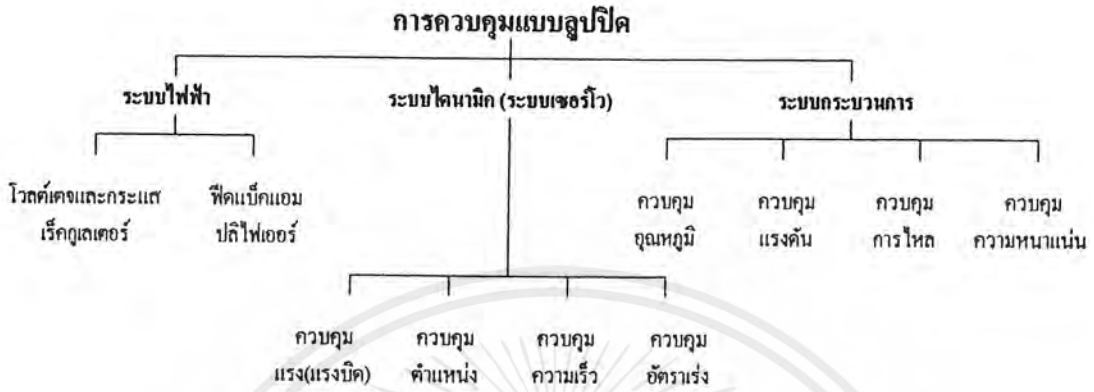
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบลูปปิด



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบมีตัวแปรหลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมการควบคุมแบบอัตโนมัติหรือระบบการควบคุมแบบป้อนกลับที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถจำแนกได้เป็น 3 สาขาคิ่งแสดงในไดอะแกรมต่อไปนี้



ส่วนทฤษฎีของวิศวกรรมการควบคุม (control engineering) ในปัจจุบันแบ่งแยกทฤษฎีของการควบคุมออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ทฤษฎีการควบคุมแบบคลาสสิก (classical control theory) และทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control theory)

ทฤษฎีการควบคุมแบบคลาสสิก เป็นทฤษฎีที่เริ่มต้นของการควบคุม ซึ่งได้แก่ ฟีดแบ็คแอมป्लीไฟเออร์ รีกดูเลเตอร์ และเซอร์โวแมคคานิซึมซึ่งอยู่บนพื้นฐานของพีรีเวนซีโดเมน

ทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่เป็นเสมือนจุดบรรจบของแม่น้ำสามสายของทฤษฎีเซอร์โวแมคคานิซึมแคลคูลัสตัวแปรอันดับ และการพัฒนาของคอมพิวเตอร์

ทฤษฎีของวิชาวิศวกรรมการควบคุมในปัจจุบันช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบระบบควบคุมในลักษณะที่มองเข้าไปได้ลึกซึ้งถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของระบบเพื่อแก้ปัญหาให้ระบบทำงานได้ดีที่สุด (optimum solution) หรือใช้เวลาน้อยที่สุด (time optimum)

### 2.1.3 ระบบเซอร์โว

คือ ระบบการควบคุมเครื่องจักรกลที่มีการทำงานเป็นไดนามิก หมายถึงระบบควบคุมที่มีตัวแปรอินพุต  $x(t)$  เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นตามหลักการของระบบเซอร์โวตัวแปรเอาต์พุตของระบบจะติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอินพุตไปในเวลาเดียวกัน ซึ่งเราอาจเรียกระบบดังกล่าวได้อย่างหนึ่งว่าเป็นระบบควบคุมแทรคกิ้ง (tracking control system) หรือระบบควบคุมโฟลโลอิง (following control system)

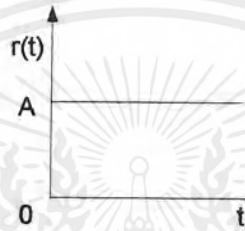
ระบบเซอร์โวจะมีตัวแปรอินพุต  $x(t)$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในลักษณะ สเต็ปแรมพ์ และพาราโบลา ซึ่งเราเรียกอินพุตในลักษณะเหล่านั้นว่า สเต็ปอินพุต แรมพ์อินพุต และพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบริคอินพุตตามลำดับ แต่ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบเซอร์โวเราอาจใช้อินพุตอีกแบบหนึ่ง คืออิมพัลส์อินพุต สัญญาณอินพุต  $r(t)$  แต่ละแบบอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### สัญญาณสเต็ปอินพุต

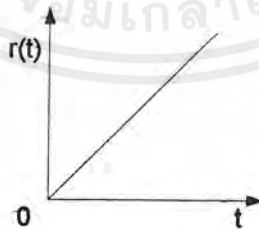
$$\begin{aligned} r(t) &= Au(t) \\ u(t) &= \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{Au(t)\} &= \int_0^{\infty} Ae^{-st} dt = -A \frac{e^{-st}}{s} \Big|_{t=0}^{t=\infty} = \frac{A}{s} \\ R(s) &= \mathcal{L}\{Au(t)\} = \frac{A}{s} \end{aligned} \quad (2-1)$$

### สัญญาณแรมพ์อินพุต

$$r(t) = \begin{cases} At, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} = Atu(t)$$

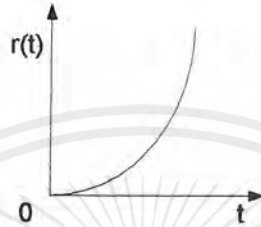


$$\begin{aligned} R(s) &= \mathcal{L}\{Atu(t)\} = \int_0^{\infty} Ate^{-st} dt = -Ae^{-st} \left( \frac{t}{s} + \frac{1}{s^2} \right) \Big|_0^{\infty} \\ R(s) &= \frac{A}{s^2} \end{aligned} \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สัญญาณพาราโบลาอินพุท

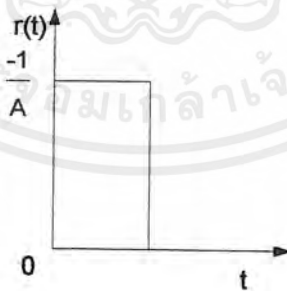
$$r(t) = \begin{cases} At^2/2, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} = \frac{At^2}{2} u(t)$$



$$\begin{aligned} R(s) &= \mathcal{L}\left\{\frac{A}{2} t^2 u(t)\right\} = \int_0^{\infty} \frac{A}{2} t^2 e^{-st} dt \\ R(s) &= \frac{A}{s^3} \end{aligned} \quad (2-3)$$

### สัญญาณอิมพัลซ์อินพุท

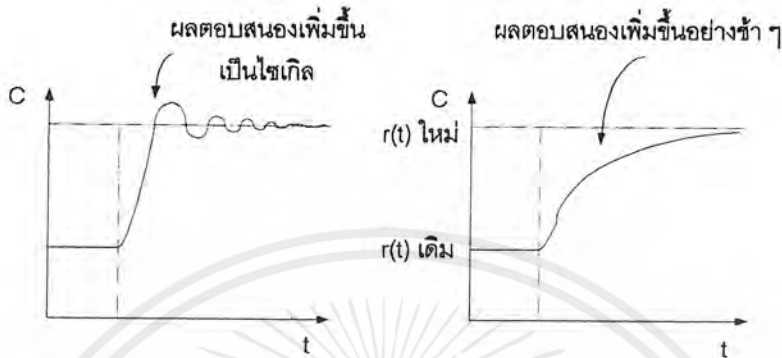
$$\begin{aligned} \delta(t) &= \lim_{A \rightarrow 0} r(t) = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{u(t) - u(t-A)}{A} \\ \mathcal{L}[\delta(t)] &= \Delta(s) \end{aligned}$$



$$\Delta(s) = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-As}}{As} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{0 + se^{-As}}{s} = 1 \quad (2-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเซอร์โวจะตอบสนองต่อตัวแปรอินพุต  $r(t)$  หรือต่อการเปลี่ยนแปลงโพลในลักษณะเป็นการลดลงหรือเพิ่มขึ้นเป็นไซเกิล (underdamped) การลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างวิกฤต (critically damped) และการลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ (overdamped) แสดงดังในรูปที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองของระบบเซอร์โวต่อการเปลี่ยนแปลงของสเต็ปอินพุต



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของระบบเซอร์โวต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด

สรุปได้ว่าระบบเซอร์โวคือ ระบบการควบคุมเครื่องจักรกลที่ไปขับโหลดให้มีการอ่อนไหวในลักษณะเป็นตำแหน่งมุม ความเร็วรอบ อัตราเร่ง และแรงบิด หรือระบบเซอร์โวระบบการควบคุมมอเตอร์นั่นเองซึ่งจำแนกออกได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

(1) ระบบการควบคุมตำแหน่งเพลลาของมอเตอร์ , เมื่อ  $r(t) = \theta(t)$

(2) ระบบการควบคุมความเร็วรอบของเพลลาของมอเตอร์ , เมื่อ  $r(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(3) \text{ ระบบการควบคุมอัตราเร่งของเพลามอเตอร์, เมื่อ } r(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \alpha(t)$$

$$(4) \text{ ระบบการควบคุมแรงบิดของเพลามอเตอร์, เมื่อ } r(t) = J \frac{d\omega}{dt} = T(t)$$

ระบบเซอร์โวที่ใช้งานทั่ว ๆ ไปจะประกอบด้วย การควบคุมหลาย ๆ อย่างในระบบเดียวกันคือ ในระบบจะมีทั้งการควบคุมตำแหน่งมุม ความเร็ว อัตราเร่งและแรงบิดไปพร้อม ๆ กัน

### 2.1.4 ระบบควบคุมมอเตอร์

ในปัจจุบันการควบคุมดีซีมอเตอร์จะพบได้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์และไมโครโปรเซสเซอร์ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมดีซีมอเตอร์และการวิเคราะห์จึงเป็นเทคนิคใหม่ที่สำคัญและน่าสนใจ

ระบบการควบคุมแบบดั้งเดิม พลังงานจักรกลที่สำคัญในระบบมักได้แก่ พววมอเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ ไฮดรอลิกแอ็คชูเอเตอร์และพวกเบรคและคลัชเป็นต้น แต่ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีคุณภาพสูง ทำให้ดีซีมอเตอร์กลายเป็นพลังงานจักรกลที่สำคัญในระบบควบคุมเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน และในเวลาเดียวกันเมื่อบวกกับความก้าวหน้าของไมโครโปรเซสเซอร์ทำให้มีการได้พัฒนาการประยุกต์งานใหม่ ๆ ขึ้นทำให้ดีซีมอเตอร์และสเต็ปปีงมอเตอร์ได้รับความนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันอย่างกว้างขวาง

ดีซีมอเตอร์เป็นอนาล็อกแอ็คชูเอเตอร์ที่ไม่มีตำแหน่งหยุดที่แน่นอนเหมือนสเต็ปปีงมอเตอร์ ดังนั้นระบบควบคุมดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปมักเป็นระบบแบบลูปปิด ในระบบแบบลูปปิดตำแหน่งเอาต์พุทหรือความเร็วเอาต์พุทจะถูกป้อนกลับ ไปเปรียบเทียบกับอินพุทอ้างอิงเพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานที่ต้องการ ระบบการควบคุมดีซีมอเตอร์ที่ประยุกต์ใช้กับแขนหุ่นยนต์ โดยมีดีซีเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อเพื่อให้ได้อัตราส่วนของแรงบิดต่อแรงเฉื่อยสูง สามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถวัดแรงบิดขับเคลื่อน เพื่อป้อนกลับไปเป็นระบบแบบลูปปิด และหุ่นยนต์อีกแบบหนึ่งสำหรับใช้ในงานวิจัยและในทางอุตสาหกรรมขนาดเบาโดยใช้ดีซีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในแต่ละข้อต่อทำให้กำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์สามารถโปรแกรมใช้งานต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง มีความแข็งแรงและสามารถจับยึดสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างคล่องตัว

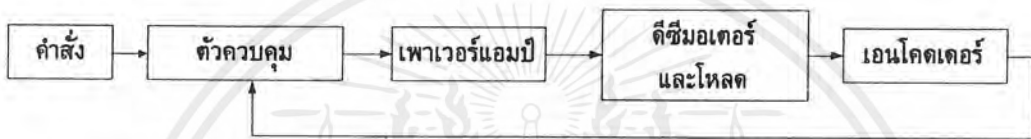
### 2.1.5 พื้นฐานของระบบควบคุมดีซีมอเตอร์

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมดีซีมอเตอร์แสดงด้วยตัวบล็อกไดอะแกรมที่สำคัญ 4 บล็อก คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) ตัวควบคุม
- (2) วงจรไครเวอร์หรือเพาเวอร์แอมพลิไฟ
- (3) ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคเดอร์
- (4) ดีซีมอเตอร์และโหลด

ตัวควบคุม เป็นส่วนของระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมไปยังคัปดีซีมอเตอร์และโหลด ตัวควบคุมที่ให้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณอนาล็อกเราเรียกว่าการควบคุมแบบอนาล็อก ส่วนควบคุมที่ให้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณดิจิทัลเราเรียกว่าการควบคุมแบบดิจิทัล ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ระบบการควบคุมดีซีมอเตอร์แบบพื้นฐาน

วงจรไครเวอร์ เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวควบคุมกับดีซีมอเตอร์และโหลด มีหน้าที่ปรับปรุงรูปของสัญญาณและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้ามอเตอร์และโหลด วงจรไครเวอร์ส่วนใหญ่ได้แก่ เพาเวอร์แอมพลิไฟ

ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคเดอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้รับรู้หรือดีเท็คสัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการโหลดคิง (loading) สัญญาณที่ดีเท็คได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบกับสัญญาณอ้างอิงทำให้ได้สัญญาณผิดพลาดฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ อนาล็อกทรานสดิวเซอร์ คือสิ่งประดิษฐ์ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณอนาลอกได้แก่พวก ทาโคเซนเซอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์และซิงโคร เป็นต้น ส่วนฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์อีกแบบหนึ่งคือ ดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ได้แก่พวกอินคริเมนต์เอนโคเดอร์รีโซลเวอร์ แมกนิติกฟิคอัพ เป็นต้น

ดีซีมอเตอร์และโหลด คือระบบที่ถูกควบคุมหรือส่วนที่ออกแรงทำงานซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (ดีซีมอเตอร์) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร ดีซีมอเตอร์ในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์มาเจอร์อินดักแตนซ์และแรงเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ

## 2.1.6 ลักษณะการควบคุมของระบบคีชีมอเตอร์

ระบบการควบคุมคีชีมอเตอร์สามารถที่จะจำแนกลักษณะการควบคุมออกได้เป็น 2 แบบ คือ การควบคุมแบบอนาล็อก และระบบควบคุมแบบดิจิทัล

### 2.1.6.1 ระบบควบคุมแบบอนาล็อก

ในระบบควบคุมของระบบควบคุมแบบอนาล็อก เอาท์พุทของระบบจะถูกวัดค่าหรือ คีเท็คค่าได้เป็นสัดส่วนกับสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาล็อก เช่น ในระบบที่มีการป้อนกลับ ด้วยทาโคมิเตอร์ โวลต์เตจเอาท์พุทของทาโคมิเตอร์จะเป็นสัญญาณอนาล็อกที่แสดงถึงความเร็ว มอเตอร์

ในทำนองเดียวกันระบบการควบคุมตำแหน่งไดนามิกควาริเอเบิล (การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ของโหลด) จะเป็นสัดส่วนกับโวลต์เตจเอาท์พุทที่ได้จากโปรเพนทิโอมิเตอร์ นั่นคือตำแหน่งเอาท์พุท ของระบบเป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีลักษณะเป็น ไดนามิกควาริเอเบิล

สรุปได้ว่า ระบบการควบคุมก็คือ ควบคุมรูปที่มีฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์เป็นอนาล็อก ทรานสดิวเซอร์วัดค่าไดนามิกควาริเอเบิลออกเป็นสัญญาณอนาล็อกป้อนกลับ ไปยังตัวควบคุมอนาล็อก เพื่อควบคุมให้ได้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ

### 2.1.6.2 ระบบควบคุมแบบดิจิทัล

ระบบควบคุมแบบดิจิทัลคือ ระบบที่ควบคุมรูปที่มีฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์เป็น ดิจิตอล ทรานสดิวเซอร์ซึ่งสามารถวัดค่าไดนามิกควาริเอเบิลออกเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือในรูปของ สัญญาณแอนโค๊ดคิงของ ไบนารีคือสัญญาณเอาท์พุทของดิจิทัลทรานสดิวเซอร์จะเป็นโค้ด ไบนารี ป้อนกลับ ไปยังตัวควบคุมแบบดิจิทัลเพื่อควบคุมให้ได้คุณสมบัติการทำงานของระบบเป็นไปตามที่ ต้องการ

## 2.2 องค์ประกอบของระบบเซอร์โว ( Elements of System)

จุดมุ่งหมายในบทนี้เป็นการอธิบายถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบเซอร์โว เช่น คีชีเซอร์ โวมอเตอร์ ( คีชีมอเตอร์แบบต่าง ๆ ) เอชีเซอร์โวมอเตอร์ ( อินคซ์รันมอเตอร์แบบ 2 เฟส) สเต็ปปีง มอเตอร์แบบต่าง ๆ และพวกส่วนประกอบประเภทเชิงกลที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปในระบบการควบคุมที่มีการป้อนกลับ เช่น ระบบลิคสกรู ระบบเฟือง ระบบสายพาน และระบบเกียร์ เป็นต้น

### 2.2.1 หลักการทำงานของคีชีมอเตอร์

คีชีมอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของ เพลาของคีชีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลาของคีชีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟิลด์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\phi I \quad (2-5)$$

เมื่อ  $T$  คือแรงบิดของเพลา มีหน่วยเป็นนิวตัน - เมตร

$\phi$  คือเส้นแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์

$I$  คือกระแสเป็นแอมแปร์

และ  $K$  คือตัวคงที่ ดังนั้นแรงบิดของเพลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลของเส้นแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะสัดส่วนกับความเร็วของเพลาของมอเตอร์และด้านกร ไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลาของมอเตอร์คือ

$$E = K\phi\omega \quad (2-6)$$

เมื่อ  $E$  คือ โวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็น โวลต์

$\phi$  คือ เส้นแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์

$\omega$  คือ ความเร็วของมอเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียน / วินาที

## 2.3 การแยกประเภทของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะวิธีการสร้างสนามแม่เหล็กของตัวมอเตอร์และขึ้นอยู่กับพื้นฐานการออกแบบ โครงสร้างของอาร์มาเจอร์การแบ่งประเภทตามลักษณะการจ่ายสนามแม่เหล็กแยกออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. ดีซีมอเตอร์แบบปรับเส้นแม่เหล็กได้
2. ดีซีมอเตอร์แบบเส้นแม่เหล็กมีค่าคงที่

ถ้าเราจะพิจารณาแยกประเภทตามลักษณะการออกแบบโครงสร้างอาร์มาเจอร์สามารถแยกออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์เป็นแกนเหล็ก
2. ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์ที่มีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว
3. ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์เป็นขดลวดหมุน

นอกจากนี้ยังมีคีมอเตอร์ชนิดพิเศษอีกแบบหนึ่งคือ แบบ ไม่มีแปรงถ่าน ( brushless dc motor ) ซึ่งมีหลักการทางเทคโนโลยีเหมือนกับคีมอเตอร์ชนิดมีแปรงถ่านยกเว้น การเชื่อมมิวเทชันกระทำโดยเทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์แทนที่จะกระทำโดยวิธีการทางเชิงกล

### 2.3.1 คีมอเตอร์แบบปรับเสถียรแรงแม่เหล็กได้

คีมอเตอร์แบบปรับเสถียรแรงแม่เหล็ก ได้ยังแบ่งแยกได้เป็น 2 แบบคือ

ก) แบบขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์มาเจอร์

ข) แบบขดลวดสนามแม่เหล็กแยกกระตุ้น

มอเตอร์แบบขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมจะมีเสถียรแม่เหล็กเป็นสัดส่วนกับกระแสตั้งนั้นเสถียรของสนามแม่เหล็กจึงสามารถปรับค่าได้ และเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดเป็นอนาลิเนียร์

การต่อมอเตอร์แบบดังกล่าวจะใช้งานในภาวะเฉพาะเมื่อต้องการแรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ และแรงบิดต่ำที่ความเร็วสูง เช่น ระบบการขับเคลื่อนของรถตัก

### 2.3.2 มอเตอร์แบบเสถียรแรงแม่เหล็กคงที่

ระบบการกระตุ้นฟิสิกส์ของมอเตอร์โดยทั่วไปในปัจจุบันมักใช้เป็นแบบแม่เหล็กถาวร ในระบบนี้เสถียรของฟิสิกส์จะมีค่าคงที่ค่านั้น อัตราส่วนระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิดจะมีค่าคงที่ คำนวณสมการ (2-5) เขียนให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$T = K_t I \quad (2-7)$$

และสมการ (2-7) ได้เป็น

$$E = K_e \omega \quad (2-8)$$

ระบบนี้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดและความเร็วอยู่ในลักษณะลิเนียร์สมการทางไฟฟ้าของคีมอเตอร์แบบนี้เขียนได้เป็น

$$V = K_e \omega + L \frac{di}{dt} + R_i \quad (2-9)$$

เมื่อ  $V$  คือ โวลต์เตจที่ป้อนให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $K_s$  คือ ค่าคงที่ของโวลต์เตจย้อนกลับ
- $L$  คือ อินдукแตนซ์ของอาร์มาเจอร์
- $R$  คือ ความต้านทานที่ขั้วของมอเตอร์

สมการไดนามิกของมอเตอร์คือ

$$T_g = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_r + T_L \quad (2-10)$$

- เมื่อ  $T_g$  คือ แรงบิดที่กำหนดโดยมอเตอร์
- $J$  คือ ผลรวมของโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด
- $B$  คือ สัมประสิทธิ์ของวิสกอสแด็มพ์ปีง
- $T_r$  คือ แรงบิดเสียดทานภายใน
- $T_L$  คือ แรงบิดโหลด

สมการต่าง ๆ ของมอเตอร์แบบแยกกระตุ้นฟิลด์จะเหมือนกับแบบกระตุ้นฟิลด์คงที่ อย่างไรก็ตามข้อดีของมอเตอร์แบบฟิลด์แม่เหล็กถาวรซึ่งเหนือกว่ามอเตอร์แบบมีโครงสร้างของฟิลด์ด้วยการพันของขดลวดคือ ไม่มีกำลังสูญเสียในฟิลด์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าและมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่มีขนาดของกำลังม้าเท่ากันนอกจากนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นในสมการ (2-5) ยังให้ค่าของกระแสอาร์มาเจอร์ที่สูงกว่าดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์เป็นขดลวด การประยุกต์ใช้งานเหมาะกับระบบที่ต้องการแรงบิดของโหลดสูง

### 2.3.3 ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์เป็นแกนเหล็ก

โครงสร้างของมอเตอร์แบบนี้มีโมเมนต์ของแรงเฉื่อยสูงที่สุด และมีค่าอินдукแตนซ์ของโรเตอร์สูงที่สุดด้วยคั้งนั้นมอเตอร์นี้จึงมีปริมาณความจุความร้อนได้สูง และสามารถจะทนโอเวอร์โหลดได้ในระยะเวลาที่ยาวนานโดยไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย

### 2.3.4 ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์มีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว

การออกแบบของโรเตอร์ที่มีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว โดยไม่มีสลีตทำให้ได้อินдукแตนซ์ของโรเตอร์ต่ำกว่าแบบแกนเหล็ก ข้อเสียคือ ทำให้ขนาดของมอเตอร์แบบนี้ใหญ่ขึ้นและราคาแพงกว่าแบบแกนเหล็กด้วย

### 2.3.5 ดีซีมอเตอร์แบบอาร์มาเจอร์เป็นขดลวดหมุน

มอเตอร์แบบขดลวดหมุนนี้ได้รับการออกแบบเพื่อให้มีโมเมนต์ของแรงเฉื่อยน้อยมาก และรูปลักษณะโครงสร้างภายนอกและโครงสร้างของแม่เหล็กมอเตอร์แบบนี้มีช่องว่างอากาศ (airgap) ระหว่างแม่เหล็กมากกว่ามอเตอร์ทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างของแม่เหล็กให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้ช่องว่างของอากาศระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่เท่ากับของมอเตอร์ทั้งสองแบบดังกล่าว นอกจากนี้โครงสร้างของโรเตอร์มีความจุความร้อนต่ำมากถ้าหากเกิดโอเวอร์โวลต์ก็จะทำให้มอเตอร์เสียได้ง่ายและโรเตอร์ลักษณะนี้จะมีค่าอินดักแตนซ์ต่ำมากคือน้อยกว่า 10 ไมโครเฮนรี่

มอเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่อีกลักษณะหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างของอาร์มาเจอร์เป็นรูปร่างจานซึ่งทำขึ้นจากขดลวดตัวนำซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ซึ่งเรามักจะเรียกกันว่า "printed motor" ตัวอย่างอีกอันหนึ่งของมอเตอร์แบบขดลวดเคลื่อนที่ (หมุน) ซึ่งเป็นมอเตอร์ขนาด 7 แรงม้าซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในงานเครื่องมือกลได้ก็สามารถให้แรงบิดได้สูงถึง 100 ft-lb และพัลส์กระแสได้ถึง 800 แอมป์ ในปัจจุบันดีซีมอเตอร์แบบโรเตอร์เป็นขดลวดหมุนนี้ให้คุณสมบัติการทำงานที่ดีเยี่ยมเหมาะสมสำหรับเป็นตัวขับเคลื่อนในระบบการบังคับตำแหน่ง และยังให้อัตราส่วนระหว่างแรงบิดและแรงเฉื่อยได้สูงและมีค่าอินดักแตนซ์ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบอื่น ๆ นอกจากนี้ความสามารถในการเพิ่มอัตราเร่งยังกระทำได้สูง  $10^6$  เรเดียน / วินาที<sup>2</sup>

### 2.3.6 ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน

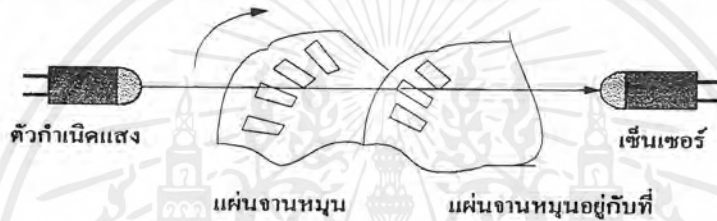
ดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านต่างจากดีซีมอเตอร์ที่กล่าวแล้วคือ การคอมมิวเทชันกระแสอาร์มาเจอร์จะใช้วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างของมอเตอร์แบบนี้จะมีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กยึด "back iron" และขดลวดคอมมิวเตชันจะอยู่ภายนอกส่วนของตัวโรเตอร์ ( เปรียบเทียบกับดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปแล้วจะมีโครงสร้างที่มีส่วนประกอบกลับกัน) การประยุกต์ใช้งานของดีซีมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านนี้มักจะใช้ในระบบที่ต้องการโมเมนต์ของแรงเฉื่อยต่ำ เนื่องจากโครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์แบบนี้สร้างขึ้นด้วยสารแม่เหล็กชนิดพิเศษเพื่อให้เป็นมอเตอร์ชนิดที่มีโมเมนต์ของแรงเฉื่อยต่ำ

การจัดคอมมิวเทชันในมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านจะกระทำไ้ภายนอกตัวมอเตอร์ โดยใช้วงจรสวิทช์ซึ่งรวมเข้ากับมอเตอร์เพื่อให้เข้าใจการบังคับมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านดียิ่งขึ้น เอนโค้ดเดอร์ที่เพลาของมอเตอร์แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องชิงโครไนซ์คอมมิวเทชันสวิทช์ซึ่งกับตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์

## 2.4 อินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์

ในระบบการบังคับตำแหน่งหรือความเร็วของมอเตอร์ต้องใช้อินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์หรือเอนโค้ดเดอร์สำหรับรักษาตำแหน่งและสำหรับสร้างสัญญาณป้อนกลับโดยที่ตัวเอนโค้ดเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่แปรผันตรงกับการหมุนของเพลลาซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของเพลลา มอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ได้

อินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือตัวกำเนิดแสง จานหมุน (rotary disk) จานอยู่กับที่และตัวเซ็นเซอร์ บนแผ่นจานหมุนทำเป็นช่องโคจรอบคังแสดงในรูป 2.12 และบนแผ่นอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสงผ่านตรงเข้าไปยังตัวเซ็นเซอร์ ถ้าเป็นเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้วัดความเร็วค่าไม่ต้องมีแผ่นอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟหรือ LED ก็ได้ดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกลไกของออฟได้อินทรีเม้นท์



รูปที่ 2.13 แสดงถึงตัวเซ็นเซอร์แบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียว

### 2.4.1 ความละเอียดของอินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์

ความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์คือจำนวนคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตต่อการหมุนของเพลลา 1 รอบ ซึ่งบวกเป็นจำนวนพัลส์ต่อรอบหรือจำนวนไซเคิลต่อ 360 องศา มุมทางเชิงกลหรือไซเคิลต่อองศา เอนโค้ดเดอร์ที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปมีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 พัลส์ต่อรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติเนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดี่ยว ถ้าเราต้องการให้แสงที่ผ่านช่องไปยังเซ็นเซอร์เป็นเส้นตรงพร้อม ๆ กัน (collimation) ก็ทำได้โดยใช้เลนส์หรือ พาราโบลิกรีเฟลคเตอร์

จำนวนพัลซ์ต่อ 1 รอบของสัญญาณที่เอนโค้ดเดอร์สร้างออกมาจะเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของช่องว่างกับความกว้างของแถบที่ระหว่างช่องว่างจะเท่ากัน เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาความกว้างของช่องว่าง ( $\omega$ ) ได้จาก

$$\omega = \frac{\pi D}{2N} \quad (2-11)$$

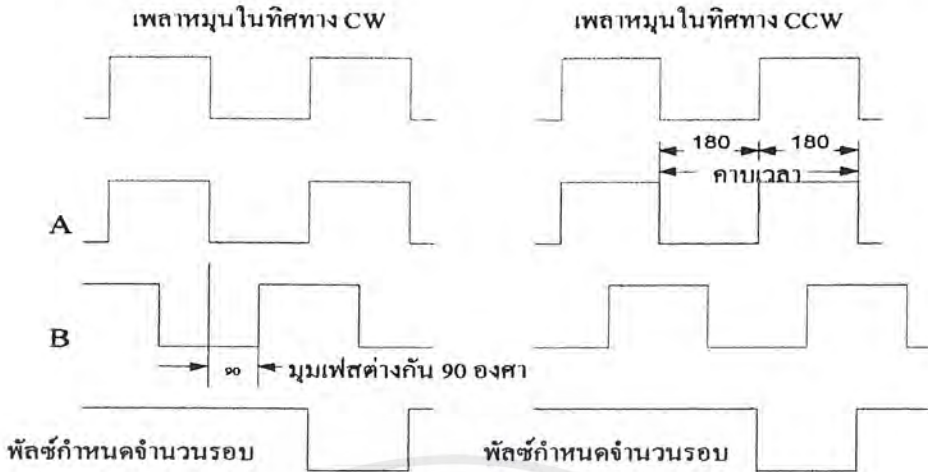
- เมื่อ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่นจาน  
 $N$  = จำนวนของความละเอียดเป็นพัลซ์ต่อรอบ  
 $\omega$  = ความกว้างของช่องว่าง

ค่าของตัวแปรของสมการ ถ้าให้  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นหมุนของตัวเอนโค้ดเดอร์ค่าประมาณที่ใกล้เคียงมากของค่าความกว้างของช่องว่าง แสดงได้ดังนี้

$$\omega = \frac{0.75\pi D}{2N} \quad (2-12)$$

#### เอาต์พุทของเอนโค้ดเดอร์

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วสัญญาณเอาต์พุทที่ออกจากเอนโค้ดเดอร์โดยตรงจะมีระดับไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างลูกคลื่นสัญญาณต่อไว้ในตัวเอนโค้ดเดอร์ด้วยเสมอ สัญญาณลูกคลื่นที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ปกติแล้วจะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปสัญญาณซายน์ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้โดยการต่อตัวคอมพาราเตอร์เข้ากับลิเนียร์แอมพลิไฟของเอนโค้ดเดอร์ก็จะได้อาต์พุทเป็นลูกคลื่นสี่เหลี่ยมตามต้องการ



รูปที่ 2.14 รูปบนตัวอย่างลูกคลื่นเอาท์พุทสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์เอนโค้ดเดอร์ช่องเดียว  
รูปล่างตัวอย่างสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ 2 ช่องที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา

รูป 2.14 แสดงถึงลูกคลื่นเอาท์พุทสี่เหลี่ยมของเอนโค้ดเดอร์ชนิด 1 ช่อง ไม่ว่าจะเพลทจะหมุนในทิศทางใดก็ได้ สัญญาณออกมาเหมือนกันจึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่กำหนดทิศทางเท่านั้น ส่วนในรูปล่างนั้นแสดงสัญญาณ 2 ชุดที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์ชนิด 2 ช่องเฟสของสัญญาณ 2 ช่องนี้จะต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าเราเรียกสัญญาณ 2 ช่องนี้ว่าเป็นควอดราเจอร์ (quadrature) กันซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการรับรู้ทิศทางการหมุนของเพลทหรือใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อนอื่น ๆ จากสัญญาณ จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้ง 2 ช่องจะเริ่มจาก 0 ถึง 1 และ 1 ถึง 0 ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแผ่นหมุนของเอนโค้ดเดอร์

ในอินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์บางชนิดจะมีพัลส์แสดงถึงจำนวนรอบของการหมุนสำหรับใช้เป็นศูนย์ในการอ้างอิงพัลส์ที่ใช้แสดงจำนวนรอบนี้จะเกิดขึ้น 1 พัลส์ต่อ 1 รอบ โดยทั่วไปแล้วใช้บอกถึงตำแหน่งเชิงกลหรือใช้เป็นสัญญาณเคลียร์จำนวนที่นับไว้ในหน่วยเก็บข้อมูล

#### 2.4.2 รีโซลเวอร์เป็นเสมือนอินทรีเม้นท์เอนโค้ดเดอร์

รีโซลเวอร์เป็นเอนโค้ดเดอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้งานในระบบควบคุมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวแปลงระยะพิกัด (coordinate) ตัวเคลื่อนที่สัญญาณผิดพลาด ตัวเลื่อนเวลาหรือเฟสและใช้สำหรับการส่งข้อมูล

ตัวรีโซลเวอร์ทำด้วยแกนเหล็ก สเตเตอร์มี 2 โพล และมีขดลวดพันอยู่ของลวดที่พันบนสเตเตอร์จะถูกจัดให้แยกกันด้วยเฟส 90 องศาทางไฟฟ้า และมีโรเตอร์ 2 อัน ด้วยขดลวดที่มีขดลวดที่มีมุมต่างกัน 90 องศาทางเชิงกล ถ้าเป็นรีโซลเวอร์ชนิด 3 เฟส ก็จะมีขดลวดบนโรเตอร์เพียงขดเดียว

เมื่อป้อนโวลต์เตจ  $E_{s1}$  และ  $E_{s2}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่เข้าที่ขดลวดทั้ง 2 บนสเตเตอร์จะได้โวลต์เตจเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในโรเตอร์ดังนี้

$$E_{r1} = E_{s1} \cos \theta + E_{s2} \sin \theta \quad (2-13)$$

$$E_{r2} = E_{s2} \sin \theta - E_{s1} \cos \theta \quad (2-14)$$

โวลต์เตจที่คร่อมขดลวดของโรเตอร์ทั้งสองจะเป็นผลบวกและผลต่างของ Cosine และ Sine ของมุมการหมุนของโรเตอร์ และโวลต์เตจที่ได้ทั้ง 2 นี้จะมีมุมต่างกัน 90 องศา เราเรียกว่าเป็น ควอดราราเจอร์กันจะเห็นได้ว่าโวลต์เตจของโรเตอร์ทั้ง 2 นี้สามารถเป็นตัวบวกตำแหน่งของโรเตอร์ และควอดราราเจอร์โวลต์เตจนี้ยังสามารถบอกทิศทางการหมุนของโรเตอร์ด้วย อย่างไรก็ตามในระบบการบังคับตำแหน่งเนื่องจากโรเตอร์โวลต์เตจแต่ละค่าจะมีค่าเป็นศูนย์ (null) อยู่ 2 จุด ในทุก ๆ หนึ่งรอบหรือ 360 องศาที่โรเตอร์หมุนไปรีโซลเวอร์ดังกล่าวจะมีโพลจำนวนน้อยจึงเหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่ต้องการความแตกต่างของตำแหน่งเป็นศูนย์ในระบบควบคุมเท่านั้น

ส่วนสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่เป็นอินคริเมนทัลการรับรู้ตำแหน่งการเคลื่อนที่บน สเตเตอร์ต้องมีโพลเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นสิ่งที่ยุ่งยากเมื่อใช้กับแกนเหล็ก

### 2.4.3 อินดักโตซิน

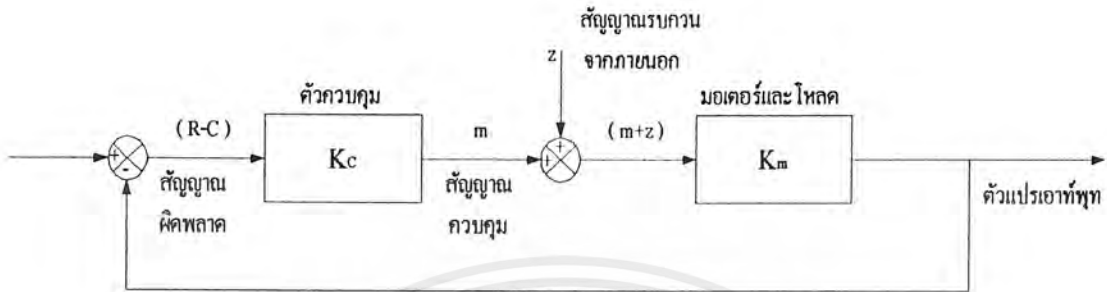
อินคริเมนทัลเอน โค้ดเดอร์แบบอินดักโตซิน เป็นทรานสดิวเซอร์แบบหลายโพลที่มีความเที่ยงตรงสูงซึ่งอาจใช้สำหรับกำเนิดตำแหน่งและข้อมูลความเร็ว อินดักโตซินมีเป็นแบบลิเนียร์และโรตารีขดลวดของสเตเตอร์และโรเตอร์ทำด้วยวงจรแผ่นพิมพ์ (printed circuit) บนแผ่นเหล็กกล้าหรืออลูมิเนียม

## 2.5 การควบคุมแบบอนาล็อกและดิจิทัล

ในระบบการควบคุมมอเตอร์ จุดมุ่งหมายของตัวควบคุมก็คือเพื่อที่จะปรับตัวแปรเอาต์พุต C ของระบบให้เข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ (ตัวแปรอ้างอิง R) และจะต้องรักษาค่าตัวแปรดังกล่าวให้อยู่ที่ค่าที่กำหนดนั้น เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายนี้ตัวควบคุมจะต้องแก้ไขผลกระทบของสัญญาณรบกวนจากภายนอกในวิถีทางที่เหมาะสม

ระบบการควบคุมมอเตอร์แบบพื้นฐานแสดงได้ในรูปที่ 2.16 ตัวควบคุมจะปรับตัวแปรเอาต์พุต C โดยใช้สัญญาณควบคุม m เพื่อไปทำให้สัญญาณผิดพลาด (R - C) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำ

ได้ สัญญาณรบกวนจากภายนอกที่กระทำต่อระบบจะเข้ามารวมกับตัวแปรได้ผลรวมเป็น  $(m + z)$  จากรูปที่ 2.16 เป็นระบบที่เป็นลิเนียร์ ดังนั้นเราจะได้ว่า



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์

$$m = K_c (R - C) \text{ และ } C = K_m (m + z) \quad (2-15)$$

เมื่อ  $K_m$  เป็นมอเตอร์และโหลด ดังนั้นเราจะหาตัวแปรเอาต์พุต  $C$  ได้เป็น

$$C = \frac{K_c K_m}{1 + K_c K_m} \cdot R + \frac{K_m}{1 + K_c K_m} \cdot z \quad (2-16)$$

จากสมการที่ (2-16) เราจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมมอเตอร์ต่ออินพุตอ้างอิง  $\partial C / \partial R$  มีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากที่สุดเมื่อกำลังขยายของลูปมีค่ามาก ๆ ผลตอบสนองต่อสัญญาณ

$$g = K_c K_m = \frac{\partial C}{\partial R} \quad (2-17)$$

โดยที่  $z$  คือ สัญญาณรบกวนจากภายนอก

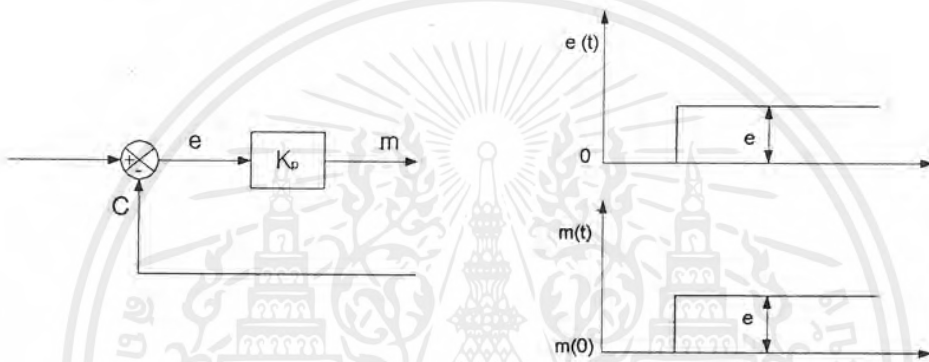
รบกวนภายนอก  $\partial C / \partial z$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากเมื่อกำลังขยาย  $K_c$  ของตัวควบคุมมีค่ามาก อย่างไรก็ตามกำลังขยายของลูป  $g$  มีค่าที่ถูกจำกัดคือเมื่อกำลังขยายมีค่ามากเกินเฟสชิฟต์ (phase shifts) ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ภายในควบคุมเป็นลูปจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเป็นเหตุให้เกิดการออสซิลเลชันจุดประสงค์ของวิศวกรรมการควบคุมก็เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดนี้โดยการควบคุมให้สัญญาณผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดและมีคุณสมบัติการตอบสนองของระบบด้วยเหตุผลนี้เราจึงต้องออกแบบตัวควบคุมให้มีส่วนของอินทิเกรเตอร์และดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์ร่วมเข้ากับการควบคุมแบบพีอีพีอาร์ขั้นแรก ดังนั้น การควบคุมแบบพีอีพีอาร์จะต้องถูกเปลี่ยนให้ไปเป็นการควบคุมแบบพีไอ หรือแม้กระทั่งเป็น

การควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งเราได้กล่าวถึงหลักทฤษฎีของ การควบคุมแบบพี และ การควบคุมแบบพีไอดี พร้อมตัวควบคุมแบบอนาล็อกและดิจิทัลต่อไป

## 2.6 คุณสมบัติของตัวควบคุม

### 2.6.1 การควบคุมแบบพร้อปพอร์ชันแนล

สัญญาณตัวแปรเพื่อการแก้ไขของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ 2.16



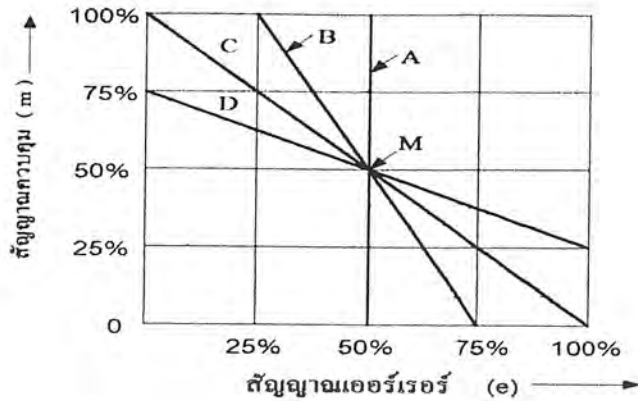
รูปที่ 2.16 แสดงตัวควบคุมแบบพร้อปพอร์ชันแนล

$$m = K_p e + m(o) \quad (2-18)$$

เมื่อ  $K_p$  คือกำลังขยายของตัวควบคุมพร้อปพอร์ชันแนล  
 $m(o)$  คือเอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อสัญญาณรบกวนเป็นศูนย์

การควบคุมแบบนี้มักจะแสดงอยู่ในรูปของพร้อปพอร์ชันแนลแบนด์ (PB) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่า PB คือค่าสัญญาณผิดพลาดที่ทำให้สัญญาณควบคุมเปลี่ยนไปร้อยละเมื่อ PB เท่ากับ 50% หมายถึงสัญญาณผิดพลาดเกิดขึ้น 50% สัญญาณควบคุมจะเปลี่ยนไป 100% ดังแสดงในรูปที่ 2.17

$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100 \quad [\%] \quad (2-19)$$



รูปที่ 2.17 พรีอพออร์ชันแนลแบนด์

A	: PB = 0%	,	$K_p = \infty$	(100/0)
B	: PB = 50%	,	$K_p = 2$	(100/50)
C	: PB = 100%	,	$K_p = 1$	(100/100)
D	: PB = 200%	,	$K_p = 0.5$	(100/200)
M	: เป็นค่าคงที่			

จากรูปที่ 2.17 แสดงว่าค่า PB เป็นตัวบอกความไวของการแก้ความผิดพลาดจึงอาจเรียกค่า  $K_p$  ว่า ความไวของการควบคุมแบบพรีอพออร์ชันแนล ได้อีกชื่อหนึ่ง โทลคเปลี่ยนแปลงในระบบควบคุมแบบพรีอพออร์ชันแนล

$$\frac{\theta_0}{\theta_L} = \frac{1/(Ts+1)}{1+K_pA/(Ts+1)} = \frac{1}{Ts+1+K_pA}$$

$$\frac{\theta_0}{\theta_L} = \frac{A_2}{Ts+1}$$

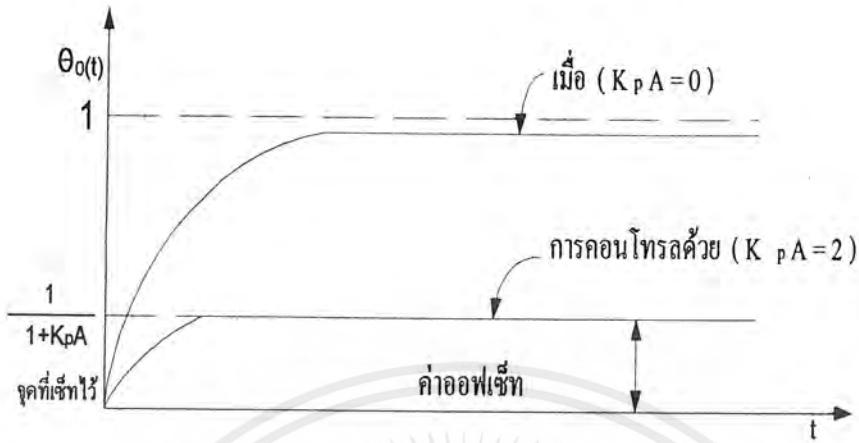
เมื่อ  $A_2 = \frac{1}{1+K_pA}$

$$T_i = \frac{T}{1+K_pA}$$

ค่าออฟเซ็ท  $= \theta_i(\infty) - \theta_0(\infty) = 0 - \frac{1}{1+K_pA}$

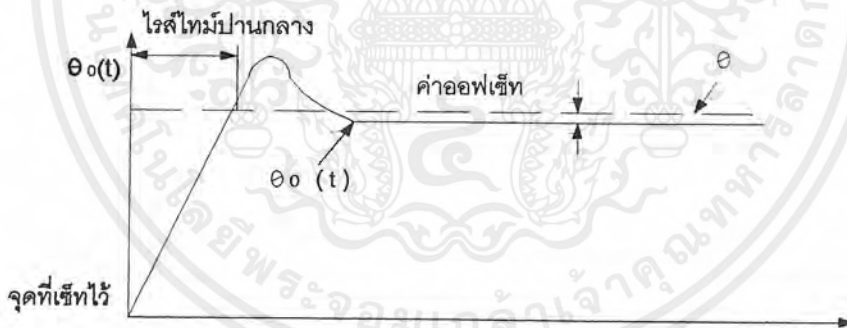
$$= -\frac{1}{1+K_pA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงผลตอบสนองของระบบการควบคุมแบบพี ต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบยูนิคสเตป

ออฟเซตเออร์เรอร์จะเป็นตัวจำกัดการใช้งานของระบบการควบคุมแบบพีหรือพีเออร์ชั้นแนล และการควบคุมแบบนี้จะใช้งานได้ในบางกรณีเท่านั้น



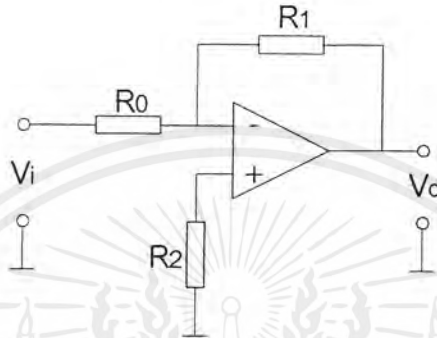
รูปที่ 2.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต (\$\theta\$) แบบยูนิคสเตป

การควบคุมแบบพีหรือพีเออร์ชั้นแนลจะใช้งานได้เฉพาะในระบบที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลง โหลดมากนัก หรือระบบที่ไม่มีกระบวนการที่มีไทม์แล็กน้อย ๆ หมายถึงระบบจะต้องมีพีหรือพีเออร์ ชั้นแนลแบนด์น้อย ( $K_p$  มีค่ามาก) ซึ่งจะทำให้ค่าออฟเซตเออร์เรอร์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 พี – คอนโทรลเลอร์ (การควบคุมแบบพรีอพออร์ชันแนล)

การควบคุมแบบได้แก่อินทรีย์แอมพลิไฟเออร์ซึ่งเป็นพวกออฟแอมป์ที่มีการป้อนกลับด้วยความต้านทาน ดังนั้นค่าเฟสชิฟท์ของมันจึงมีค่าน้อยมาก และอัตราขยายของลูป (  $g$  ) ของระบบควบคุมจะมีค่ามากกว่าหนึ่ง ตัวอย่างของ การควบคุมแสดงได้ในรูปที่ 2.20

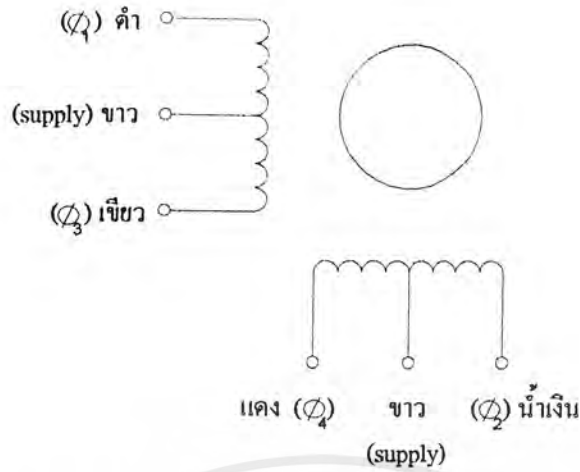


รูปที่ 2.20 วงจรการควบคุมแบบ พี

## 2.7 สเต็ปปีงมอเตอร์

สเต็ปปีงมอเตอร์เปรียบเสมือนทรานสดิวเซอร์แบบแปลงไฟฟ้าไปเป็นเชิงกลซึ่งมีอินพุทเป็นกลุ่มของไบนารีโวลต์เฉจ และเอาท์พุทเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ในเชิงมุมเป็นสเต็ปด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าว สเต็ปปีงมอเตอร์จึงได้รับการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวป้อนกระแส และกำหนดช่องทางของบรรทัดในไลน์ปรินเตอร์, x-y พล็อตเตอร์, ขับเครื่องจักรกลที่คอนโทรลด้วยคอมพิวเตอร์, แรมด้อม-แอ็คเซสดีสค์เมโมรีจนกระทั่งถึงหุ่นยนต์โดยขนาดของแต่ละสเต็ปอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 องศา ถึง 30 องศา

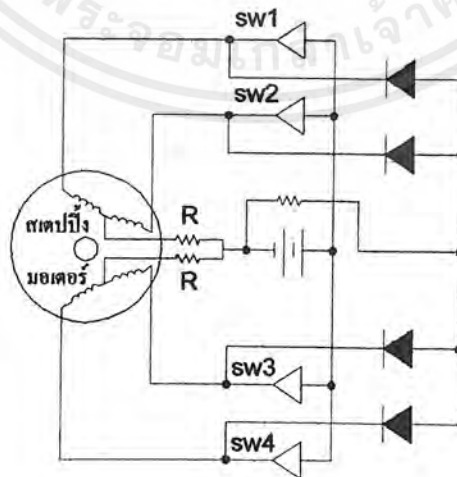
สำหรับสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 4 – เฟสแบบแม่เหล็กถาวร รุ่น 103-708-51 ของบริษัท SANYO DENKI โดยมอเตอร์ตัวแรกมีมุมสเต็ปเท่ากับ 1.8 องศา เมื่อใช้ในการขับสเต็ป และ 0.9 องศา เมื่อใช้ในการขับแบบครึ่งสเต็ป ลักษณะของลวดสเตเตอร์เป็นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะขดลวดสเตเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส รุ่น 103-708-51

ซึ่งนำมาต่อกับวงจรสวิตซ์แต่ละเฟสด้วยดีซีเพาเวอร์จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.22

สำหรับวงจรดังรูปที่ 2.22 มีส่วนที่ใช้ลดโวลต์เตจที่เกิดขึ้นขณะที่มีการสวิตซ์ซึ่งโวลต์เตจเหล่านี้จะทำให้มีการทำงานผิดพลาด และอาจจะทำให้มอเตอร์หรือไดรฟ์เวอร์เสียหายได้ วิธีที่ใช้ส่วนมากคือใช้ไดโอดค้อนาน ซึ่งใช้เบอร์ 1N4002, 1N4003 และตัวความต้านทานใช้ค่าในระหว่าง 0 ถึง 50 โอห์ม หรือจะใช้คาปาซิเตอร์แทนก็ได้โดยมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 1 ไมโครฟารัดแล้วแต่สภาพของสวิตซ์ที่ใช้มอเตอร์ก็จะหมุนในลักษณะ 200 สเต็ปต่อรอบ ( $1.8^{\circ}$  ต่อสเต็ป) เมื่อใช้ลำดับอินพุทเป็นแบบ 4 สเต็ป (Full-Step mode) และ 400 สเต็ปต่อรอบ ( $0.9^{\circ}$  ต่อสเต็ป) เมื่อใช้ลำดับอินพุทเป็นแบบ 8 สเต็ป (Half-Step mode)



รูปที่ 2.22 วงจรสวิตซ์ให้แต่ละเฟสนำกระแสด้วยดีซีเพาเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตป	1	2	3	4	1
SW1	ON	OFF	OFF	ON	ON
SW2	ON	ON	OFF	OFF	ON
SW3	OFF	ON	ON	OFF	OFF
SW4	OFF	OFF	ON	ON	OFF

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับอินพุตเป็นแบบ 4 สเตป (FULL-STEP MODE)

ถ้าเราให้สวิตช์ ON เป็นสถานะนำกระแส มีค่า = 1 และสวิตช์ OFF เป็นสถานะหยุดนำกระแสมีค่า = 0 ก็อาจเขียนใหม่ได้ดังตารางที่ 2.2 ลักษณะการหมุนทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา โดยมองจากด้านตรงข้ามกับค่าของการขับเฟสคือจำนวนเฟสที่ได้รับการนำกระแสที่สเตปหนึ่ง ๆ นอกจากตารางที่ 2.2 สำหรับมอเตอร์ 4  $\phi$  ยังมีลำดับการขับเฟสดังตารางที่ 2.3 และ 2.4

เฟส \ สเตป	1	2	3	4	1
$\phi_1$	1	0	0	1	0
$\phi_2$	1	1	0	0	1
$\phi_3$	0	1	1	0	0
$\phi_4$	0	0	1	1	0
ทวนเข็มนาฬิกา					▶
ตามเข็มนาฬิกา	◀				

ตารางที่ 2.2 มอเตอร์ 4 เฟสขับแบบทีละ 2 เฟส

เฟส \ สเตป	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$\phi_1$	1	1	0	0	0	0	0	1	1
$\phi_2$	0	1	1	1	0	0	0	0	0
$\phi_3$	0	0	0	1	1	1	0	0	0
$\phi_4$	0	0	0	0	0	1	1	1	0
ทวนเข็มนาฬิกา									▶
ตามเข็มนาฬิกา	◀								

ตารางที่ 2.3 มอเตอร์แบบ 4 เฟสขับแบบ 1-2 เฟสสลับกัน (แบบ □ สเตป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

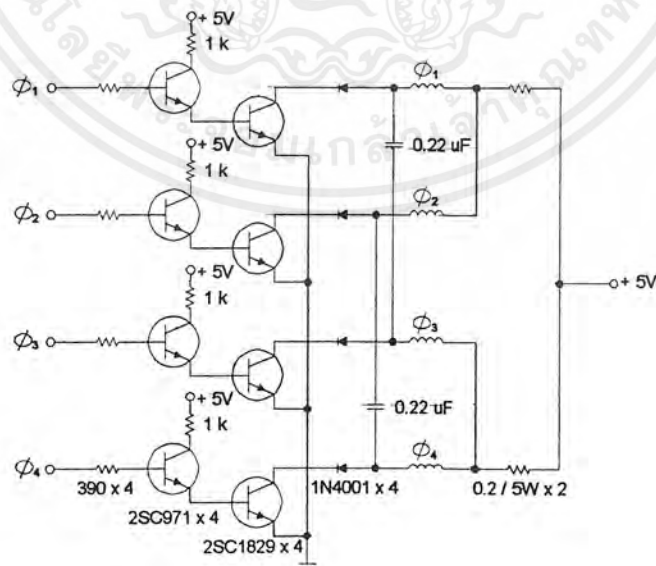
เฟส \ สเตป	1	2	3	4	1
$\phi_1$	0	0	0	1	0
$\phi_2$	1	0	0	0	1
$\phi_3$	0	1	0	0	0
$\phi_4$	0	0	0	0	0
ทวนเข็มนาฬิกา	→				
ตามเข็มนาฬิกา	←				

ตารางที่ 2.4 มอเตอร์แบบ 4 เฟสขับเคลื่อนแบบทีละเฟส

จากการทดลองพบว่าสเต็ปิ่งมอเตอร์ในแบบแม่เหล็กถาวรจะมีทอร์คอยู่เล็กน้อยซึ่งเป็นผลให้โรเตอร์ถูกยึดไว้ตามตำแหน่งสเต็ป ถึงแม้ว่าจะไม่ได้ป้อนไฟให้กับมอเตอร์ก็ตาม และถ้าได้นำกระแสด้วยคิซีโวลต์เตจให้ 1 หรือ 2 เฟส ขณะที่มอเตอร์ไม่ได้สเต็ปจะได้ Holding Torque ที่สูงมาก และ Holding Torque ที่ได้จากการนำกระแสเพียง 1 เฟส จะมีค่าราว ๆ 60 % ถึง 70 % เมื่อเทียบกับ การนำกระแสพร้อม ๆ กัน 2 เฟส แต่แบบ Variable reluctance ขณะที่ไม่ได้ป้อนไฟให้จะมี Residual torque อยู่เล็กน้อย

การควบคุมความเร็วของสเต็ปิ่งมอเตอร์ทำได้โดยกำหนดค่าดีเลย์ใหม่ในระหว่างการสเต็ป ( ค่าดีเลย์ระหว่างกลุ่ม ไบนารี อินพุท )

วงจรรีเลย์เวอร์ วงจรรีเลย์เวอร์สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส ใช้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรรีเลย์เวอร์สำหรับสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสเตปมอเตอร์แต่ละตัวสามารถเลือกตารางการขับเฟสกำหนดความเร็วได้โดยกำหนดเป็นค่า delay time ระหว่างสเตปสามารถเลือกได้ตั้งแต่ 0.1 ms ถึง 6553.6 ms จำนวนสเตปสามารถกำหนดได้ตั้งแต่ 1 step ถึง 65536 step และทิศทางการหมุนสามารถกำหนดแบบตามเข็มนาฬิกา และแบบทวนเข็มนาฬิกาได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

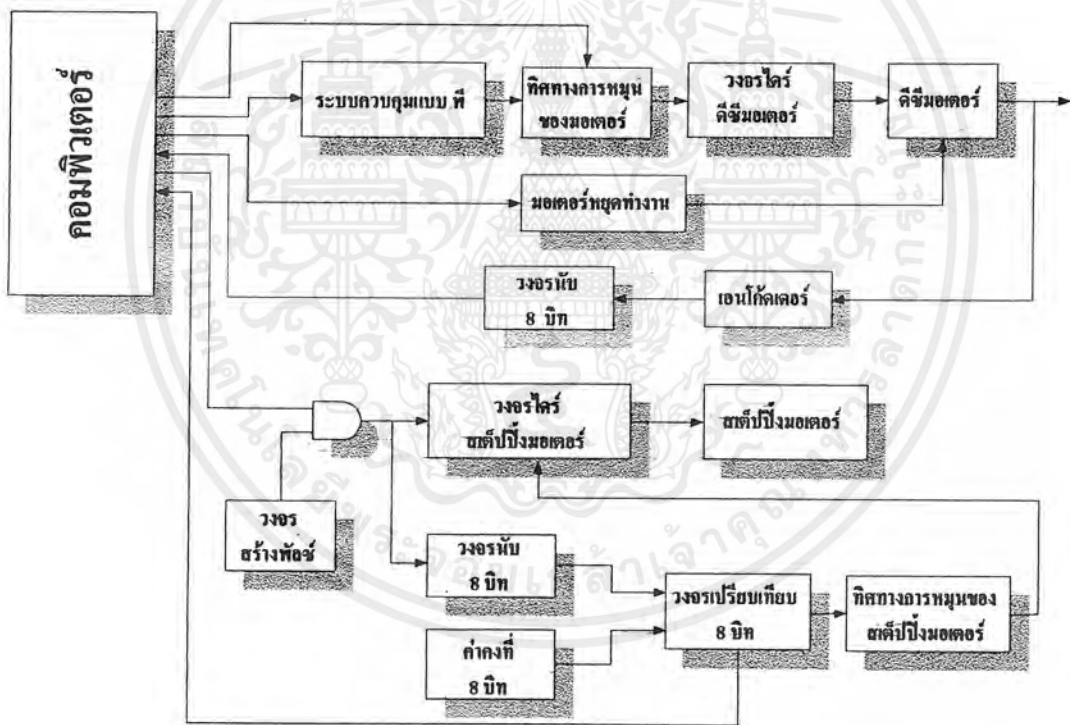
# บทที่ 3

## การออกแบบและการสร้าง

### การออกแบบชุดควบคุม

ชุดควบคุมที่ทำการออกแบบนั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ควบคุมตำแหน่งองศาและความเร็วของมอเตอร์ และในส่วนที่ 2 จะเป็นส่วนของควบคุมตำแหน่งและความเร็วของสตีปิ้งมอเตอร์โดยใช้ในส่วนที่ใช้สำหรับเครื่องดนตรี

ซึ่งทั้งสองส่วนที่กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถอธิบายได้จากบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมการทดลองสำหรับแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ส่วนของดีซีมิเตอร์

#### 3.1.1 การออกแบบและจัดสร้างชุดควบคุมแบบ พี

ชุดควบคุมแบบพีนี้จะใช้คุณลักษณะของ IC เบอร์ UA741 MC34071 หรือ LF351 ซึ่งเป็น ไอซีออปแอมป์ขนาด 8 ขา การออกแบบจะสามารถปรับค่า  $K_p$  ได้ โดยจะใช้ค่าความต้านทานปรับค่า ได้ในการปรับค่าสามารถคำนวณหาค่า  $K_p$  ได้จาก

$$K_p = \frac{R_f}{R_i} \quad (3.1)$$

เลือก  $R_i = 1 \text{ K}\Omega$

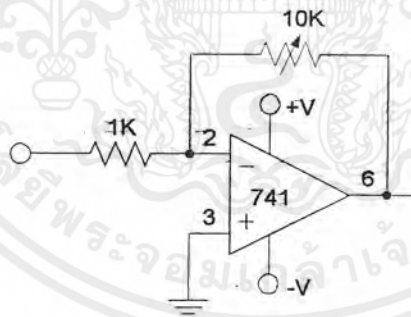
จะได้

$$K_p = \frac{R_f}{1 \text{ K}\Omega}$$

สมมติเราต้องการ  $K_p = 2$  เราต้องเลือก  $R_f = 2 \text{ K}\Omega$

$$K_p = \frac{2 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega} = 2$$

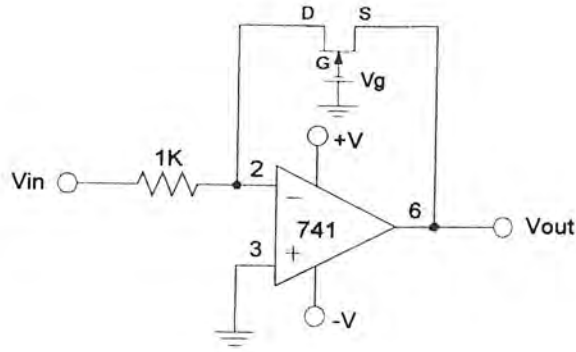
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรตัวควบคุมแบบพี ซึ่งจากวงจรจะเห็นได้ว่าเป็นวงจรขยายกลับสัญญาณ ซึ่งสามารถปรับเกนได้ ซึ่งก็คือการปรับค่า  $K_p$  นั้นเองด้วย  $V_{R_i}$  และเมื่อเราป้อนสัญญาณที่อินพุตเข้าไปแล้วจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตจะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุตเนื่องจากเราป้อนสัญญาณเข้าทางขา Inverting ของ Op Amp



รูปที่ 3.2 วงจรตัวควบคุมแบบพี

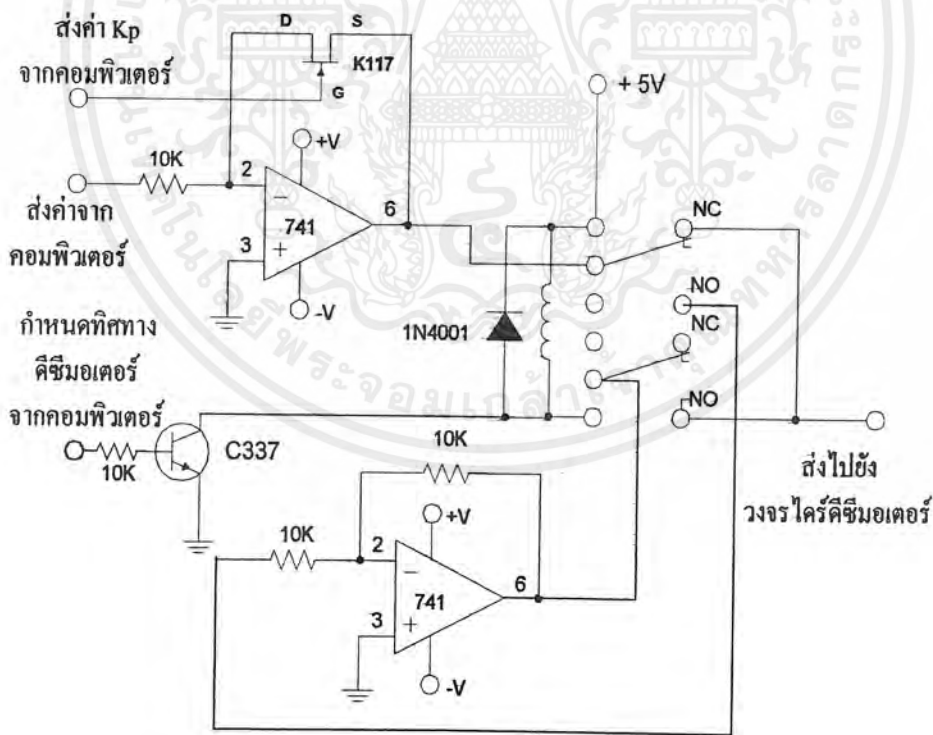
แต่วงจรที่ใช้ในโครงการนี้จะทำการปรับค่าเกน  $K_p$  ด้วย Field Effect Transistor (FET) โดยอาศัยคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์  $V_{gs}$  คือระหว่าง Gate กับ Source ของ FET ซึ่งมีผลทำให้ drain resistance (หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า dynamic drain source resistance) และนำ FET นี้ไปต่อแทนค่าความต้านทานปรับค่าได้ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรตัวควบคุมแบบพีทีไอใช้งานจริง

แต่จากการควบคุมเราจะให้มอเตอร์สามารถหมุนกลับทิศทางไปมาได้โดยการควบคุมที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์เพื่อมาทำการทริกให้รีเลย์ทำงาน โดยป้อนแรงดันที่มาจากวงจรควบคุมแบบพีไอเอาต์แอมป์ อีกตัวหนึ่งเพื่อทำการกลับเฟสแล้วส่งไปยังวงจรไคร์คิซิมอเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4

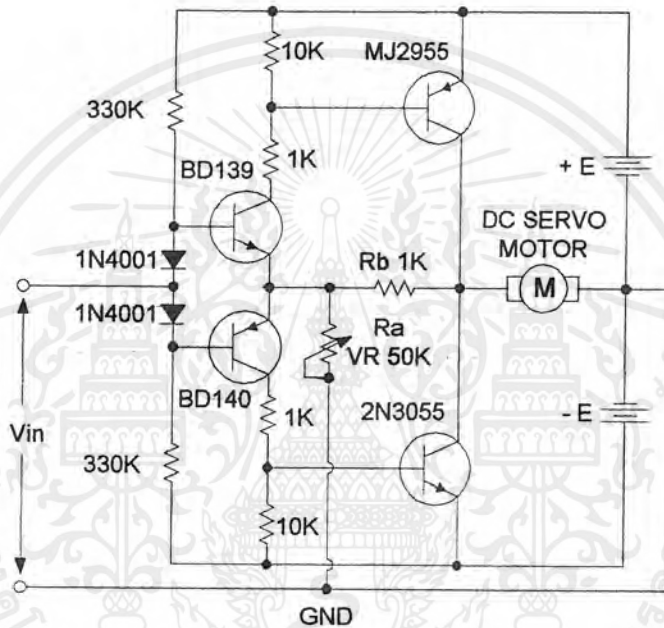


รูปที่ 3.4 แสดงวงจรเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การสร้างวงจรไคร์คีซีมอเตอร์

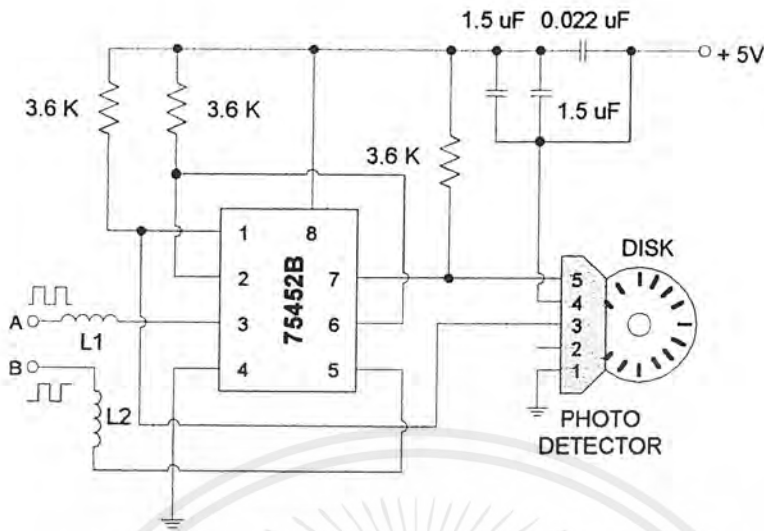
วงจร ไคร์คีซีมอเตอร์นี้จะสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้จากสัญญาณอินพุต โดยจะให้สัญญาณอินพุตที่เข้ามาเป็นบวกหรือลบ และวงจรนี้จะใช้แบบ Bidirectional Circuit. ซึ่งจะใช้ ตัวต้านทาน ไดโอด และทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN โดยจะผลัดกันทำงานทีละตัวตามสัญญาณที่เข้ามาทางอินพุต ค่าความต้านทาน  $R_a$  และ  $R_b$  จะเป็นตัวกำหนดอัตราขยายแรงดันด้วย  $(R_a+R_b)/R_a$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจร ไคร์คีซีมอเตอร์

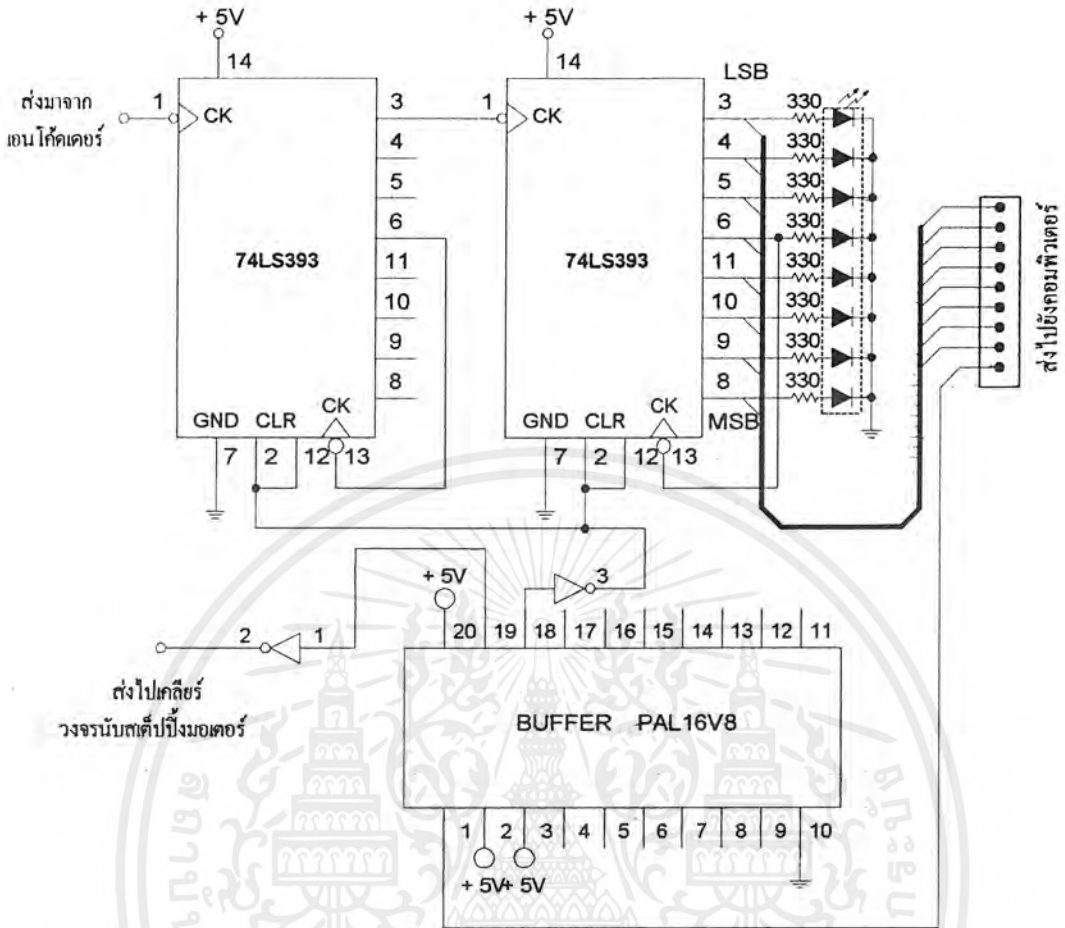
### 3.1.3 การสร้างวงจรเอนโค้ดเดอร์ และวงจรนับ 8 บิต

เมื่อเราทำการสั่งให้มอเตอร์ทำการหมุนในทิศทางที่ต้องการแล้วนั้นที่ตัวมอเตอร์จะทำการสร้างพัลส์ขึ้นมาเพื่อส่งไปยังวงจรนับและแสดงผลให้รู้ว่ามอเตอร์ได้หมุนไปกี่องศาหรืออยู่ตรงตำแหน่งใดแล้ว โดยสัญญาณที่ได้นี้จะมาจากตัวเอนโค้ดเดอร์ที่มีจานคิสต์ติดอยู่กับเพลาของคิซีมอเตอร์ และมี LED อินฟราเรดคอยส่งแสงผ่านจานคิสต์ไปยังตัวรับแสง เพื่อนำสัญญาณจากตัวรับแสงนี้ไปใช้งาน ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรเอนโค้ดเดอร์ที่แปลงสัญญาณแสงเป็นพัลส์

จากนั้นสัญญาณที่มาจากเอนโค้ดเดอร์ก็จะมาเข้าวงจรนับแต่ก่อนที่จะทำการนับได้นั้นจะต้องทำการหารความถี่ก่อนเนื่องจากความถี่ที่ออกมาจากเอนโค้ดเดอร์ นั้นมีความถี่ค่อนข้างสูงจึงไม่สามารถที่จะกำหนดจำนวนบิตในการกำหนดตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ และเมื่อทำการหารความถี่เรียบร้อยแล้วโดยทำการหารด้วย T-ฟลิปฟลอป จากนั้นเอาท์พุทที่ออกมาจากฟลิปฟลอปก็จะมาเข้าวงจรนับ ซึ่งต่อโดย IC 74LS393 ไอซีตัวนี้จะทำการนับความถี่ได้ 8 บิต เพื่อส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์แล้ว 8 บิต ที่ได้นี้จะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า 8 บิตที่อยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งค่า 8 บิต นี้ก็คือแรงดันที่ส่งมายังตัวควบคุมแบบพี โดยทำการแปลงมาเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยวงจร DAC วงจรหารความถี่และวงจรนับ 8 บิต นี้แสดงดังรูปที่ 3.7



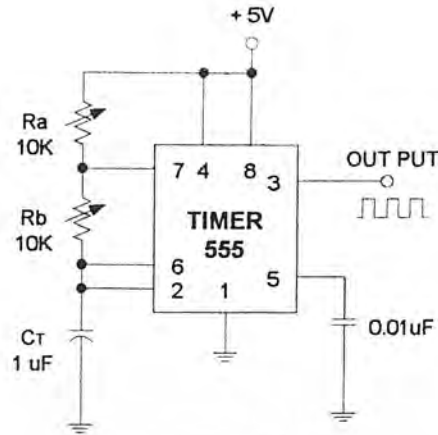
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรหารความถี่และวงจรมับ 8 บิต

### 3.2 ส่วนของสเตปป์มอเตอร์

ส่วนนี้จะเป็นส่วนในการควบคุมแขนกลในข้อต่อที่ 2 ซึ่งใช้สเตปป์มอเตอร์ สำหรับใช้ในการตีเครื่องดนตรี โดยในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยวงจรสร้างพัลส์ความถี่โดยใช้ IC เบอร์ 555 วงจรนับ 8 บิต วงจรเปรียบเทียบ 8 บิต และวงจรไคร์สเตปป์มอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะเป็นดังนี้

#### 3.2.1 วงจรสร้างพัลส์ความถี่

วงจรสร้างความถี่นี้จะใช้ IC 555 ที่รู้จักและนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งเราจะสร้างเป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ โดยแสดงคังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

จากวงจรดังกล่าวสามารถหาค่าความถี่เอาต์พุตได้จาก

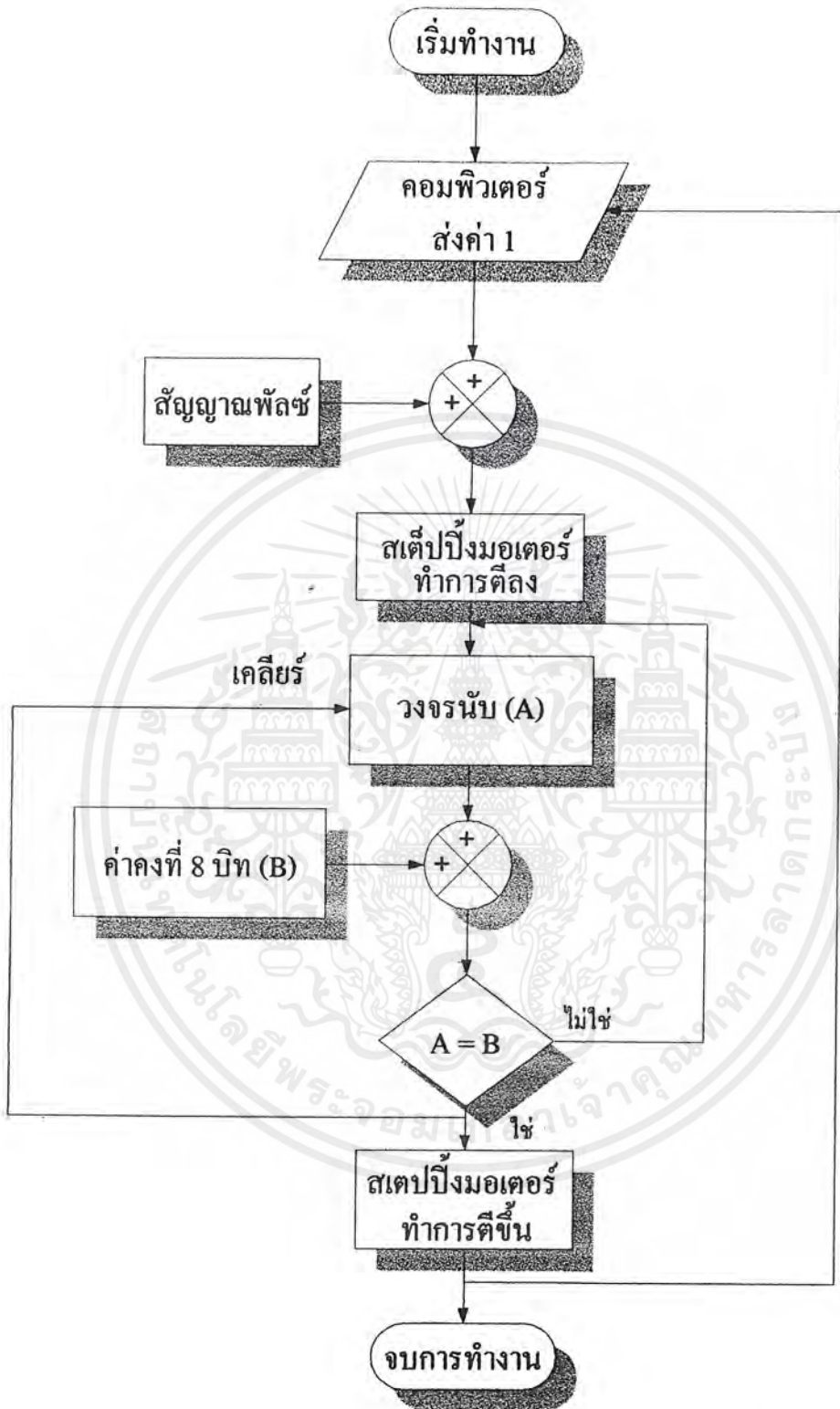
$$F = 1.44 / \{(Ra + 2Rb)Cr\} \quad (3.2)$$

เช่น เมื่อให้  $Ra = 3K$   $Rb = 2K$  และ  $Cr = 1\mu F$  จะได้

$$\begin{aligned} F &= 1.44 / \{(3K + 2(2K))1\mu F\} \\ &= 205.714 \text{ Hz} \end{aligned}$$

### 3.2.2 วงจรนับ 8 บิต และวงจรเปรียบเทียบ 8 บิต

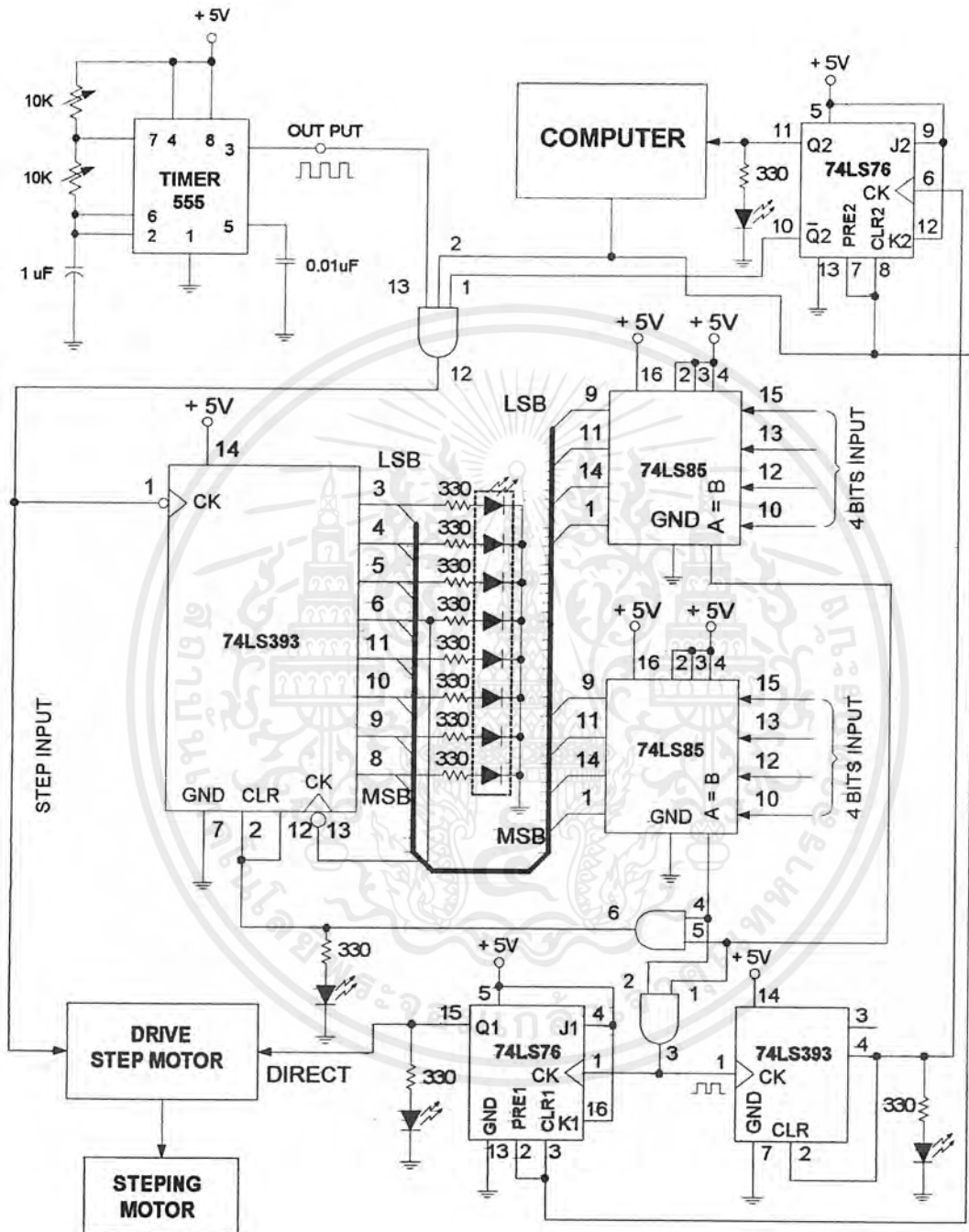
การทำงานของวงจรมีดังนี้คือเมื่อไม่มีการส่งข้อมูลเข้ามาจากคอมพิวเตอร์หรือสัญญาณข้อมูลเป็น 0 วงจรนับจะไม่ทำงานแต่เมื่อไรที่มีสัญญาณเข้ามาจากคอมพิวเตอร์เป็น 1 จะทำให้มีสัญญาณพัลส์ความถี่ป้อนเข้าวงจรไคร์สเต็ปปีงมอเตอร์ จากนั้นสเต็ปปีงมอเตอร์ก็จะทำการติลง และวงจรมันก็จะทำการนับต่อไปเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับค่าคงที่ 8 บิต แล้วส่งสัญญาณ 1 นี้ให้กับ J-K ฟลิปฟลอป และตั้งเคลียร์วงจรมัน แล้วสั่งให้ J-K ฟลิปฟลอปส่งบิต 1 ไปยังวงจรไคร์สเต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนทิศทางการติลงเป็นติขึ้นแทน ส่วนวงจรมันก็จะทำการเริ่มต้นนับใหม่จนมีค่าเท่ากับค่าคงที่ 8 บิต ก็จะส่งสัญญาณเคลียร์วงจรมันพร้อมกับส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อบอกว่าขณะนี้ส่วนของสเต็ปปีงมอเตอร์ได้ทำงานเสร็จแล้วและเคลียร์สัญญาณที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ให้เป็น 0 ทำให้ส่วนของสเต็ปปีงมอเตอร์หยุดทำงาน ซึ่งการทำงานต่างสามารถแสดงเป็นผังงานได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผังงานแสดงการทำงานส่วนของสเตปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผังงานข้างต้นสามารถแสดงเป็นวงจร ได้ดังรูปที่ 3.10

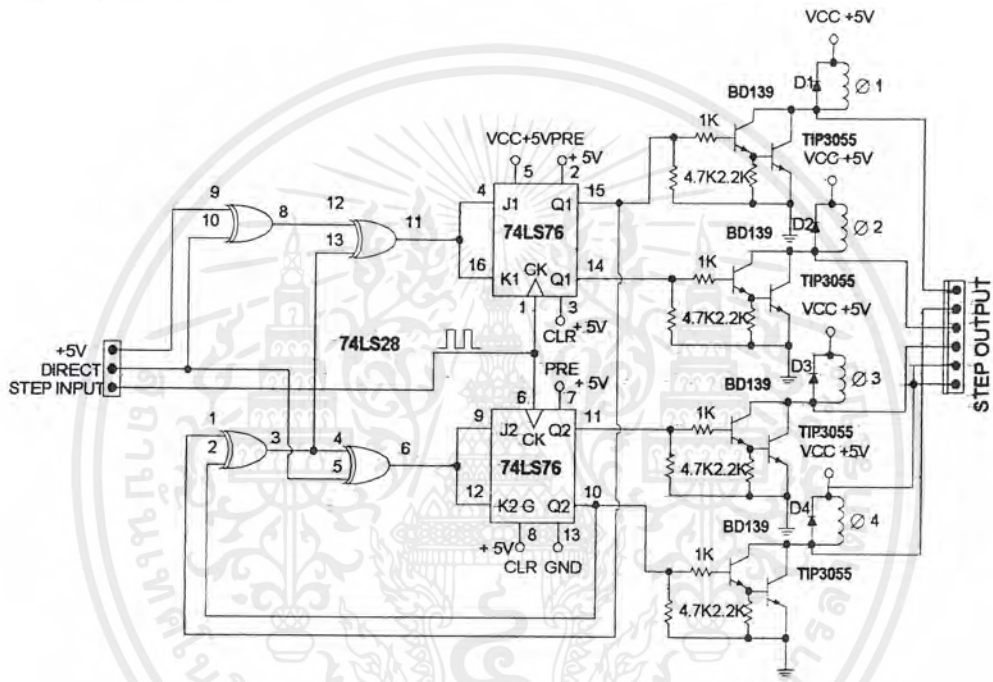


รูปที่ 3.10 แสดงวงจรในส่วนของสตีปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ส่วนของวงจรไคร์สตีปปีงมอเตอร์

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการไคร์สตีปปีงมอเตอร์ให้ทำการหมุนตามความเร็วและมุมเฟสที่กำหนด โดยในส่วนของความเร็วนั้นจะถูกกำหนดโดยค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ความถี่ที่ส่งมาจากวงจรสร้างความถี่โดย IC 555 และมุมเฟสนั้นจะถูกกำหนดโดยจำนวนบิตที่เซตจากค่าคงที่ 8 บิตซึ่งถ้าค่าจำนวนบิตมากก็จะมีมุมเฟสมากตามไปด้วยจึงทำให้ช่วงจังหวะในการตีเครื่องคนตรีมีช่วงกว้าง วงจรนี้แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงวงจร ไคร์สตีปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

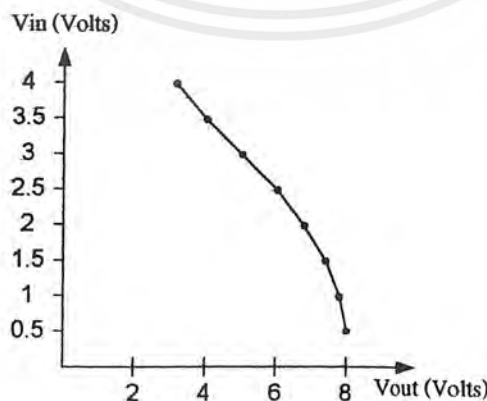
ในการทดลองของชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อตอนนี้ส่วนมากจะใช้ LED คู่กับวงจรเป็นจุดทดสอบเป็นส่วนมากเนื่องจากวงจรส่วนใหญ่จะเป็นวงจรดิจิทัล ซึ่งการทดลองจะแบ่งส่วนของการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนของตัวควบคุมดิจิทัลซีเอร์ไวมอเตอร์ และส่วนที่สองจะเป็นส่วนของสแต็ปมอเตอร์ โดยการทดลองดังกล่าวเป็นดังนี้

#### 4.1 การทดลองในส่วนของตัวควบคุมดิจิทัลซีเอร์ไวมอเตอร์

การทดลองในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นช่วงย่อย ๆ คือ

##### 4.1.1 วงจรตัวควบคุมแบบพี

เมื่อทำการต่อวงจรแล้วทำการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบฟันเลื่อยความถี่ 1 KHZ แล้วทำการวัดสัญญาณที่เอาต์พุตจะเห็นว่าสัญญาณที่ได้ออกมาจะมีรูปสัญญาณเป็นรูปฟันเลื่อยเหมือนเดิม และเมื่อเราทำการปรับเกนซ์ที่ความต้านทานปรับค่าได้ ก็ทำให้เราสามารถกำหนดค่าอัตราขยายได้ตามต้องการ หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนจากค่าความต้านทานปรับค่าได้เป็น FET แทนแล้วทำเช่นเดิมแต่ทำการป้อนไปเข้าที่ GATE ของ FET แล้ววัดแรงดันที่ออกมาจากเอาต์พุตก็จะมีค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันที่เราให้กับ GATE ซึ่งถ้าให้แรงดันมากก็จะทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตน้อยลงมา เนื่องจากค่าความต้านทานที่ FET มีค่าน้อยลง จึงทำให้อัตราขยายลดลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถพล็อตเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงแรงดันจากตัวควบคุมพีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า Kp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 วงจรกำหนดทิศทางการหมุนของดีซีมอเตอร์

จากวงจรจะไม่มีกระแสสัญญาณจากคอมพิวเตอรืเพื่อทำการกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ มอเตอร์ก็จะหมุนไปในทิศทางหนึ่ง แต่เมื่อมีการส่งสัญญาณจากคอมพิวเตอรืมาเป็น 1 จะทำให้สัญญาณนี้ไปให้กับเบสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ขยายกระแสส่งผ่านให้รีเลย์ทำงานเปลี่ยนหน้าสัมผัส และทำให้สัญญาณจากวงจรควบคุมที่ผ่านหน้าสัมผัสรีเลย์เข้ายังวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์จึงทำให้สัญญาณที่ออกมาต่างเฟสกัน 90 องศา และทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้าม

#### 4.1.3 วงจรโคจรดีซีมอเตอร์

เมื่อทำการทดลองวงจรนี้โดยการต่อวงจรแล้วทำการป้อนไฟขณะแรกยังไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามาวงจรจะยังไม่สามารถส่งกระแสให้มอเตอร์หมุนได้ แต่เมื่อเราให้แรงดันที่อินพุตเป็น +5 โวลต์ จะทำให้มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ PNP และส่งผ่านไปยังทรานซิสเตอร์เพาเวอร์ชนิด NPN ทำให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟ -E ไปยังดีซีมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่กำหนด และเมื่อเปลี่ยนอินพุตจาก -5 โวลต์ ก็จะทำให้การทำงานกลับเป็นตรงกันข้ามกับตอนแรก

#### 4.1.4 ส่วนของเอนโค้ดเดอร์

ส่วนนี้จะได้รับสัญญาณพัลส์ ซึ่งเกิดจากการตัดแสงจากงานคิสิก ซึ่งค่าพัลส์ความถี่ที่ได้จากตัวเอนโค้ดเดอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าสัญญาณพัลซันี้จะทำการส่งให้กับ T - ฟลิปฟลอป เพื่อทำการหารความถี่หนึ่งครั้ง แล้วส่งไปยังวงจรรนับ 8 บิต ซึ่งใช้ IC 74LS393 ทำการนับค่าออกมา 8 บิต แล้วส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอรืเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ 8 บิต ภายในคอมพิวเตอรืที่ส่งผ่าน DAC และส่งมายังวงจรถวมแบบพี ซึ่งเมื่อเท่ากันเมื่อไรคอมพิวเตอรืก็จะทำการส่งสัญญาณ 1 เพื่อทำการส่งให้ดิซีมอเตอรืหยุดหมุน ณ ตำแหน่งและองศาที่กำหนดซึ่งตำแหน่งและองศาที่กำหนดจะเป็นไปตามบิตที่กำหนดดังตารางคือ

จำนวนบิต	ตำแหน่งตัวโน้ต
0000 0110	โด
0000 1100	เร
0001 0010	มี
0001 1000	ฟา
0001 1110	ซอล
0010 0100	ลา
0010 1110	ซี
0011 0000	โด

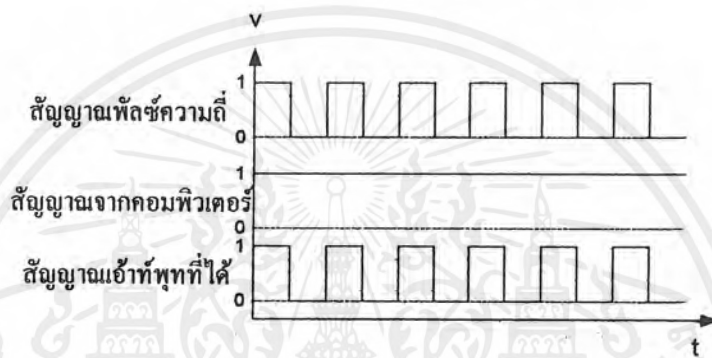
ตารางที่ 4.1 การเซตค่าตำแหน่งตัวโน้ต

## 4.2 ส่วนวงจรรไทร์สเต็ปมอเตอรื

ส่วนการทดลองในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น วงจรสร้างสัญญาณพัลซันี้เพื่อเป็นตัวขับสเต็ปมอเตอรื ทำให้สเต็ปมอเตอรืทำการติลงโดยข้อต่อส่วนที่สอง และสัญญาณพัลซันี้ก็จะทำการคูณ (AND) กับค่าบิตที่ส่งมาจากคอมพิวเตอรืซึ่งมีค่าเป็น 1 โดยผลที่ออกมาจะเป็นดังรูปที่ 4.3

จากนั้นสัญญาณที่ได้จากข้างต้นจะถูกส่งไปยังวงจรรนับ 8 บิต ซึ่งเป็นไอซีวงจรรนับเบอร์ 74LS393 และจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ 8 บิต โดย IC 74LS85 เมื่อวงจรรนับทำการนับไปเรื่อย ๆ โดยดูจาก LED แสดงผล 8 ตัวและเมื่อเท่ากัน IC 74LS85 จะส่งเอาท์พุทออกมาเป็น 1 และส่งเข้าไปยัง CLK ของ J-K ฟลิปฟลอป และเปลี่ยนสภาวะเป็น 1 ส่งผลไปยังตัวกำหนดทิศทางสเต็ปมอเตอรืให้หมุนกลับทิศทางเป็นการยกแวนส่วนข้อต่อที่สองขึ้นเป็นเวลานานเท่ากับการติลง ซึ่งเกิด

จากการนับค่าเท่ากัน และสัญญาณ 1 ที่เท่ากันครั้งแรกนี้จะส่งไปที่ IC 74LS393 ด้วย ซึ่งทำให้เอาต์พุต 74LS393 เป็น 01 จาก 00 และเมื่อวงจรนับครั้งที่สองจากการยกแขนขึ้นแล้วเปรียบเทียบเท่ากัน ก็จะส่ง 1 เป็นครั้งที่ 2 ให้กับ IC 74LS393 เป็น 10 สัญญาณนี้เองจะส่งไปยัง J-K ฟลิปฟลอป ให้เป็น 1 และส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบอกให้รู้ว่าการทำงานของสแตมป์มอเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้ว และสัญญาณ 10 นี้ก็ทำการเคลียร์สัญญาณที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ให้เป็นศูนย์ทำให้สแตมป์มอเตอร์หยุดทำงาน



รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่ได้จากการคูณ (AND) กันระหว่างสัญญาณพัลส์กับคอมพิวเตอร์

## บทที่ 5

# บทสรุป ปัญหาแนวทางแก้ไขและพัฒนา

### 5.1 บทสรุป

ชุดทดลองแบบกลนี้สามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ดีพอสมควร แต่ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งชุดทดลองนี้จะประกอบอยู่ด้วยกันสองส่วน คือ

1. ส่วนควบคุมตำแหน่งและทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง โดยจะประกอบไปด้วย ส่วนควบคุมแบบพี ส่วนควบคุมทิศทาง ส่วนวงจรถยาย ส่วนเอนโคคเคอร์ และส่วนวงจรมอเตอร์ ซึ่งจะถูควบคุมโดยคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ คือ ส่งสัญญาณแรงดันให้กับส่วนควบคุมแบบพี พร้อมทั้งกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และสามารถปรับค่าเกน  $K_p$  ได้จากคอมพิวเตอร์ และเมื่อมอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่กำหนด คอมพิวเตอร์ก็จะส่งสัญญาณมาทำให้มอเตอร์หยุด ณ ตำแหน่งตรงนั้น

2. ส่วนควบคุมสแต็ปมอเตอร์ ส่วนนี้จะประกอบไปด้วย ส่วนของวงจรถวายพัลส์ความถี่ ส่วนของวงจรมอเตอร์และเปรียบเทียบ ซึ่งทั้งหมดจะทำงานก็ต่อเมื่อมอเตอร์กระแสตรงทำการหมุนจนถึงตำแหน่งที่ต้องการและหยุดอยู่ ณ ตำแหน่งนั้นแล้ว คอมพิวเตอร์จึงจะทำการส่งสัญญาณมาให้กับส่วนนี้ โดยจะทำให้สแต็ปมอเตอร์ติลงและติขึ้นจากนั้นจึงส่งสัญญาณกลับเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเคลียร์วงจรถวายพัลส์หยุดทำงานเพื่อรอรับคำสั่งใหม่เข้ามา

### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดทำโครงการ

ในการจัดทำโครงการนี้สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้หลายส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนตัวควบคุมจะกำหนดให้ใช้เป็นแบบ PID ดังที่จะกระทำในตอนต้นไม่ได้เนื่องจากเกิดปัญหาในเรื่องของสัญญาณอินพุตที่เข้าวงจรควบคุมจะต้องเป็นสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งเป็นการยากในการออกแบบระบบ และยังมีปัญหาในเรื่องของความคิดเพี้ยนของอุปกรณ์ซึ่งก็คือ ออปแอมป์จะมีสถานะไม่เป็นศูนย์ที่แน่นอนซึ่งทำให้ระบบคิดเพี้ยนได้ง่าย

2. ปัญหาในเรื่องของระบบไฟเบรคของมอเตอร์ เนื่องจากเมื่อมีการตัดไฟเบรคออกจะทำให้วงจรมอเตอร์และวงจรในส่วนอื่น ๆ เกิดการคิดเพี้ยนเกิดขึ้นจากการสปาร์คของแรงไฟ และเราได้ทำการแก้ไขได้โดยใช้ไดโอดต่อคร่อมจุดที่ป้อนแรงดันไฟเบรคมอเตอร์

3. ปัญหาในเรื่องของการกำหนดตำแหน่งแล้วมอเตอร์เกิดการหยุดในตำแหน่งที่ไม่แน่นอนเนื่องมาจากแรงเสียดทานของสแต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางแก้ไขปัญหาและพัฒนา

แนวทางแก้ไขปัญหасสามารถแก้ไขได้ดังนี้คือ

1. พยายามออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้
2. ใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานและคุณภาพสูงกว่าที่ใช้อยู่ เช่น มอเตอร์ควรเป็นมอเตอร์ที่ใหม่ และผ่านการใช้งานมาน้อย หรือยังไม่ได้ใช้งานเลย ซึ่งมอเตอร์ที่เราใช้ในการสร้างชุดทดลองอยู่ขณะนี้มันเป็นมอเตอร์ที่เก่าจากญี่ปุ่นจึงทำให้การทำงานผิดพลาด และการจัดซื้อต้องสั่งมาจากเมืองนอกเพราะเมืองไทยไม่มีตัวแทนจำหน่าย
3. ควรจะทดลองวงจรก่อนที่จะทำจริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น PSPICE เสียก่อน
4. ควรต่อวงจรลงโป้ได้บอร์ดก่อนเพื่อความถูกต้องก่อนลงอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

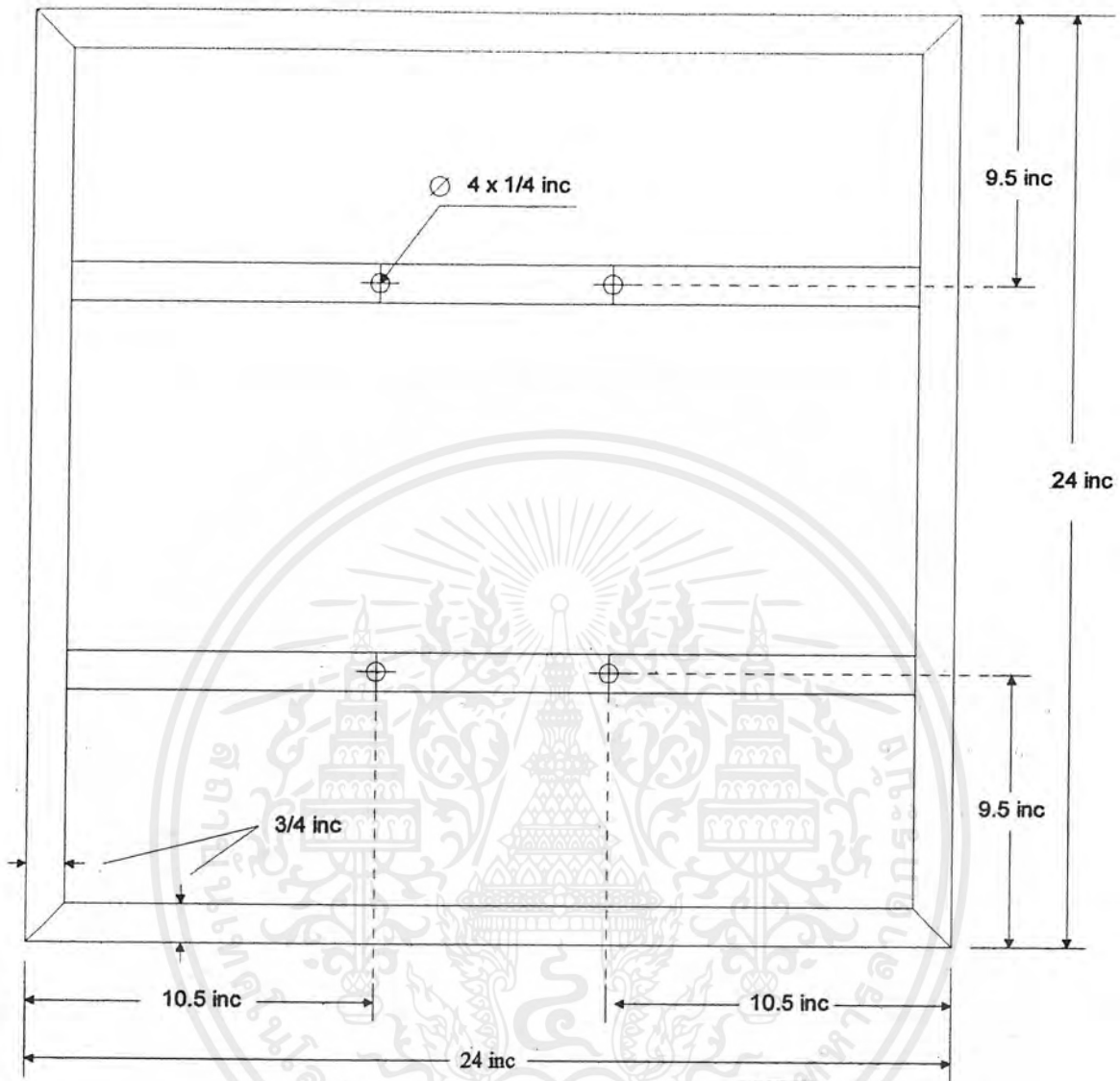




ภาคผนวก ก.

ส่วนประกอบของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

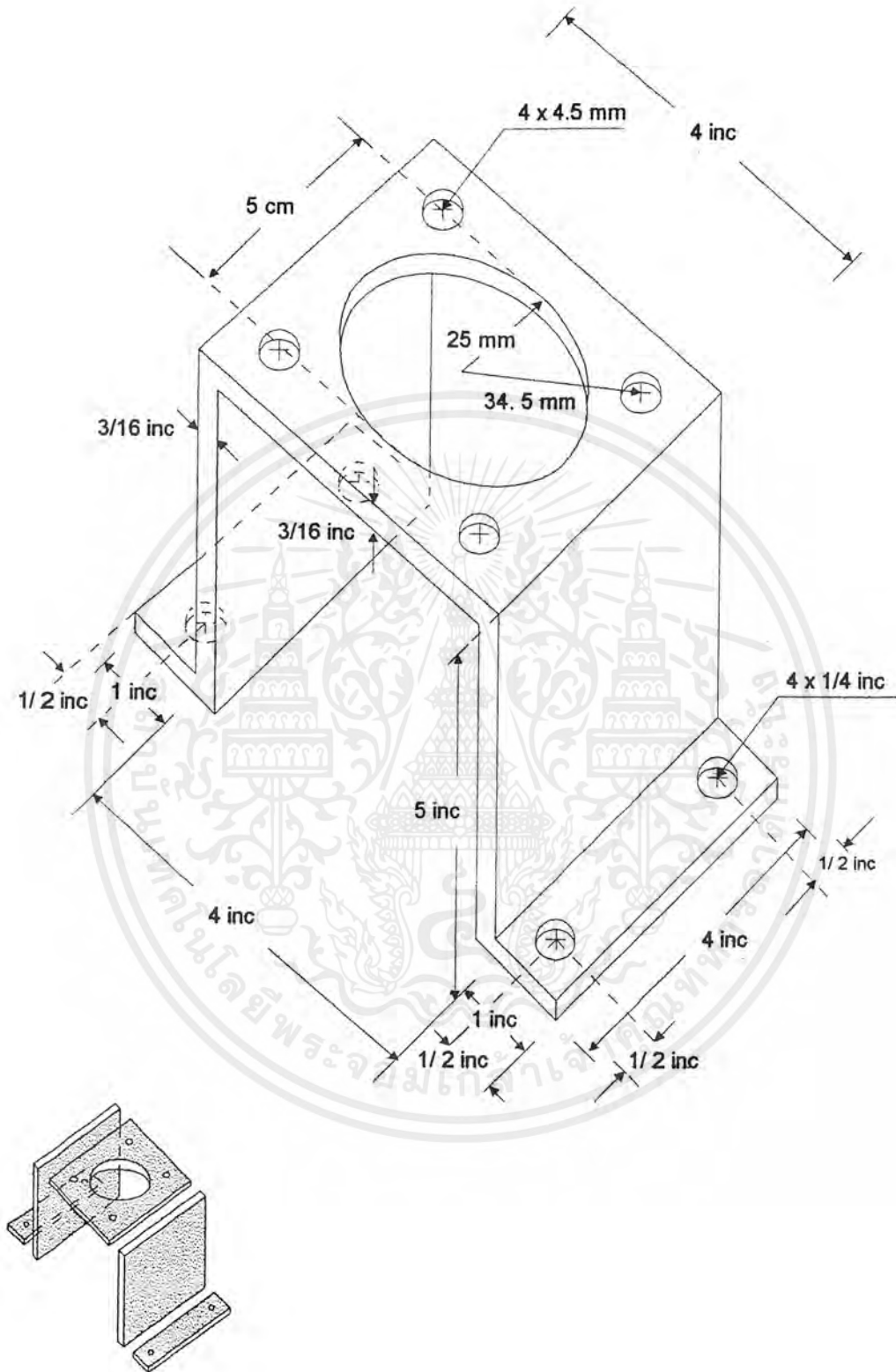


ส่วนของฐาน



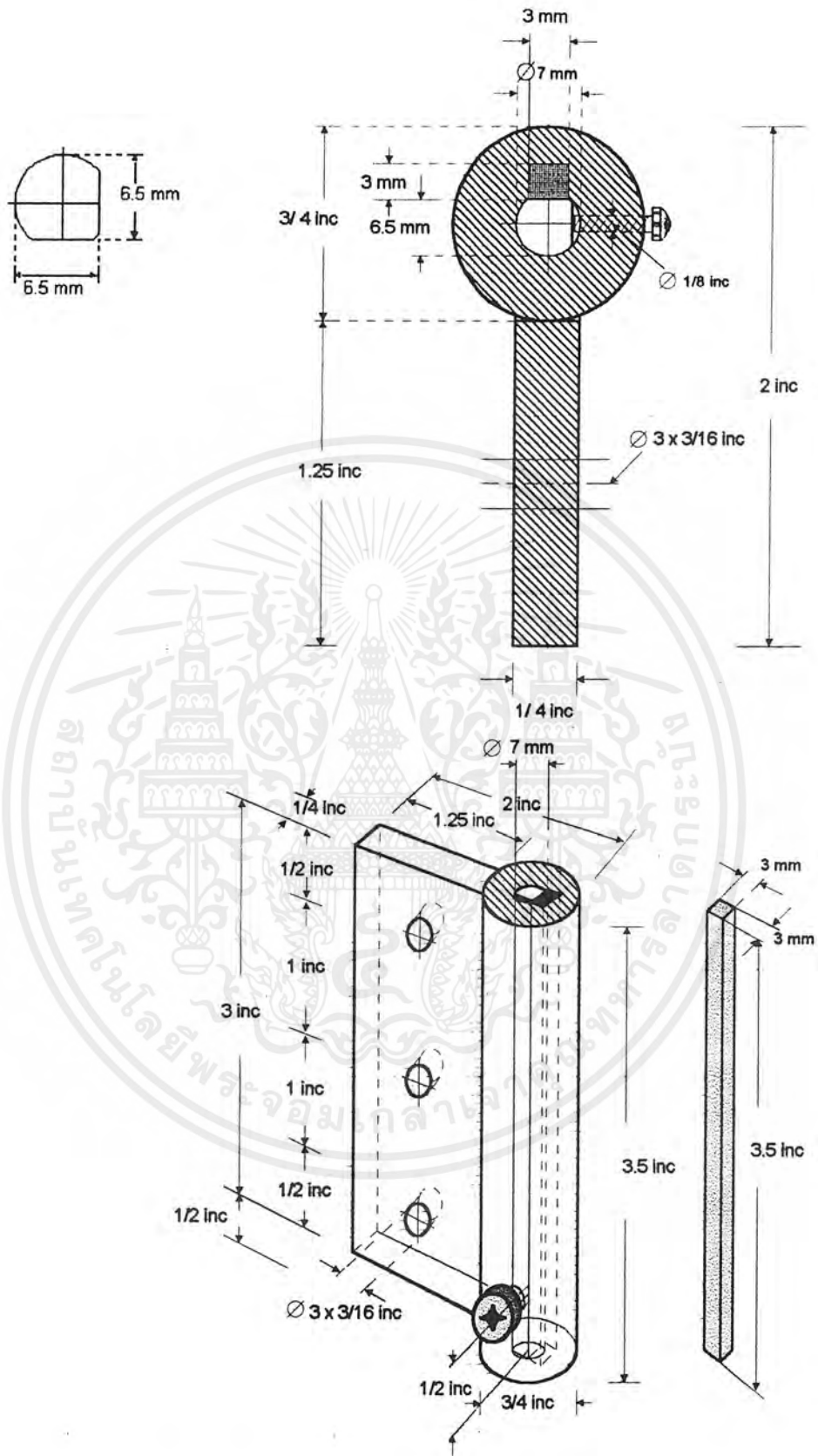
รูปที่ ก.1 แสดงส่วนประกอบของฐานของแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



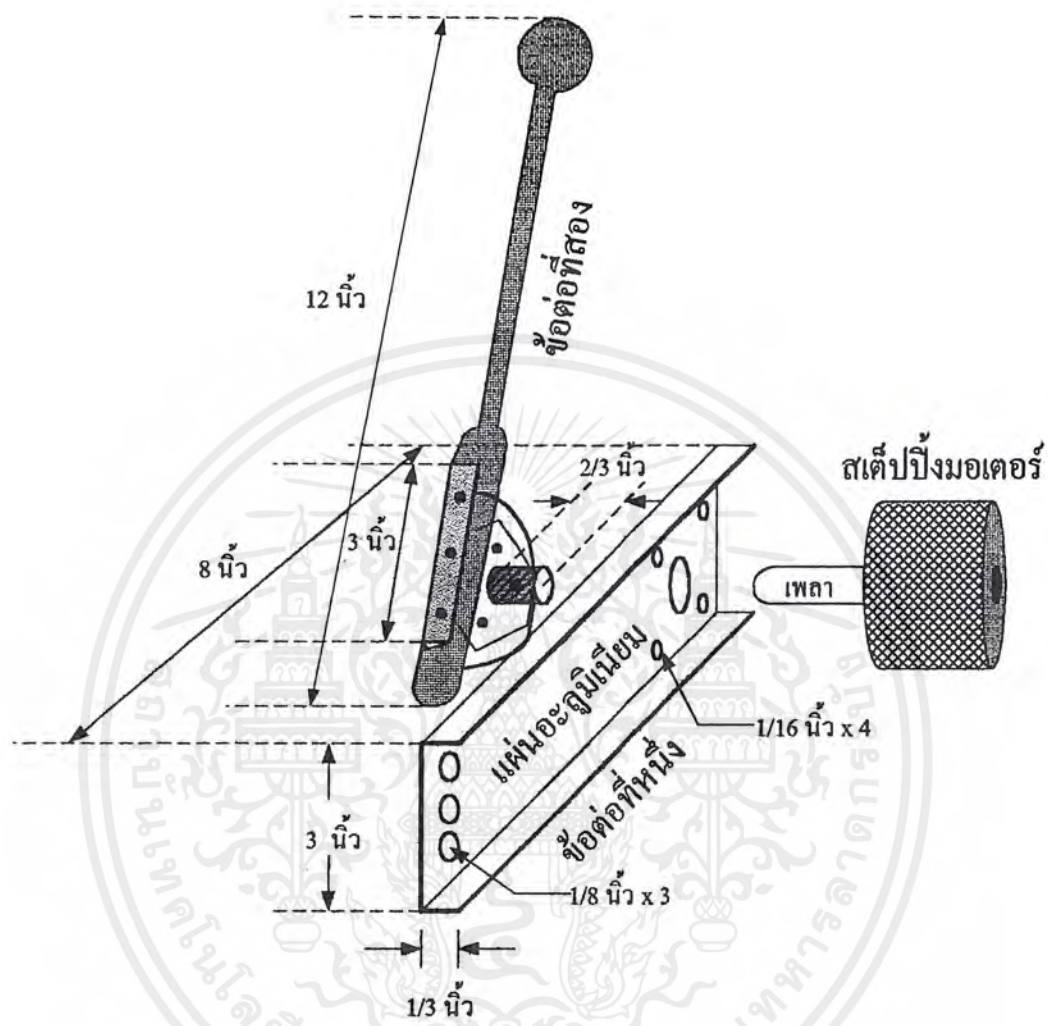
รูปที่ ก.2 แสดงส่วนประกอบของแท่นยึดตัวคีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 แสดงส่วนประกอบของแป้นจับเพลามอเตอร์และแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 แสดงส่วนประกอบของข้อต่อที่หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

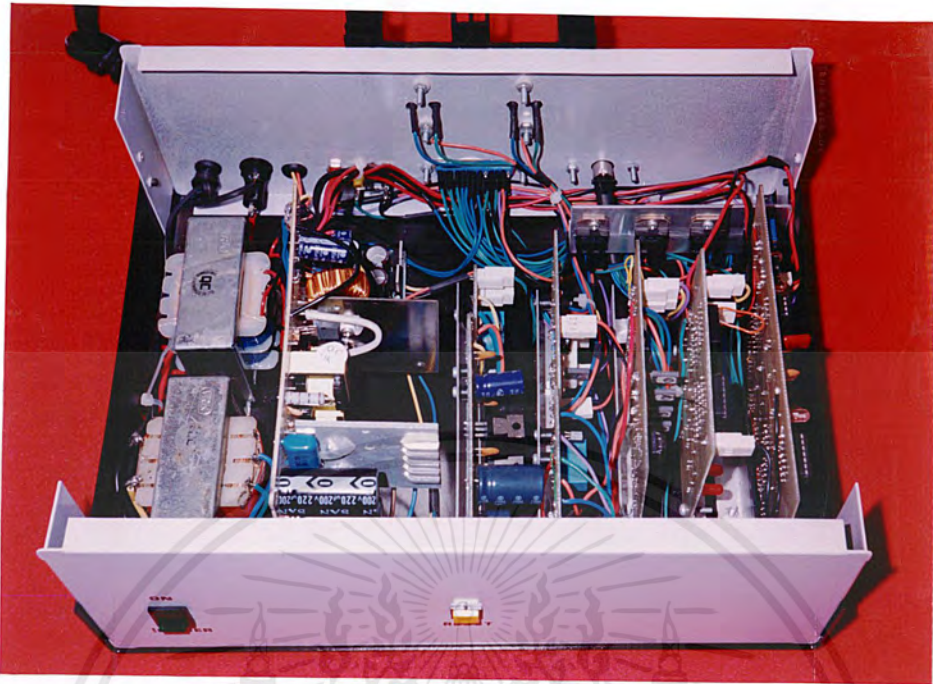


รูปที่ ก.5 แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของชุดทดลอง

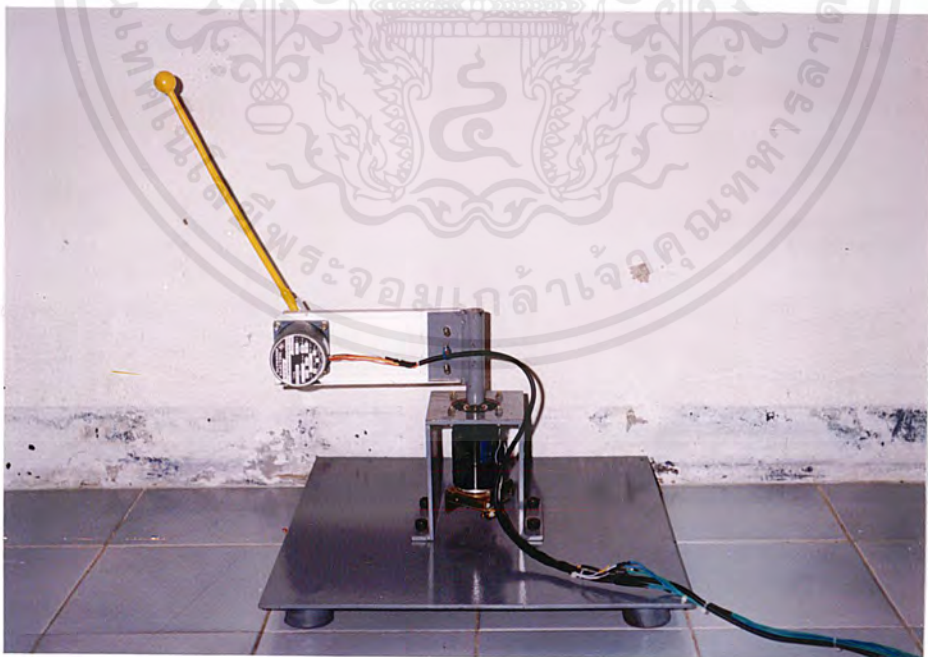


รูปที่ ก.6 แสดงภาพถ่ายด้านหลังของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

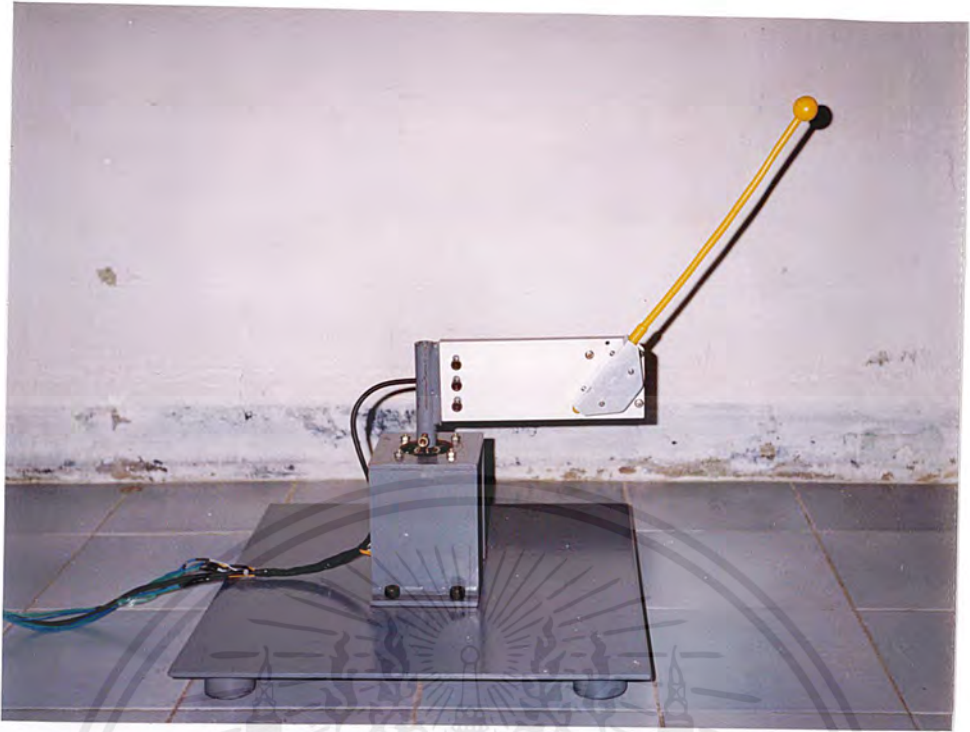


รูปที่ ก.7 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลองค่านใน

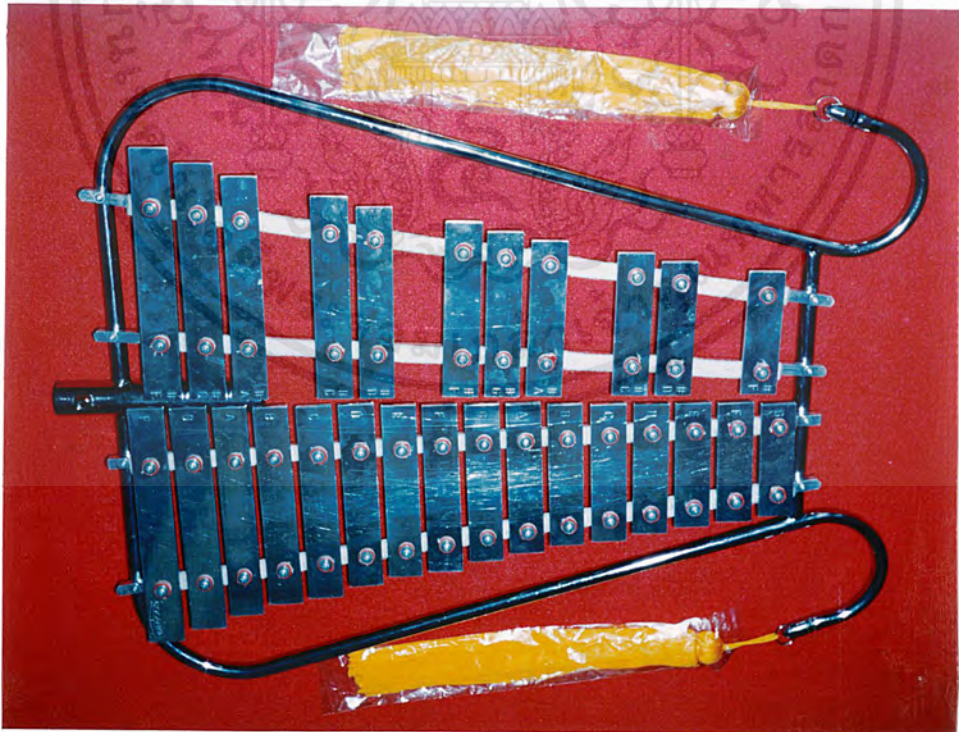


รูปที่ ก.8 แสดงโมเดลของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อค่านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

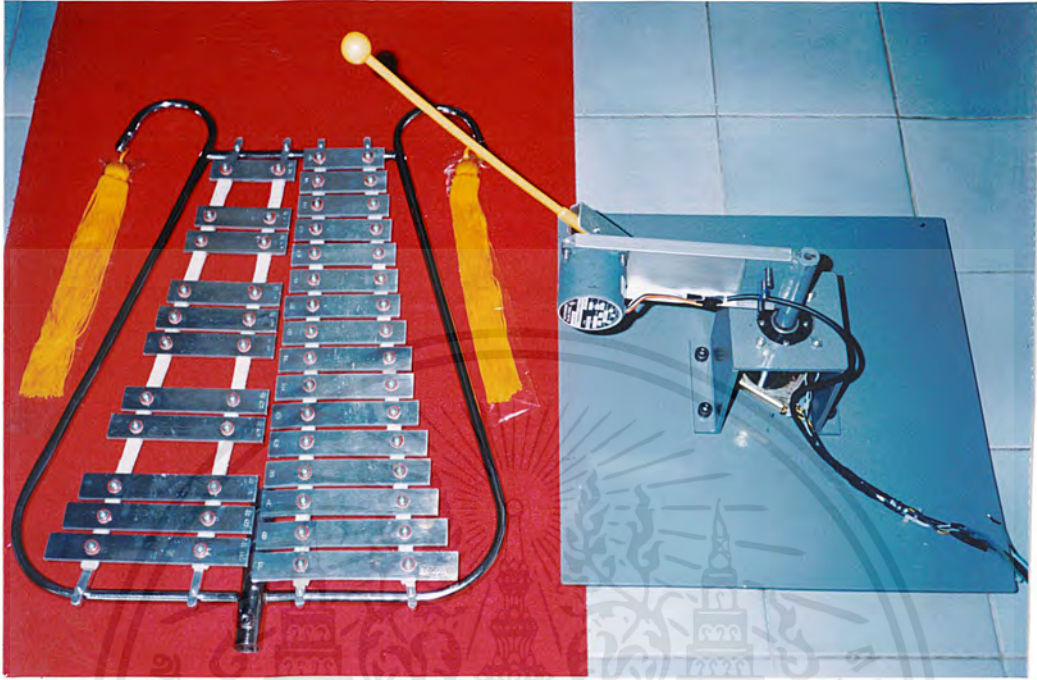


รูปที่ ก.9 แสดงโมเดลของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อด้านขวา



รูปที่ ก.10 แสดงเครื่องดนตรีที่ใช้สำหรับชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 แสดงภาพรวมของชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Order this document by MC34071/O

# MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

## High Slew Rate, Wide Bandwidth, Single Supply Operational Amplifiers

Quality bipolar fabrication with innovative design concepts are employed for the MC33071/72/74, MC34071/72/74 series of monolithic operational amplifiers. This series of operational amplifiers offer 4.5 MHz of gain bandwidth product, 13 V/ $\mu$ s slew rate and fast setting time without the use of JFET device technology. Although this series can be operated from split supplies, it is particularly suited for single supply operation, since the common mode input voltage range includes ground potential (VEE). With A Darlington input stage, this series exhibits high input resistance, low input offset voltage and high gain. The all NPN output stage, characterized by no deadband crossover distortion and large output voltage swing, provides high capacitance drive capability, excellent phase and gain margins, low open loop high frequency output impedance and symmetrical source/sink AC frequency response.

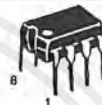
The MC33071/72/74, MC34071/72/73 series of devices are available in standard or prime performance (A Suffix) grades and are specified over the commercial, industrial/vehicular or military temperature ranges. The complete series of single, dual and quad operational amplifiers are available in plastic DIP and SOIC surface mount packages.

- Wide Bandwidth: 4.5 MHz
- High Slew Rate: 13 V/ $\mu$ s
- Fast Settling Time: 1.1  $\mu$ s to 0.1 $\mu$ s
- Wide Single Supply Operation: 3.0 V to 44 V
- Wide Input Common Mode Voltage Range: Includes Ground (VEE)
- Low Input Offset Voltage: 3.0 mV Maximum (A Suffix)
- Large Output Voltage Swing: -14.7 V to +14 V (with  $\pm$ 15 V Supplies)
- Large Capacitance Drive Capability: 0 pF to 10,000 pF
- Low Total Harmonic Distortion: 0.02%
- Excellent Phase Margin: 60°
- Excellent Gain Margin: 12 dB
- Output Short Circuit Protection
- ESD Diodes/Clamps Provide Input Protection for Dual and Quad

### ORDERING INFORMATION

Op Amp Function	Device	Operating Temperature Range	Package
Single	MC34071P, AP MC34071D, AD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-8
	MC33071P, AP MC33071D, AD	$T_A = -40^\circ \text{ to } +85^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-8
Dual	MC34072P, AP MC34072D, AD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-8
	MC33072P, AP MC33072D, AD	$T_A = -40^\circ \text{ to } +85^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-8
Quad	MC34074P, AP MC34074D, AD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-14
	MC33074P, AP MC33074D, AD	$T_A = -40^\circ \text{ to } +85^\circ\text{C}$	Plastic DIP SO-14

### HIGH BANDWIDTH SINGLE SUPPLY OPERATIONAL AMPLIFIERS

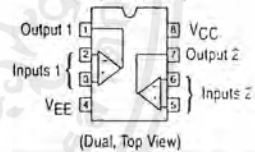
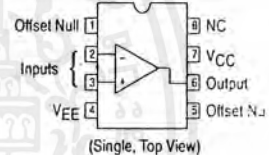


P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

#### PIN CONNECTIONS

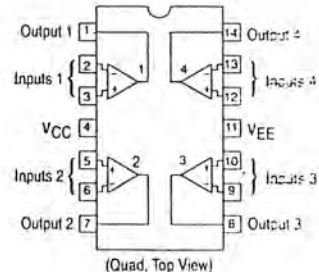


P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 646



D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751A  
(SO-14)

#### PIN CONNECTIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

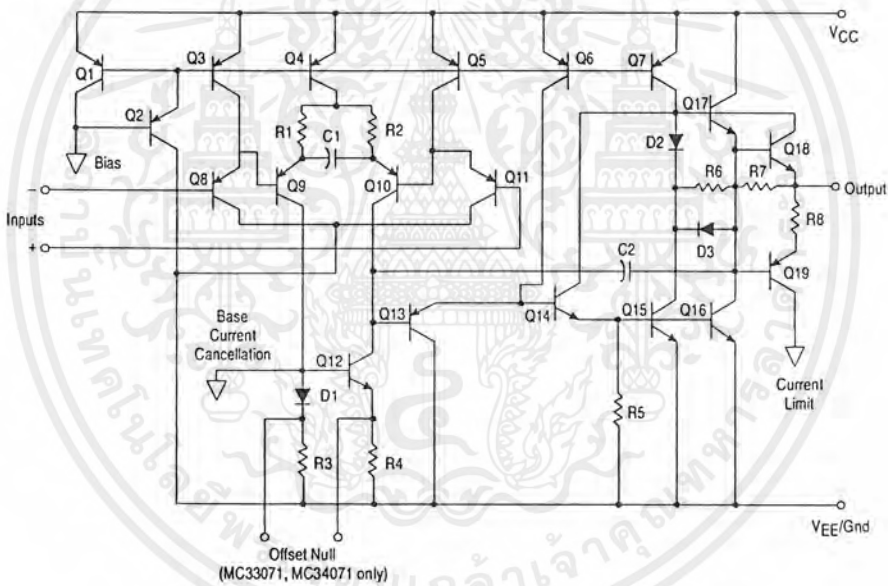
## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage (from $V_{EE}$ to $V_{CC}$ )	$V_S$	+44	V
Input Differential Voltage Range	$V_{IDR}$	Note 1	V
Input Voltage Range	$V_{IR}$	Note 1	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	$t_{SC}$	Indefinite	sec
Operating Junction Temperature	$T_J$	+150	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-60 to +150	°C

NOTES: 1. Either or both input voltages should not exceed the magnitude of  $V_{CC}$  or  $V_{EE}$ .  
 2. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature ( $T_J$ ) is not exceeded (see Figure 1).

**Representative Schematic Diagram**  
(Each Amplifier)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>CC</sub> = +15 V, V<sub>EE</sub> = -15 V, R<sub>L</sub> = connected to ground, unless otherwise noted. See Note 3 for T<sub>A</sub> = T<sub>low</sub> to T<sub>high</sub>)

Characteristics	Symbol	A Suffix			Non-Suffix			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (R <sub>S</sub> = 100 Ω, V <sub>CM</sub> = 0 V, V <sub>O</sub> = 0 V) V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +5.0 V, V <sub>EE</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	V <sub>IO</sub>	— — —	0.5 0.5 —	3.0 3.0 5.0	— — —	1.0 1.5 —	5.0 5.0 7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage R <sub>S</sub> = 10 Ω, V <sub>CM</sub> = 0 V, V <sub>O</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	ΔV <sub>IO</sub> /ΔT	—	10	—	—	10	—	μV/°C
Input Bias Current (V <sub>CM</sub> = 0 V, V <sub>O</sub> = 0 V) T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	I <sub>IB</sub>	— —	100 —	500 700	— —	100 —	500 700	nA
Input Offset Current (V <sub>CM</sub> = 0 V, V <sub>O</sub> = 0 V) T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	I <sub>IO</sub>	— —	6.0 —	50 300	— —	6.0 —	75 300	nA
Input Common Mode Voltage Range T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	V <sub>ICR</sub>	V <sub>EE</sub> to (V <sub>CC</sub> -1.8) V <sub>EE</sub> to (V <sub>CC</sub> -2.2)			V <sub>EE</sub> to (V <sub>CC</sub> -1.8) V <sub>EE</sub> to (V <sub>CC</sub> -2.2)			V
Large Signal Voltage Gain (V <sub>O</sub> = ±10 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ) T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	A <sub>VOL</sub>	50 25	100 —	— —	25 20	100 —	— —	V/mV
Output Voltage Swing (V <sub>ID</sub> = ±1.0 V) V <sub>CC</sub> = +5.0 V, V <sub>EE</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	V <sub>OH</sub>	3.7 13.6 13.4	4.0 14 —	— — —	3.7 13.6 13.4	4.0 14 —	— — —	V
V <sub>CC</sub> = +5.0 V, V <sub>EE</sub> = 0 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, R <sub>L</sub> = 10 kΩ, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, R <sub>L</sub> = 2.0 kΩ, T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	V <sub>OL</sub>	— — —	0.1 -14.7 —	0.3 -14.3 -13.5	— — —	0.1 -14.7 —	0.3 -14.3 -13.5	V
Output Short Circuit Current (V <sub>ID</sub> = 1.0 V, V <sub>O</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = 25°C) Source Sink	I <sub>SC</sub>	10 20	30 30	— —	10 20	30 30	— —	mA
Common Mode Rejection R <sub>S</sub> ≤ 10 kΩ, V <sub>CM</sub> = V <sub>ICR</sub> , T <sub>A</sub> = 25°C	CMR	80	97	—	70	97	—	dB
Power Supply Rejection (R <sub>S</sub> = 100 Ω) V <sub>CC</sub> /V <sub>EE</sub> = +16.5 V/-16.5 V to +13.5 V/-13.5 V, T <sub>A</sub> = 25°C	PSR	80	97	—	70	97	—	dB
Power Supply Current (Per Amplifier, No Load) V <sub>CC</sub> = +5.0 V, V <sub>EE</sub> = 0 V, V <sub>O</sub> = +2.5 V, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, V <sub>O</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +15 V, V <sub>EE</sub> = -15 V, V <sub>O</sub> = 0 V, T <sub>A</sub> = T <sub>low</sub> to T <sub>high</sub>	I <sub>D</sub>	— — —	1.6 1.9 —	2.0 2.5 2.8	— — —	1.6 1.9 —	2.0 2.5 2.8	mA

NOTES: 3. T<sub>low</sub> = -40°C for MC33071, 2, 4, /A  
= 0°C for MC34071, 2, 4, /A

T<sub>high</sub> = +85°C for MC33071, 2, 4, /A  
= +70°C for MC34071, 2, 4, /A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $R_L =$  connected to ground,  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	A Suffix			Non-Suffix			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Slew Rate ( $V_{in} = -10\text{ V to } +10\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $C_L = 500\text{ pF}$ ) $A_V = +1.0$ $A_V = -1.0$	SR	8.0	10 13	—	8.0	10 13	—	V/ $\mu\text{s}$
Setting Time (10 V Step, $A_V = -1.0$ ) To 0.1% (+1/2 LSB of 9-Bits) To 0.01% (+1/2 LSB of 12-Bits)	$t_s$	—	1.1 2.2	—	—	1.1 2.2	—	$\mu\text{s}$
Gain Bandwidth Product ( $f = 100\text{ kHz}$ )	GBW	3.5	4.5	—	3.5	4.5	—	MHz
Power Bandwidth $A_V = +1.0$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_O = 20\text{ V}_{pp}$ , THD = 5.0%	BW	—	160	—	—	160	—	kHz
Phase margin $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $C_L = 300\text{ pF}$	$f_m$	—	60 40	—	—	60 40	—	Deg
Gain Margin $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $C_L = 300\text{ pF}$	$A_m$	—	12 4.0	—	—	12 4.0	—	dB
Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\ \Omega$ , $f = 1.0\text{ kHz}$	$e_n$	—	32	—	—	32	—	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current $f = 1.0\text{ kHz}$	$i_n$	—	0.22	—	—	0.22	—	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Differential Input Resistance $V_{CM} = 0\text{ V}$	$R_{in}$	—	150	—	—	150	—	M $\Omega$
Differential Input Capacitance $V_{CM} = 0\text{ V}$	$C_{in}$	—	2.5	—	—	2.5	—	pF
Total Harmonic Distortion $A_V = +10$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $2.0\text{ V}_{pp} \leq V_O \leq 20\text{ V}_{pp}$ , $f = 10\text{ kHz}$	THD	—	0.02	—	—	0.02	—	%
Channel Separation ( $f = 10\text{ kHz}$ )	—	—	120	—	—	120	—	dB
Open Loop Output Impedance ( $f = 1.0\text{ MHz}$ )	$ Z_O $	—	30	—	—	30	—	$\Omega$

Figure 1. Power Supply Configurations

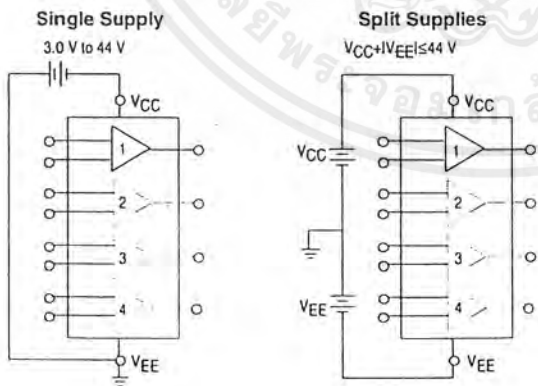
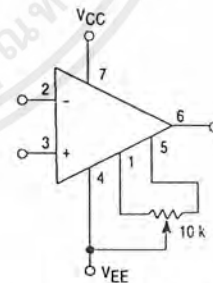


Figure 2. Offset Null Circuit



Offset nulling range is approximately  $\pm 80\text{ mV}$  with a  $10\text{ k}$  potentiometer (MC33071, MC34071 only).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 3. Maximum Power Dissipation versus Temperature for Package Types

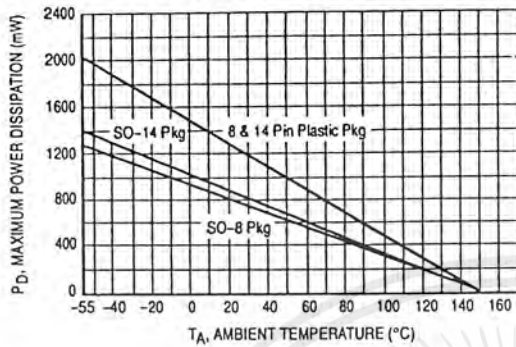


Figure 4. Input Offset Voltage versus Temperature for Representative Units

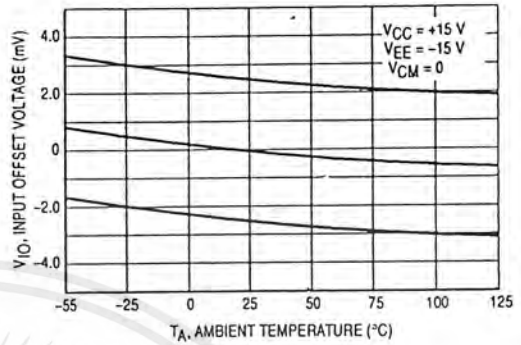


Figure 5. Input Common Mode Voltage Range versus Temperature

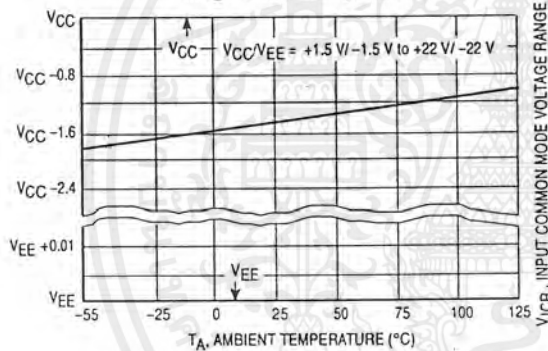


Figure 6. Normalized Input Bias Current versus Temperature

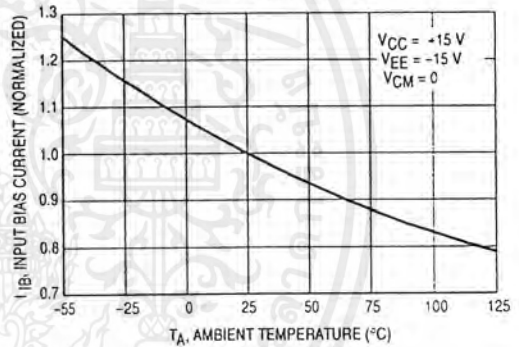


Figure 7. Normalized Input Bias Current versus Input Common Mode Voltage

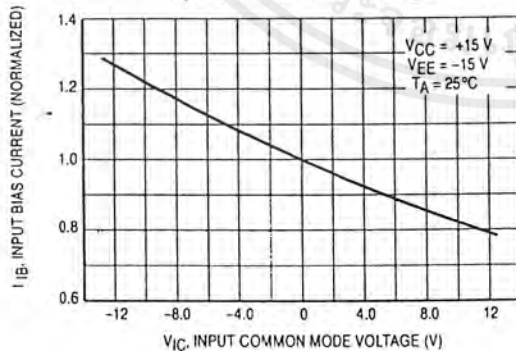
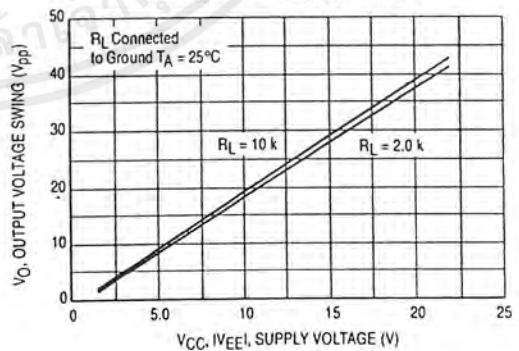


Figure 8. Split Supply Output Voltage Swing versus Supply Voltage



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 9. Single Supply Output Saturation versus Load Resistance to V<sub>CC</sub>

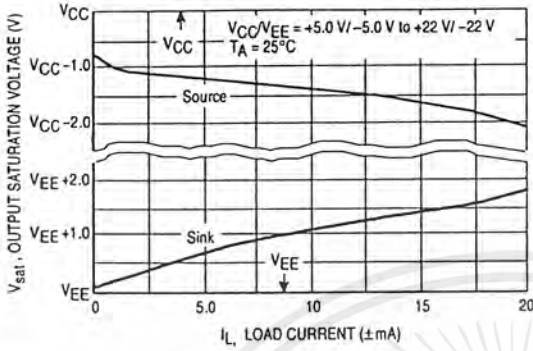


Figure 10. Split Supply Output Saturation versus Load Current

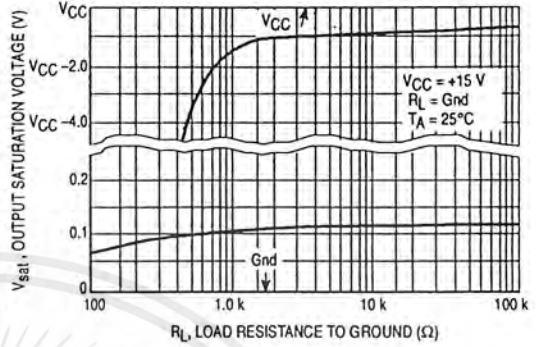


Figure 11. Single Supply Output Saturation versus Load Resistance to Ground

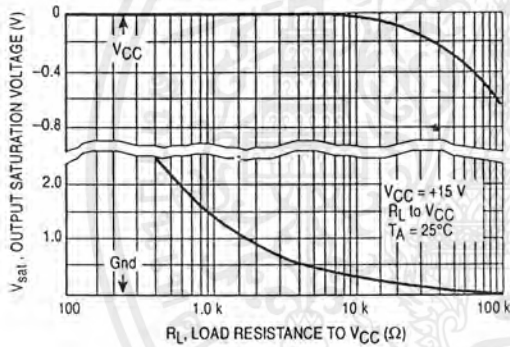


Figure 12. Output Short Circuit Current versus Temperature

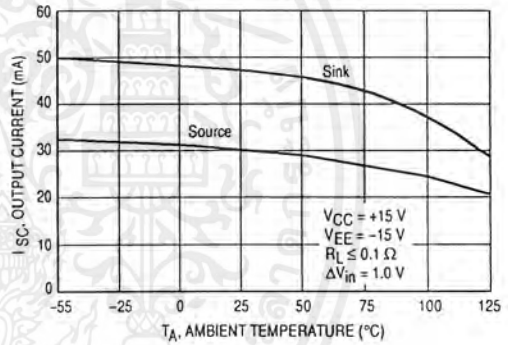


Figure 13. Output Impedance versus Frequency

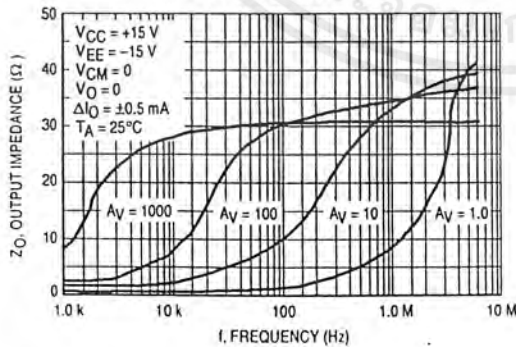
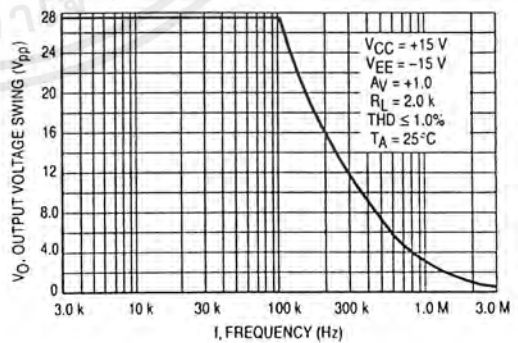


Figure 14. Output Voltage Swing versus Frequency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 15. Total Harmonic Distortion versus Frequency

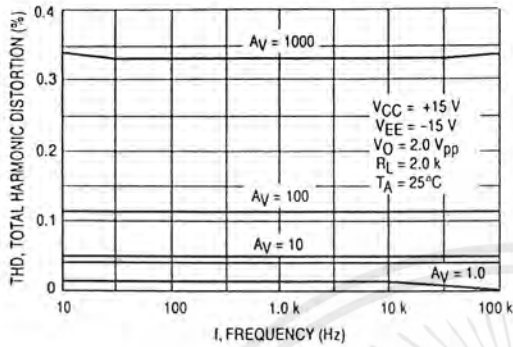


Figure 16. Total Harmonic Distortion versus Output Voltage Swing

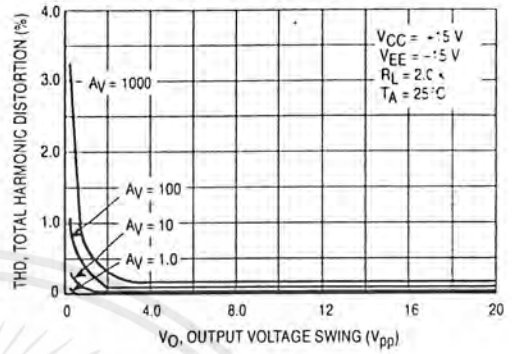


Figure 17. Open Loop Voltage Gain versus Temperature

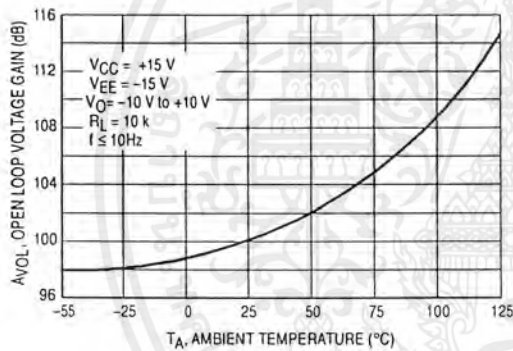


Figure 18. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

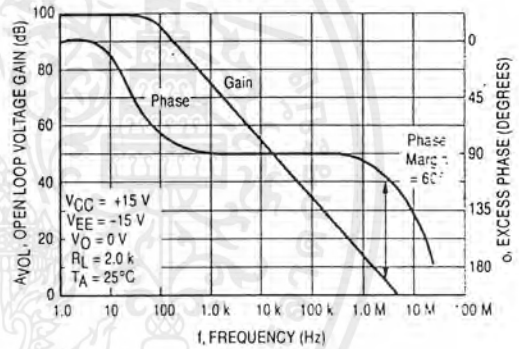


Figure 19. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

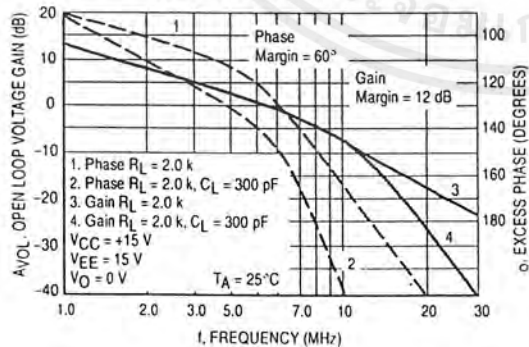
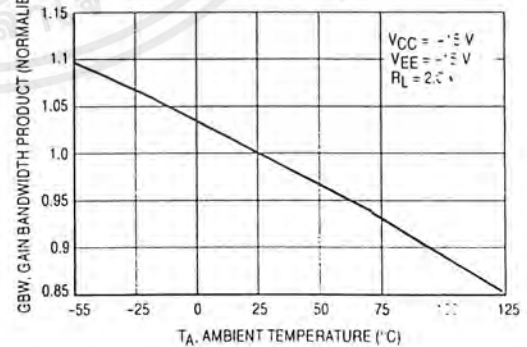


Figure 20. Normalized Gain Bandwidth Product versus Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 21. Percent Overshoot versus Load Capacitance

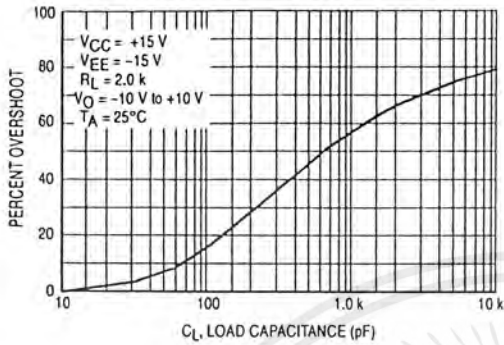


Figure 22. Phase Margin versus Load Capacitance

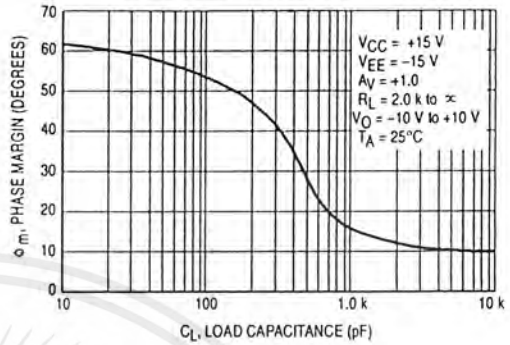


Figure 23. Gain Margin versus Load Capacitance

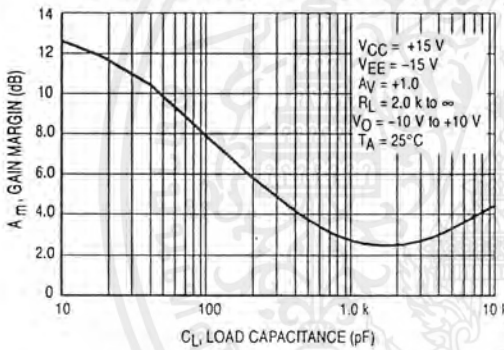


Figure 24. Phase Margin versus Temperature

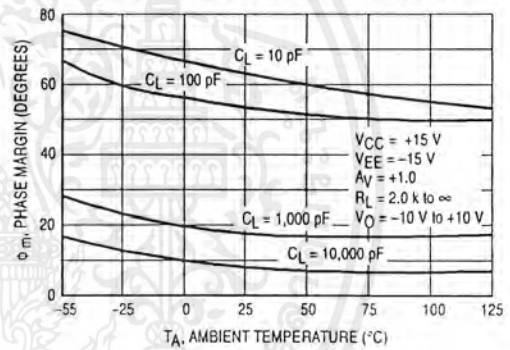


Figure 25. Gain Margin versus Temperature

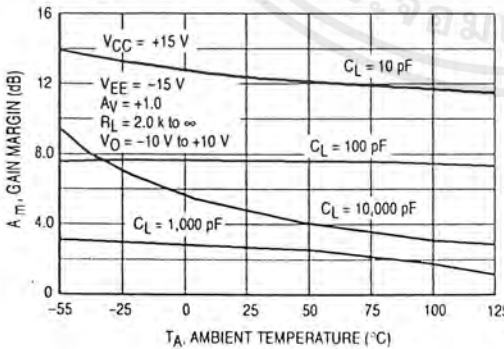
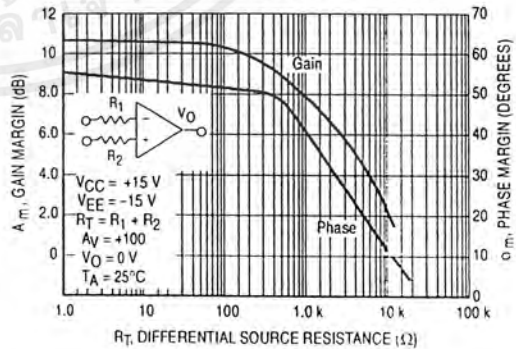


Figure 26. Phase Margin and Gain Margin versus Differential Source Resistance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 27. Normalized Slew Rate versus Temperature

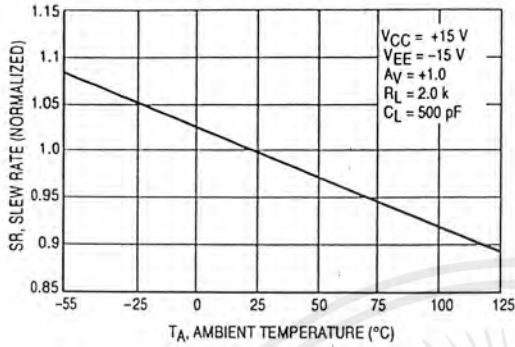


Figure 28. Output Settling Time

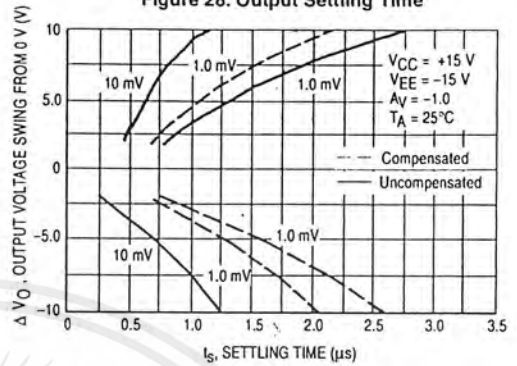


Figure 29. Small Signal Transient Response

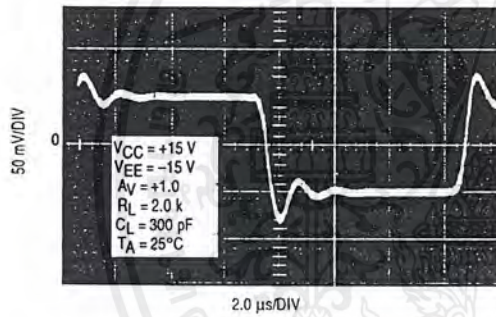


Figure 30. Large Signal Transient Response

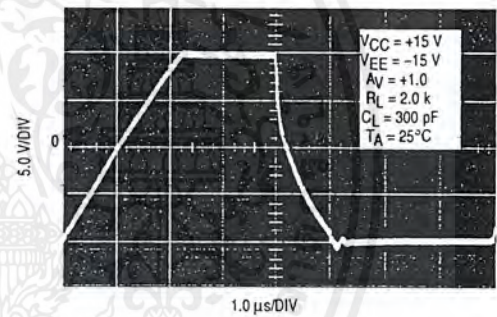


Figure 31. Common Mode Rejection versus Frequency

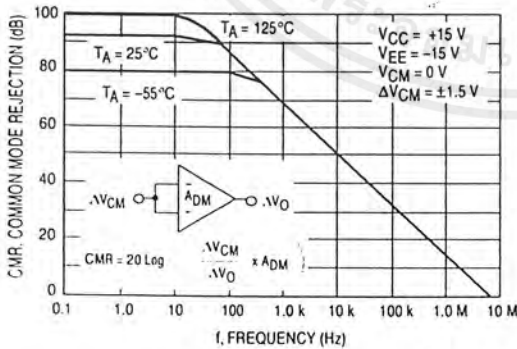
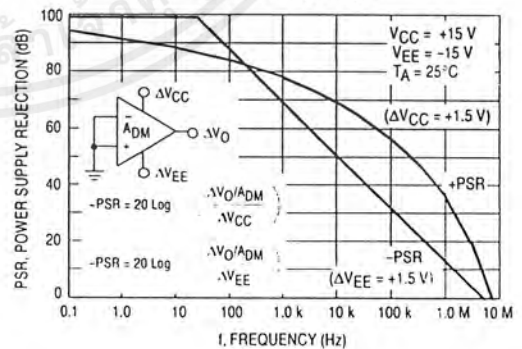


Figure 32. Power Supply Rejection versus Frequency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 33. Supply Current versus Supply Voltage

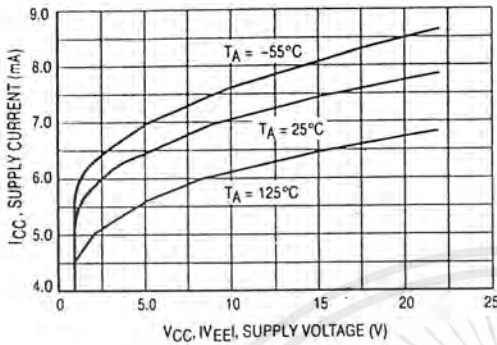


Figure 34. Power Supply Rejection versus Temperature

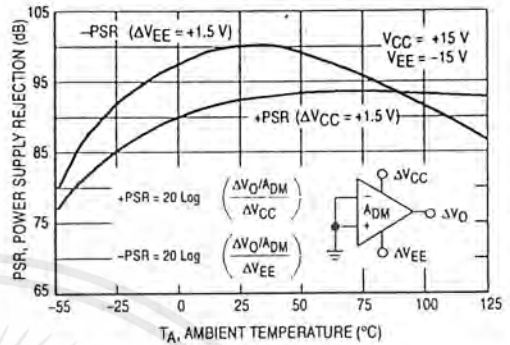


Figure 35. Channel Separation versus Frequency

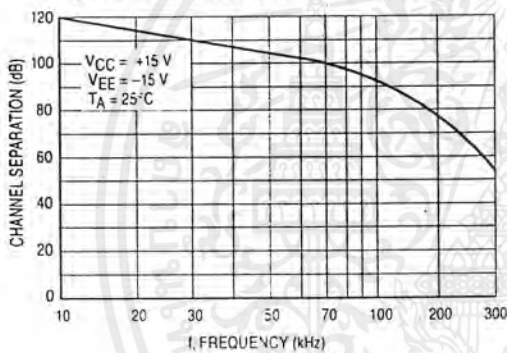
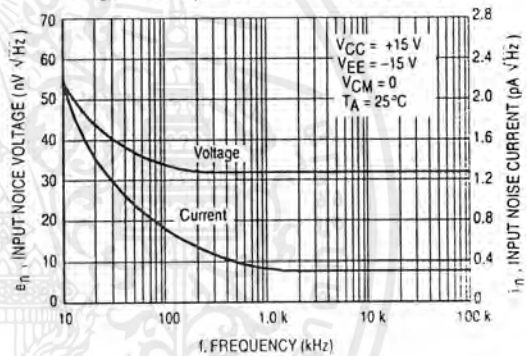


Figure 36. Input Noise versus Frequency



### APPLICATIONS INFORMATION CIRCUIT DESCRIPTION/PERFORMANCE FEATURES

Although the bandwidth, slew rate, and settling time of the MC34071 amplifier series are similar to op amp products utilizing JFET input devices, these amplifiers offer other additional distinct advantages as a result of the PNP transistor differential input stage and an all NPN transistor output stage.

Since the input common mode voltage range of this input stage includes the  $V_{EE}$  potential, single supply operation is feasible to as low as 3.0 V with the common mode input voltage at ground potential.

The input stage also allows differential input voltages up to  $\pm 44$  V, provided the maximum input voltage range is not exceeded. Specifically, the input voltages must range

between  $V_{EE}$  and  $V_{CC}$  supply voltages as shown by the maximum rating table. In practice, although not recommended, the input voltages can exceed the  $V_{CC}$  voltage by approximately 3.0 V and decrease below the  $V_{EE}$  voltage by 0.3 V without causing product damage, although output phase reversal may occur. It is also possible to source up to approximately 5.0 mA of current from  $V_{EE}$  through either inputs clamping diode without damage or latching, although phase reversal may again occur.

If one or both inputs exceed the upper common mode voltage limit, the amplifier output is readily predictable and may be in a low or high state depending on the existing input bias conditions.

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Since the input capacitance associated with the small geometry input device is substantially lower (2.5 pF) than the typical JFET input gate capacitance (5.0 pF), better frequency response for a given input source resistance can be achieved using the MC34071 series of amplifiers. This performance feature becomes evident, for example, in fast settling D-to-A current to voltage conversion applications where the feedback resistance can form an input pole with the input capacitance of the op amp. This input pole creates a 2nd order system with the single pole op amp and is therefore detrimental to its settling time. In this context, lower input capacitance is desirable especially for higher values of feedback resistances (lower current DACs). This input pole can be compensated for by creating a feedback zero with a capacitance across the feedback resistance, if necessary, to reduce overshoot. For 2.0 k $\Omega$  of feedback resistance, the MC34071 series can settle to within 1/2 LSB of 8 bits in 1.0  $\mu$ s, and within 1/2 LSB of 12-bits in 2.2  $\mu$ s for a 10 V step. In an inverting unity gain fast settling configuration, the symmetrical slew rate is  $\pm 13$  V/ $\mu$ s. In the classic noninverting unity gain configuration, the output positive slew rate is +10 V/ $\mu$ s, and the corresponding negative slew rate will exceed the positive slew rate as a function of the fall time of the input waveform.

Since the bipolar input device matching characteristics are superior to that of JFETs, a low untrimmed maximum offset voltage of 3.0 mV prime and 5.0 mV downgrade can be economically offered with high frequency performance characteristics. This combination is ideal for low cost precision, high speed quad op amp applications.

The all NPN output stage, shown in its basic form on the equivalent circuit schematic, offers unique advantages over the more conventional NPN/PNP transistor Class AB output stage. A 10 k $\Omega$  load resistance can swing within 1.0 V of the positive rail ( $V_{CC}$ ), and within 0.3 V of the negative rail ( $V_{EE}$ ), providing a 28.7  $V_{pp}$  swing from  $\pm 15$  V supplies. This large output swing becomes most noticeable at lower supply voltages.

The positive swing is limited by the saturation voltage of the current source transistor Q7, and  $V_{BE}$  of the NPN pull up transistor Q17, and the voltage drop associated with the short circuit resistance,  $R_7$ . The negative swing is limited by the saturation voltage of the pull-down transistor Q16, the voltage drop  $I_L R_6$ , and the voltage drop associated with resistance  $R_7$ , where  $I_L$  is the sink load current. For small valued sink currents, the above voltage drops are negligible, allowing the negative swing voltage to approach within millivolts of  $V_{EE}$ . For large valued sink currents ( $>5.0$  mA), diode D3 clamps the voltage across  $R_6$ , thus limiting the negative swing to the saturation voltage of Q16, plus the forward diode drop of D3 ( $=V_{EE} + 1.0$  V). Thus for a given supply voltage, unprecedented peak-to-peak output voltage swing is possible as indicated by the output swing specifications.

If the load resistance is referenced to  $V_{CC}$  instead of ground for single supply applications, the maximum possible output swing can be achieved for a given supply voltage. For

light load currents, the load resistance will pull the output to  $V_{CC}$  during the positive swing and the output will pull the load resistance near ground during the negative swing. The load resistance value should be much less than that of the feedback resistance to maximize pull up capability.

Because the PNP output emitter-follower transistor has been eliminated, the MC34071 series offers a 20 mA minimum current sink capability, typically to an output voltage of ( $V_{EE} + 1.8$  V). In single supply applications the output can directly source or sink base current from a common emitter NPN transistor for fast high current switching applications.

In addition, the all NPN transistor output stage is inherently fast, contributing to the bipolar amplifier's high gain bandwidth product and fast settling capability. The associated high frequency low output impedance (30  $\Omega$  typ @ 1.0 MHz) allows capacitive drive capability from 0 pF to 10,000 pF without oscillation in the unity closed loop gain configuration. The 60° phase margin and 12 dB gain margin as well as the general gain and phase characteristics are virtually independent of the source/sink output swing conditions. This allows easier system phase compensation, since output swing will not be a phase consideration. The high frequency characteristics of the MC34071 series also allow excellent high frequency active filter capability, especially for low voltage single supply applications.

Although the single supply specifications is defined at 5.0 V, these amplifiers are functional to 3.0 V @ 25°C although slight changes in parameters such as bandwidth, slew rate, and DC gain may occur.

If power to this integrated circuit is applied in reverse polarity or if the IC is installed backwards in a socket, large unlimited current surges will occur through the device that may result in device destruction.

Special static precautions are not necessary for these bipolar amplifiers since there are no MOS transistors on the die.

As with most high frequency amplifiers, proper lead dress, component placement, and PC board layout should be exercised for optimum frequency performance. For example, long unshielded input or output leads may result in unwanted input-output coupling. In order to preserve the relatively low input capacitance associated with these amplifiers, resistors connected to the inputs should be immediately adjacent to the input pin to minimize additional stray input capacitance. This not only minimizes the input pole for optimum frequency response, but also minimizes extraneous "pick up" at this node. Supply decoupling with adequate capacitance immediately adjacent to the supply pin is also important, particularly over temperature, since many types of decoupling capacitors exhibit great impedance changes over temperature.

The output of any one amplifier is current limited and thus protected from a direct short to ground. However, under such conditions, it is important not to allow the device to exceed the maximum junction temperature rating. Typically for  $\pm 15$  V supplies, any one output can be shorted continuously to ground without exceeding the maximum temperature rating.

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

(Typical Single Supply Applications  $V_{CC} = 5.0 \text{ V}$ )

Figure 37. AC Coupled Noninverting Amplifier

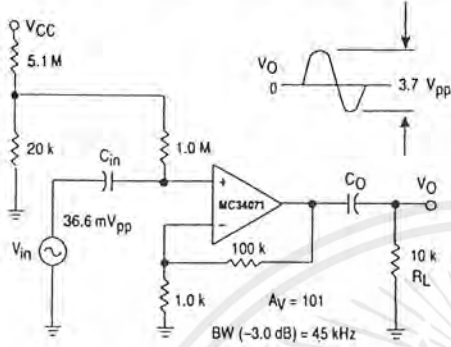


Figure 38. AC Coupled Inverting Amplifier

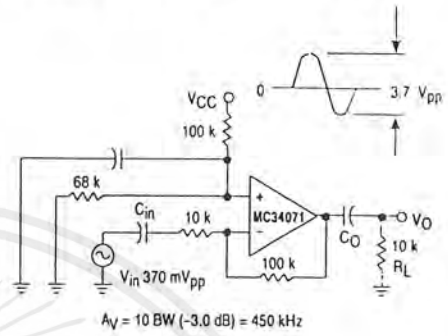


Figure 39. DC Coupled Inverting Amplifier  
Maximum Output Swing

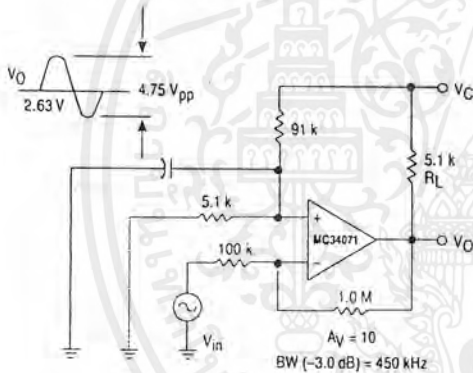


Figure 40. Unity Gain Buffer TTL Driver

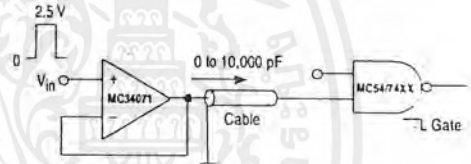


Figure 42. Active Bandpass Filter

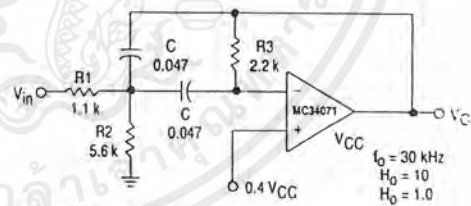
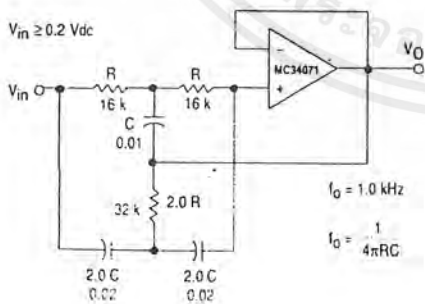


Figure 41. Active High-Q Notch Filter



Given  $f_0$  = Center Frequency  
 $A_0$  = Gain at Center Frequency  
Choose Value  $f_0$ ,  $Q$ ,  $A_0$ ,  $C$

$$\text{Then: } R_3 = \frac{Q}{\pi f_0 C} \quad R_1 = \frac{R_3}{2H_0} \quad R_2 = \frac{R_1 R_3}{4Q^2 R_1 - R_3}$$

For less than 10% error from operational amplifier  $\frac{Q_0 f_0}{\text{GBW}} < 0.1$

where  $f_0$  and GBW are expressed in Hz.  
GBW = 4.5 MHz Typ.

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 43. Low Voltage Fast D/A Converter

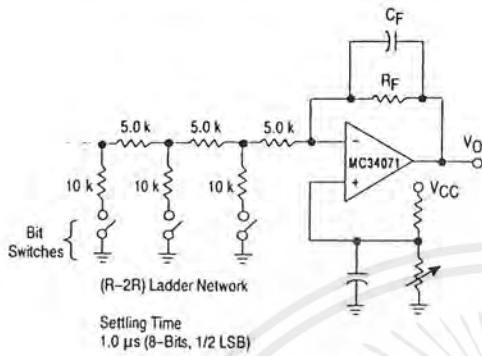


Figure 44. High Speed Low Voltage Comparator

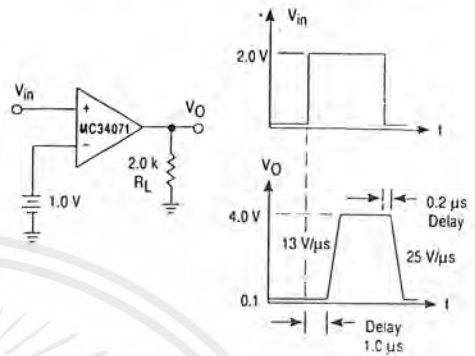


Figure 45. LED Driver

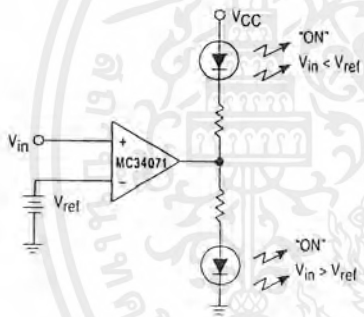


Figure 46. Transistor Driver

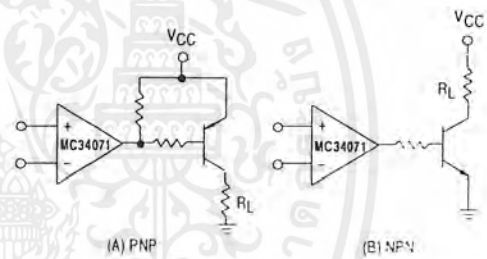


Figure 47. AC/DC Ground Current Monitor

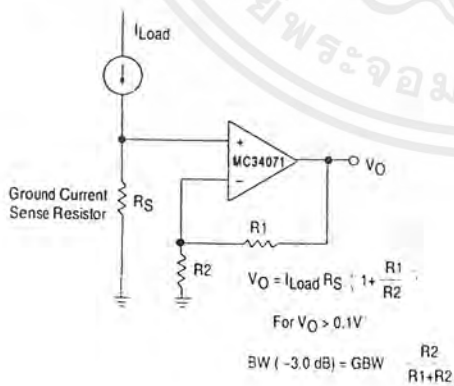
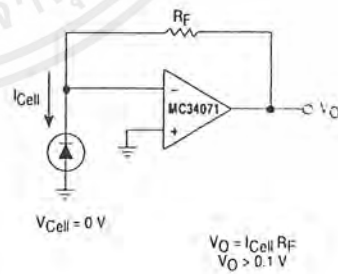


Figure 48. Photovoltaic Cell Amplifier



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 49. Low Input Voltage Comparator with Hysteresis

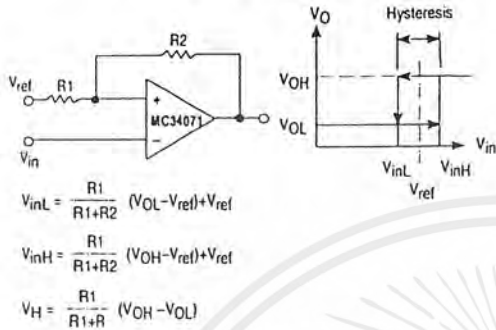


Figure 50. High Compliance Voltage to Sink Current Converter

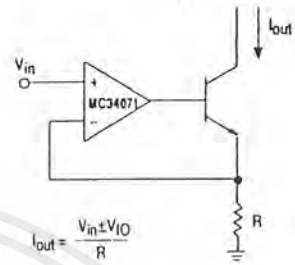


Figure 51. High Input Impedance Differential Amplifier

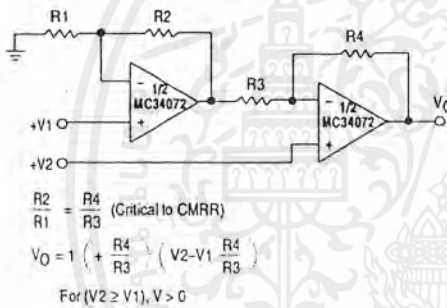


Figure 52. Bridge Current Amplifier

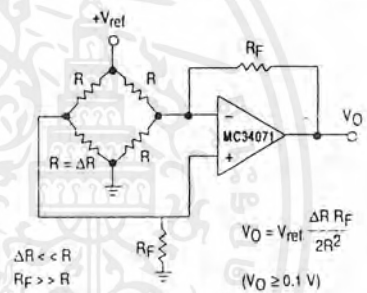


Figure 53. Low Voltage Peak Detector

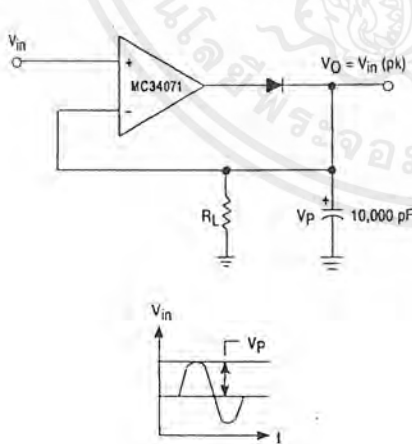
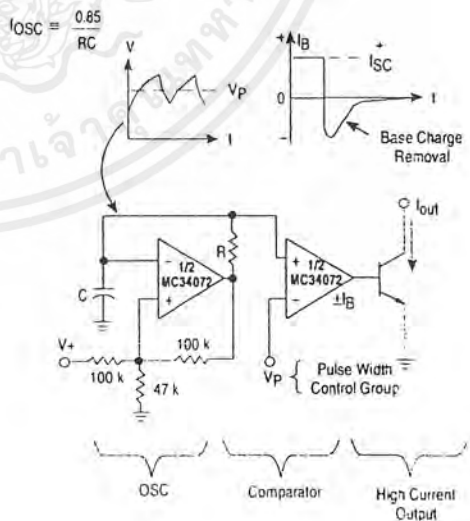


Figure 54. High Frequency Pulse Width Modulation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

GENERAL ADDITIONAL APPLICATIONS INFORMATION  $V_S = \pm 15.0 \text{ V}$

Figure 55. Second Order Low-Pass Active Filter

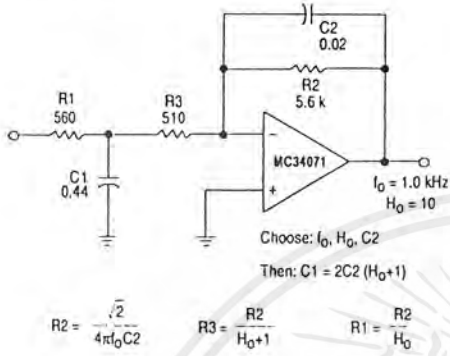


Figure 56. Second Order High-Pass Active Filter

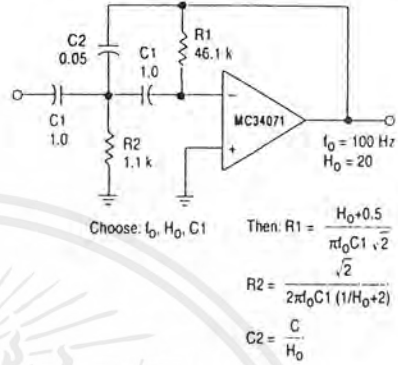


Figure 57. Fast Settling Inverter

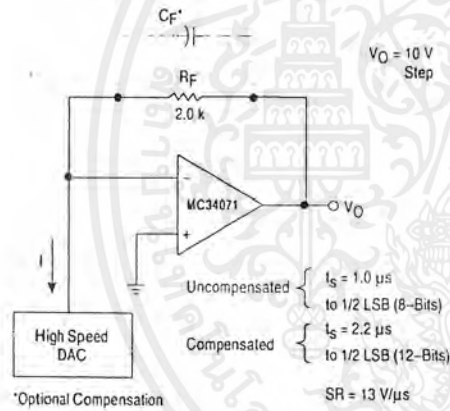


Figure 58. Basic Inverting Amplifier

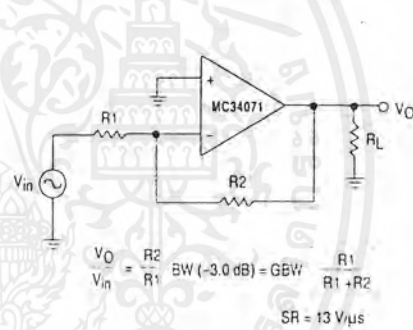


Figure 59. Basic Noninverting Amplifier

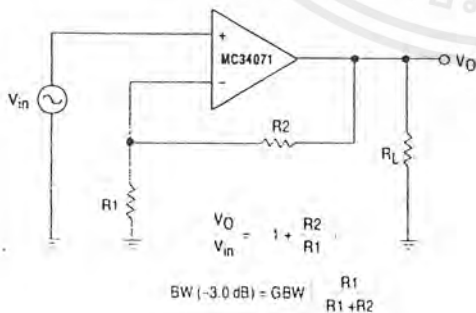
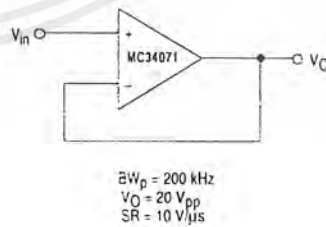


Figure 60. Unity Gain Buffer ( $A_V = +1.0$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

Figure 61. High Impedance Differential Amplifier

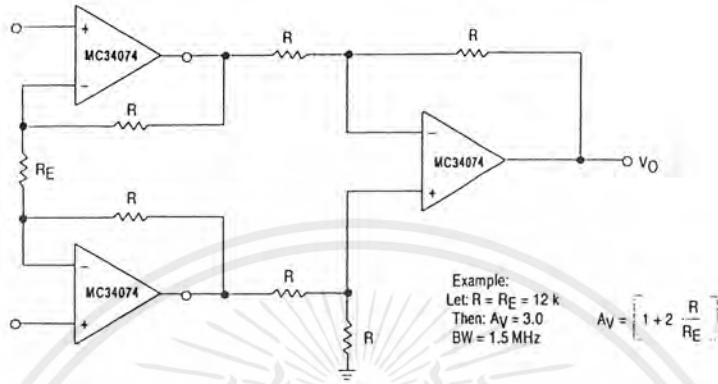
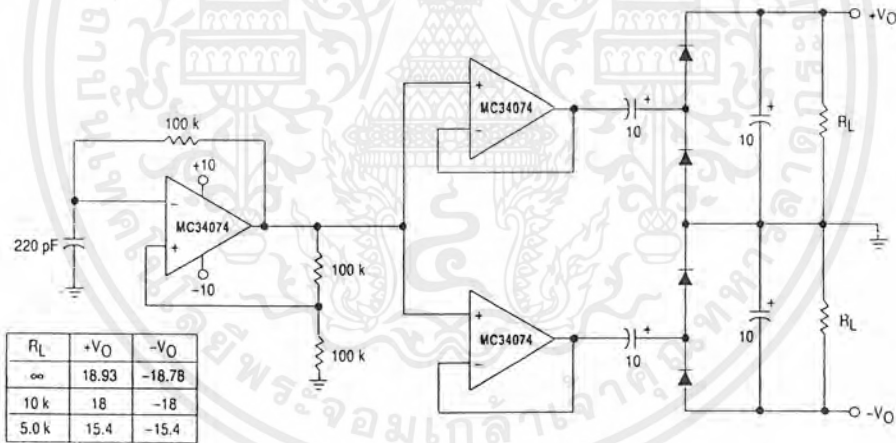


Figure 62. Dual Voltage Doubler



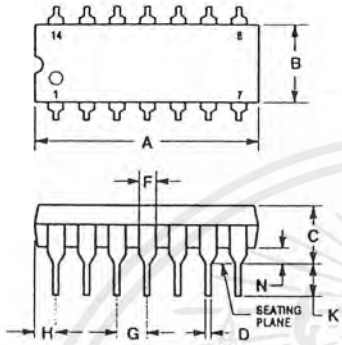
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MC34071,2,4,A MC33071,2,4,A

OUTLINE DIMENSIONS

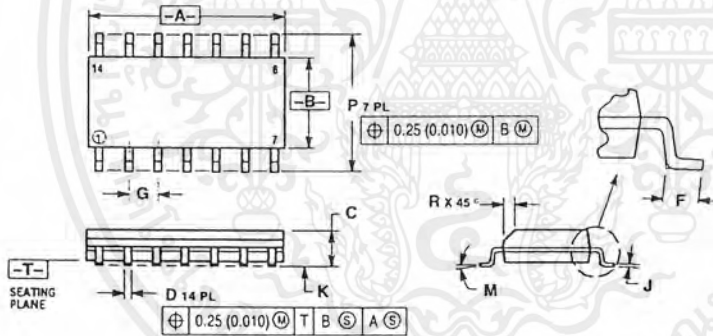
P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 646-06  
ISSUE L



- NOTES:
- LEADS WITHIN 0.13 (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
  - DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
  - DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
  - ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.715	0.770	18.16	19.56
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
F	0.040	0.070	1.02	1.78
G	0.100 BSC 2.54 BSC			
H	0.052	0.095	1.32	2.41
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.300 BSC 7.62 BSC			
M	0°	10°	0°	10°
N	0.015	0.039	0.39	1.01

D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751A-03  
(SO-14)  
ISSUE F



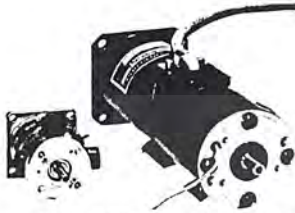
- NOTES:
- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  - CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
  - DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
  - MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
  - DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	8.55	8.75	0.337	0.344
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC 0.050 BSC			
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.228	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Model Number Designation

R 5 06 BT - 00 Δ E L 2



R301-011E, R511T-012E

- Model No. .... Indicates outer diameter of motor
- Classify out-put wattage of motor
- B : with brake/Blank : without brake  
Notes: brake cannot be attached on the type R3 and R4
- T : with tachogenerator/Blank : without tachogenerator  
Notes: Tachogenerator cannot be attached on the R3 and R4 type with encoder.
- Outside appearance ..... 00; with lead connector, lead/300L  
01; without lead connector, lead/1000L
- Voltage ..... 1; 24V/R3 and R4 Type, 2; 75V/R5, R7 and R8 Type
- Indicates double shaft ..... E; with double shaft for mounting Encoder
- Encoder Output circuit ..... L; Line driver  
I; Open collector
- Indicates numbers of encoder pulse/rev.

## Type Number Indicating Encoder Ratings

Type Numbers	Motor	Encoder			
		Pulses per revolution	Output Circuit	external connection	Part No.
R720-002	With Lead Connector (300L)				
R720-002E*1	" , Double Shaft				
R720-002E11	With Lead Connector	200P/R 3ch	Open Collector	Cannon Plug*2	E680200C31
R720-002E12	" (300L)	500 " 3"	"	"	E680500C31
R720-002E13	" ( " )	1000 " 3"	"	"	E681000C31
R720-002E15	" ( " )	2000 " 3"	"	"	E682000C31
R720-002EL1	" ( " )	200 " 3"	Line Driver	"	E680200C01
R720-002EL2	" ( " )	500 " 3"	"	"	E680500C01
R720-002EL3	" ( " )	1000 " 3"	"	"	E681000C01
R720-002EL5	" ( " )	2000 " 3"	"	"	E682000C01
R720-012E16	Without Connector (1000L)	200 " 3"	Open Collector	Lead Wire (1000L)	E680200C30
R720-012E17	" ( " )	500 " 3"	"	" ( " )	E680500C30
R720-012E18	" ( " )	1000 " 3"	"	" ( " )	E681000C30
R720-012E10	" ( " )	2000 " 3"	"	" ( " )	E682000C30
R720-012EL6	" ( " )	200 " 3"	Line Driver	" ( " )	E680200C00
R720-012EL7	" ( " )	500 " 3"	"	" ( " )	E680500C00
R720-012EL8	" ( " )	1000 " 3"	"	" ( " )	E681000C00
R720-012EL0	" ( " )	2000 " 3"	"	" ( " )	E682000C00
R720T-002	With TG	} See above for other options.			
R720BT-002	With Brake & TG				

Notes : Encoder cannot be attached to the R3 and R4 type with tachogenerator.

## Notes for introducing Super R series

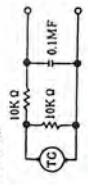
- 1) Type numbers are designated as shown above. Please give us all requirements, when you give us orders.
- 2) \*1 Type numbers with suffix "E" only is motors designed with double ended shaft, which can be mounted with Sanyo made encoder. Please refer to drawing to use these types.
- 3) Types without lead connector and double ended version (those with "E") are not waterproof.
- 4) \*2 When an encoder is attached, output leads of TG are included in a encoder receptacle, which is standard type number "MS3102A-20-29P" of all suppliers.  
However, connecting plug is not attached. You should obtain a connecting plug necessary for your usage.  
Plug type numbers, for information;  
- straight plug MS3106B20-29S
- 5) Specifications are subject to change without notice.

Ratings & Characteristics

Spec Items	Type		R 3		R 4		R 5		R 7		R 8		Temperature (See Page 1)
	Part No.	Spec. No.	R301	R404	R506	R511(T)	R720(T)	R730(T)	R840(T)	R850(T)	R860(T)	R870(T)	
Rated Output	Ps	-011	-011	-011	-011	-002	-002	-002	-002	-002	-002	-002	☆ ☆
Rated Arm. Volt.	Es	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	☆ ☆
Rated Torque	Ts	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	☆ ☆
Rated Arm. Curr.	Is	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	☆ ☆
Rated Speed	n	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	☆ ☆
Core. Solid Torque	Ts	0.4	0.8	1.45	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	☆ ☆
Peak Max. Torque	Tps	1.5	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	☆ ☆
Arm. Curr. (Stall)	Is	1.25	1.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	☆ ☆
Peak Arm. Curr.	Is	4.3	10	16	25	25	25	25	25	25	25	25	☆ ☆
Maximum Speed	nmax	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	☆ ☆
Static Fric. Torque	Tv	0.08	0.12	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	☆ ☆
Power Rate	Q	0.7	1.3	2.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	☆ ☆
Peak Acceleration	as	79 × 10 <sup>3</sup>	97 × 10 <sup>3</sup>	109 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	120 × 10 <sup>3</sup>	☆ ☆
Torque Ripple	Tr	%	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	☆ ☆
Torque Constant	Kt	kg-cm/A	0.35	0.41	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	☆ ☆
Volt. Constant	Ke	V/Kr.p.m.	3.6	4.2	5.15	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	☆ ☆
Regulation Const.	Kr	%	0.016	0.018	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	☆ ☆
Rotor Inertia	Jr	g-cm-sec <sup>2</sup>	0.019	0.043	0.074	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	☆ ☆
Arm. Resistance (w/hal)	Ra	Ω	7.9	3.4	1.8	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	☆ ☆
Inductance	La	mH	0.9	1.1	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	☆ ☆
Mech. Time Const.	ts	msec	12	8.8	5.5	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	☆ ☆
Elect. Time Const.	te	msec	0.12	0.3	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	☆ ☆
Therm. Time Const.	ts	min	5	6	6	11	11	11	11	11	11	11	☆ ☆
Therm. Resist.	Rθ	°C/W	6.5	5.2	4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	☆ ☆
Arm. Winding temp. rise	ΔT	deg	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	☆ ☆
Weight	W	kg	0.16	0.25	0.35	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	☆ ☆
Volt. Gradient	Kde	V/Kr.p.m.											☆ ☆
Ripple (RMS)	Vrms	%											☆ ☆
Ripple (P-P)	Vr-p	%											☆ ☆
Linearity	Δ	%											☆ ☆
Arm. Resistance	ra	Ω											☆ ☆
Inductance	La	mH											☆ ☆
Min. Load Resist.	RL	KΩ											☆ ☆
Rotor Inertia	Jr	g-cm-sec <sup>2</sup>											☆ ☆
Weight	W	kg											☆ ☆
Model	Series R	With Brake											☆ ☆
Static Fric. Torque	kg-cm												☆ ☆
Aspiration Volt	VDC												☆ ☆
Aspiration Curr.	A												☆ ☆
Winding Resistance	Ω												☆ ☆
Inertia	g-cm-sec <sup>2</sup>												☆ ☆
Weight	kg												☆ ☆
Optical Encoder													☆ ☆
Applicable Servo Amp. Smps/Diode													☆ ☆

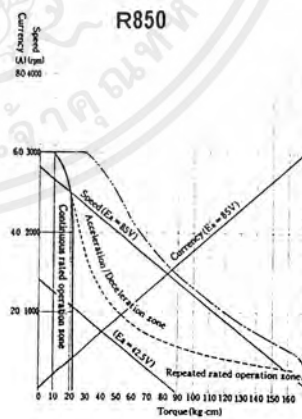
Notes

- Parameters marked with "☆" are values measured when either of ambient temperature and armature winding temperature is 25°C. Parameters with "☆☆" are values measured when temperature rise is saturated. Parameters with "☆☆☆" are values measured when ambient temperature is 25°C and armature winding temperature is at the allowable maximum.
- All parameters above are tested, when operated with pure DC input and ambient temperature of 40°C maximum.
- TG characteristics are tested using the circuit below.





## Performance Curves



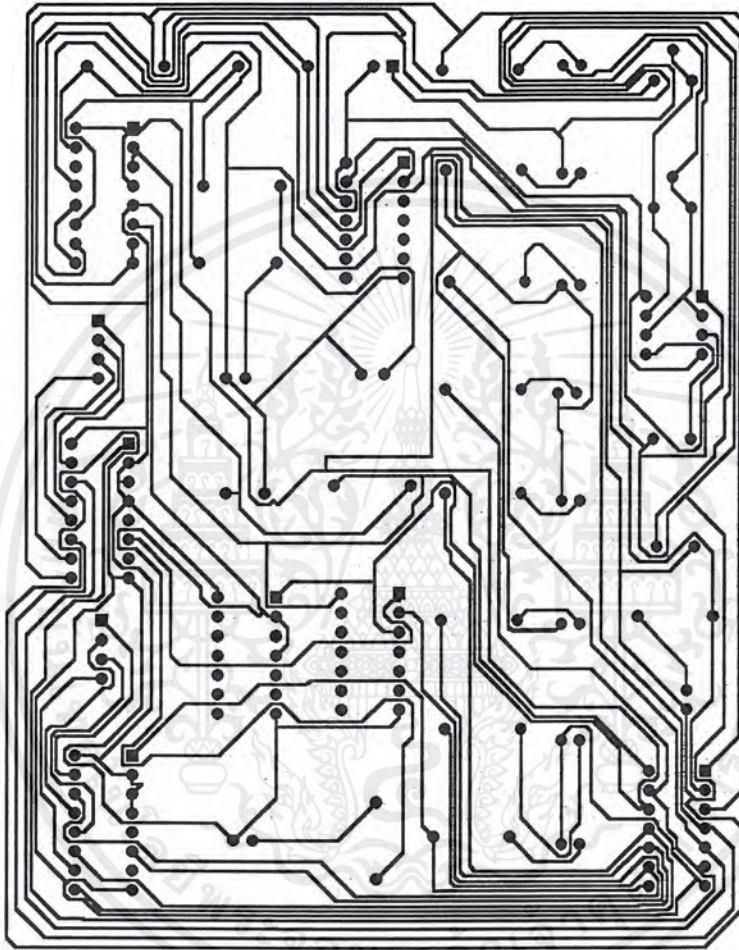
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

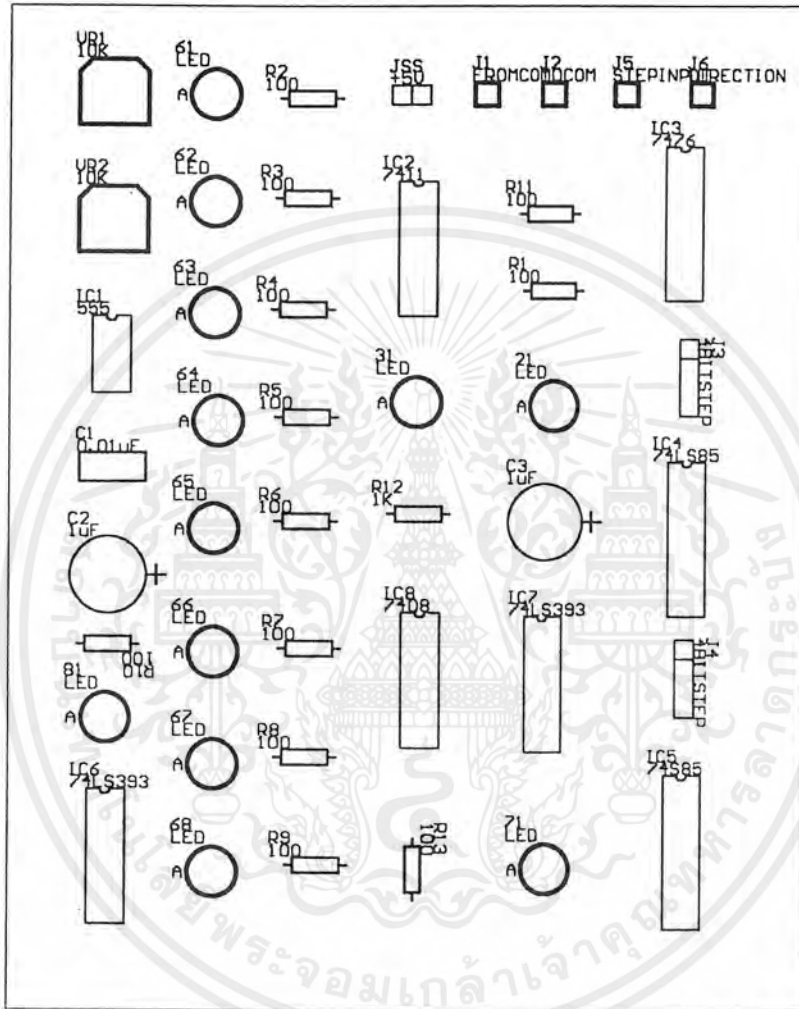
ลายวงจรรที่ใชในครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สําหรับการใชงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใชประโยชน์ดานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใหัดัดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช



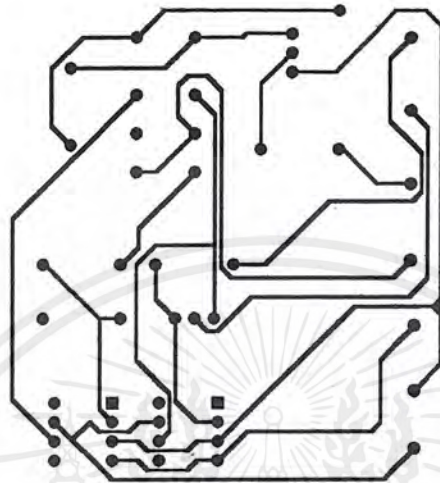
รูปที่ ค.1 แสดงลายทองแดงในส่วนของวงจรสแต็ปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

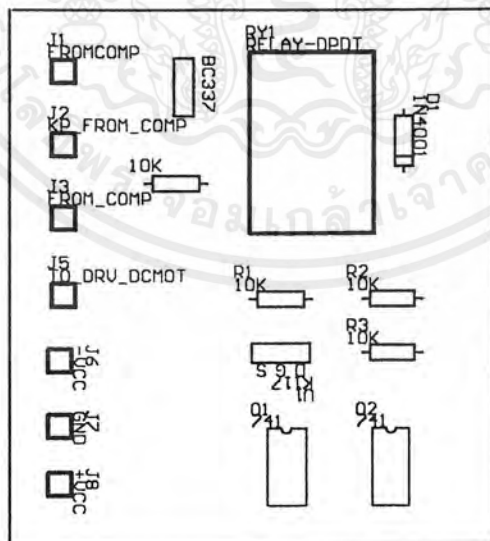


รูปที่ ค.2 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรสแต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

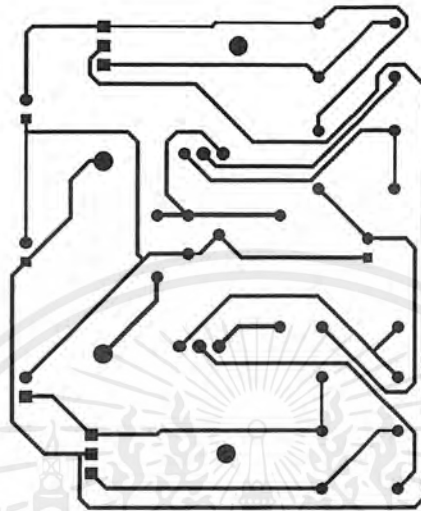


รูปที่ ค.3 แสดงลายทองแดงของวงจรเลือกทิศทางหมุนของมอเตอร์

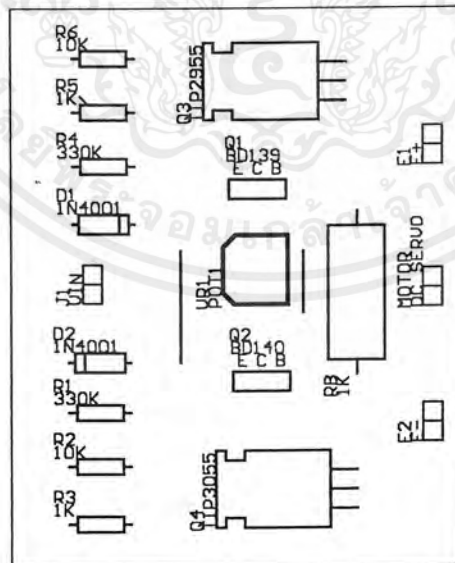


รูปที่ ค.4 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรเลือกทิศทางหมุนของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

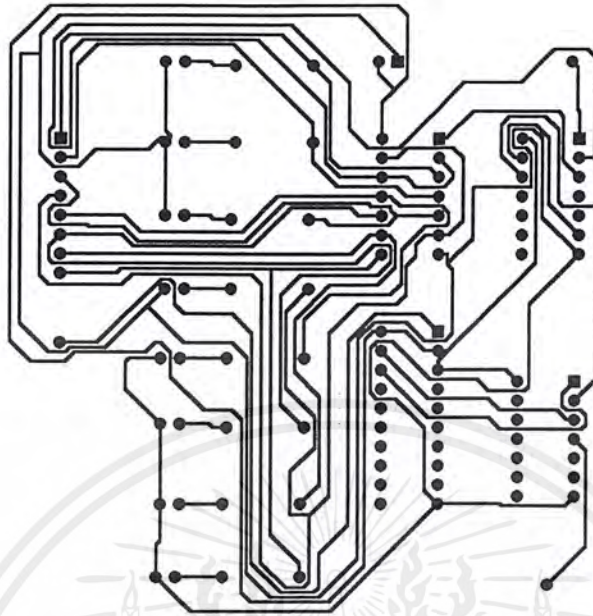


รูปที่ ค.5 แสดงลายทองแดงของวงจร ไลร์ดีซีมอเตอร์

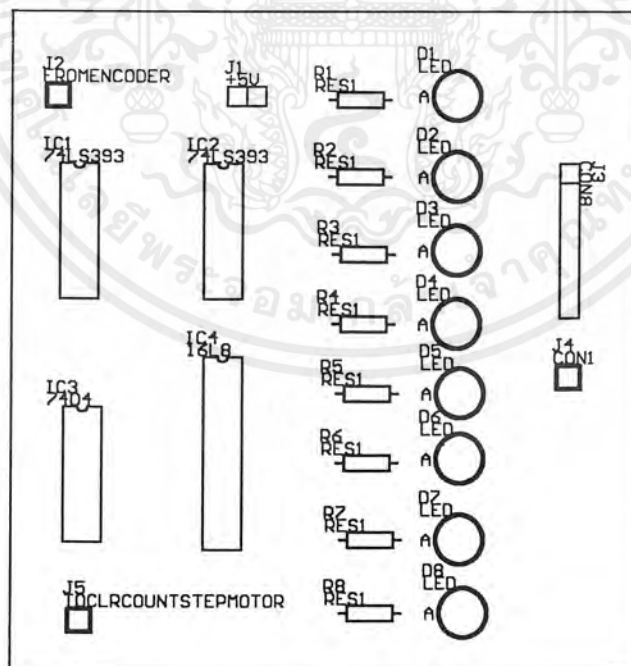


รูปที่ ค.6 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจร ไลร์ดีซีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

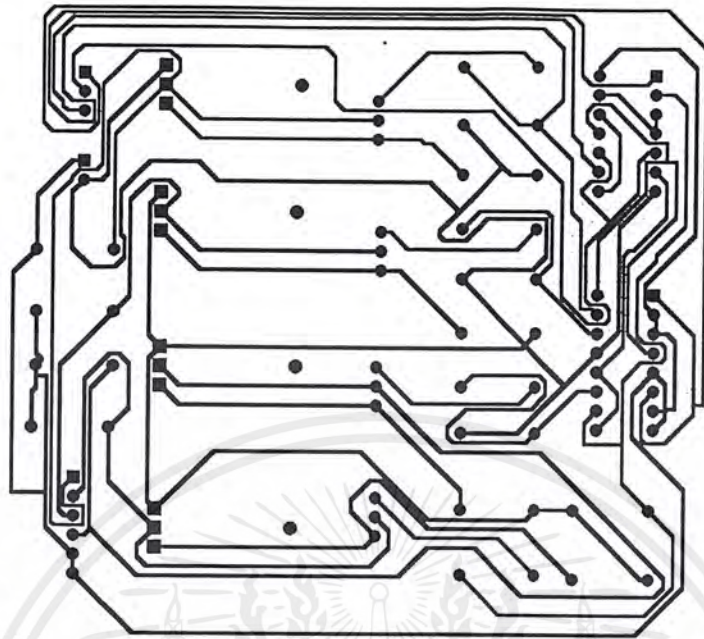


รูปที่ ค.7 แสดงลายทองแดงของวงจรความเร็วและวงจรรัน 8 บิต

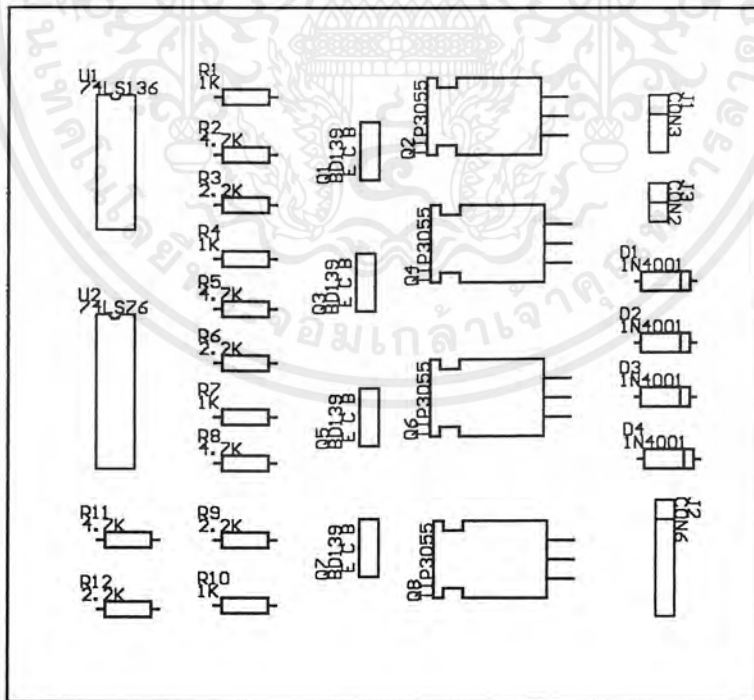


รูปที่ ค.8 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรความเร็วและวงจรรัน 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

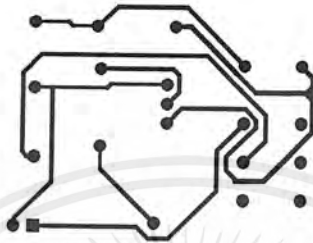


รูปที่ ค.9 แสดงลายทองแดงของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

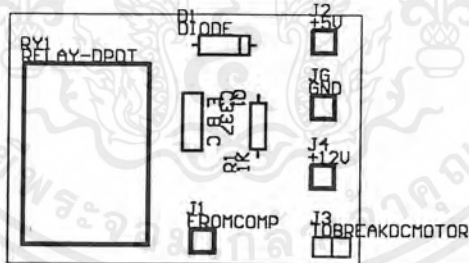


รูปที่ ค.10 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

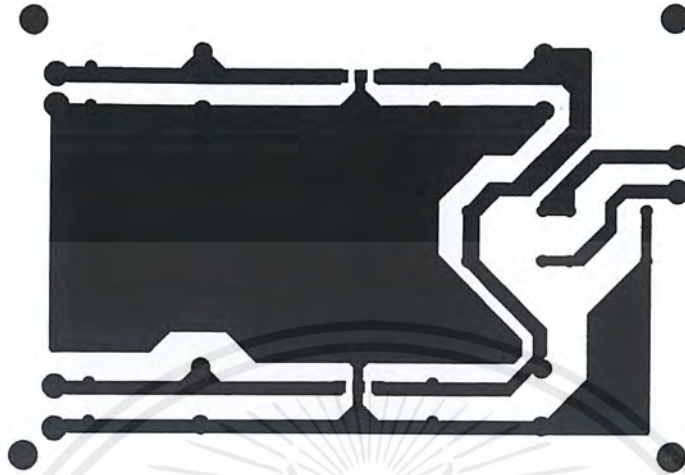


รูปที่ ค.11 แสดงลายทองแดงของวงจรเบรคคีชีมอเตอร์

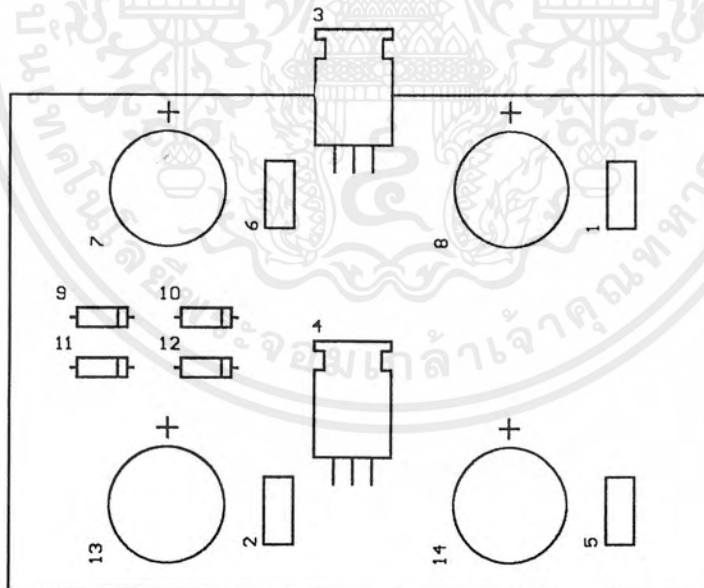


รูปที่ ค.12 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรเบรคคีชีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.13 แสดงลายทองแดงของวงจรแหล่งจ่ายไฟ +12V และ +5V

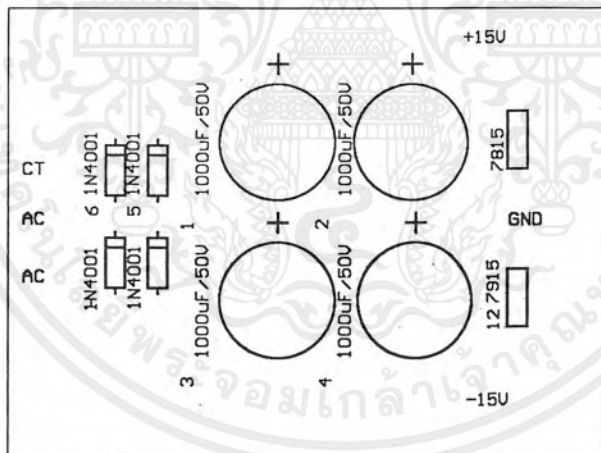


รูปที่ ค.14 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรแหล่งจ่ายไฟ +12V และ +5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.15 แสดงลายทองแดงของวงจรแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 15V$



รูปที่ ค.16 แสดงรายการอุปกรณ์และการวางอุปกรณ์ด้านบนวงจรแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 15V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

กิตติ ธีรเชษฐ"การวิเคราะห์ระบบควบคุมเชิงเส้น" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ,2538

โยธิน เปรมปราณีรัชต์ "วิเคราะห์และออกแบบการควบคุมมอเตอร์" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ,2539

วิโรจน์ อัสวรังสี ชัชวาล เต็มฤทธิวงศ์ กรชุตี ไซส์ถิตย์"ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี"  
บริษัท ซีอีคยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ,2536

John D.Lenk. *Circuit Encyclopedia & Troubleshooting Guide*. McGraw-Hill, Inc.,1976.

Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed.Prentice-Hall, 1997.

Pota, H.R. A prototype Flexible robot arm-an interdisciplinary undergraduate. *IEEE Transaction On Education*. Vol. 35 Feb.1992.

Smith, R.J., *Electronics:Circuits and Devices*.2<sup>nd</sup> ed. New York:John Wily of & Sons,Inc.,1980.