

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แขนกลตีฆ้องวงใหญ่

Robot Arms for "GONG WONG YAI"

โดย

นายอนวัช นีรันดรศิริโรจน์

นายอนุรักษ์ แก้วสังข์

นายอักรพันธ์ จันทรสงค์

รฟ.

ด 162 ข

2549

เลขหมู่.....

72144

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี 11 ส.ย. 2550

b. 11763966

i.

ปฏิญานีพจน์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แขนกลตีมือวงใหญ่
ROBOT ARMS FOR “GONG WONG YAI”

ผู้จัดทำ นายอนวัช นีรันคร์ศิริโรจน์ รหัสนักศึกษา 46010909
 นายอนุรัตน์ แก้วสังข์ รหัสนักศึกษา 46010915
 นายอัครพันธ์ จันทร์สงค์ รหัสนักศึกษา 46010946



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนกติดตั้งวงใหญ่

โดย

นายอนวัช นีรันครศิริโรจน์ 46010909

นายอนุรักษ์ แก้วสังข์ 46010915

นายอัครพันธ์ จันทรสงค์ 46010946

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ถาวร เบญจนราสุทธิ์

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแขนกลสำหรับติดตั้งวงใหญ่แบบอัตโนมัติ โดยอาศัยทฤษฎีการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมและตำแหน่งเชิงเส้นของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อให้แขนกลที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถติดตั้งตามโน้ตเพลงที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง การที่แขนกลจะติดตั้งได้อย่างถูกต้องนั้นจะต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับเพื่อตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมของแขนกลและความยาวของแขนกล ในโครงการนี้สัญญาณป้อนกลับเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ คือตัวความต้านทานปรับค่าได้ที่จ่ายไฟเลี้ยงเป็นแรงดันไฟฟ้า ในการขับเคลื่อนแขนกลทั้งการหมุนและการปรับระยะยึดหอคอยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อน ในส่วนการควบคุมได้ประยุกต์การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเขียนโปรแกรมการควบคุมและการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้

ในส่วนการทดลอง ได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งในส่วนการหมุนแขนและการยึดหอคอยแขนกล เพื่อทดสอบเสถียรภาพและประสิทธิภาพ ซึ่งพบว่าการควบคุมที่เหมาะสมในส่วนยึดหอคอยแขนกล คือการควบคุมแบบเปิด-ปิด และในส่วนหมุนแขนกล คือการควบคุมแบบพีไอดี แขนกลที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถติดตั้งตำแหน่งถูกต้องได้อย่างถูกต้อง สามารถนำไปติดตั้งตามโน้ตเพลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROBOT ARMS FOR “GONG WONG YAI”

By

Anawat Nirunsiroj 46010909

Anurak Kaewsung 46010915

Akaraphan Jungsong 46010946

Advisor

Asst. Prof. Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2006

ABSTRACT

This thesis presents the control system design of robot arms for playing “GONG WONG YAI”. The objective is to control the angle and the length of the arms to hit the “GONG” according to the pre-specified music note. For hitting the “GONG” at the right position, each robot arm uses the feedback signals which represent the angle and the length of the robot arm. These signals are measured by adjustable resistive sensors of which their electrical voltage signals change according to the angle and the length of the robot arms. These robot arms use DC motors as their actuators. Microcontrollers are employed as the controller and interfacing unit to a computer.

Then, the experiments in controlling the robot arms are conducted using different types of controllers. It is found that the suitable controller to control the angle of the robot arm is ON-OFF control and to controller the length of the robot arm is PID controller . As a result, the robot arms can hit the “GONG” at the right position according to the specified music note.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานีพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รศ.ดร.จنگกล งามวิวิทย์ และ ผศ.ถาวร เบญจนราษฎร์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้น รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ธวัชชัย คำศรี ที่ให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการและเครื่องมือกลต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ โดยเฉพาะ มิตร และ ค้อม ที่ให้คำปรึกษา ในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลงได้

ผู้จัดทำ

นายอนวัช นีรันครศรีโรจน์

นายอนุรักษ แก้วสังข์

นายอัครพันธ์ จันทรสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 โครงสร้างของแกนกลติ่งวงใหญ่	2
1.1.1 โครงสร้างส่วนแกนกล	2
1.1.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์	2
1.1.3 ส่วนการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์	3
1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีตัวควบคุม	
2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด	4
2.2 ระบบควบคุมแบบพี	5
2.3 ระบบควบคุมแบบไอ	7
2.4 ระบบควบคุมแบบดี	9
2.5 ระบบควบคุมแบบพีไอ	10
2.6 ระบบควบคุมแบบพีดี	12
2.7 ระบบควบคุมแบบพีไอดี	13
2.8 ระบบควบคุมแบบพีไอ อาศัยแอนติไวคัฟ	14
2.9 ตัวควบคุมแบบดิจิตอล	15
บทที่ 3 การออกแบบ	17
3.1 หลักการออกแบบ	17
3.1.1 โครงสร้างส่วนฐาน	18
3.1.2 โครงสร้างส่วนการหมุนแกน	18
3.1.3 โครงสร้างส่วนการยึดและหัดแกน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4	โครงสร้างส่วนไม้ซ้อง	20
3.2	การคำนวณคุณลักษณะของอุปกรณ์	20
3.2.1	ส่วนการหมุนของแขน	20
3.2.2	ส่วนการยึดและหคแขน	22
3.2.3	ส่วนของไม้ซ้อง	22
3.3	วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	24
3.4	วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	26
3.5	วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์	29
3.6	วงจรขยายสัญญาณ	30
3.7	วงจรปรับปรุงแรงดัน	31
3.7.1	วงจรปรับปรุงแรงดัน +/- 26 โวลต์	31
3.7.2	วงจรปรับปรุงแรงดัน +24 โวลต์	33
3.7.3	วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-15 โวลต์	33
3.7.4	วงจรปรับปรุงแรงดัน +5 โวลต์	34
3.8	หลักการทํางานของแขนกลตีมืองวงใหญ่	36
3.9	ไมโครคอนโทรลเลอร์	38
3.10	การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านพอร์ตอนุกรม	40
3.10.1	การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส	40
3.10.2	การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	40
3.10.3	คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS232 และการเชื่อมต่อ	42
3.10.4	หน้าที่ทํางานแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS232	44
3.11	วงจรแปลงสัญญาณ	45
3.11.1	วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	45
3.11.2	วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก	46
3.12	อุปกรณ์วัด	48
3.12.1	อุปกรณ์วัดระยะเวลาเคลื่อนที่ในส่วนการยึดและหคแขน	48
3.12.2	อุปกรณ์วัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขน	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง		54
4.1	การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและหคแขนแบบวงปิด	54
4.1.1	การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและหคแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพี	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนขีดและหัดแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอ	55
4.1.3 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนขีดและหัดแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอดี	56
4.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนแบบวงปิด	57
4.2.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพี	57
4.2.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอ	58
4.2.3 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอดี	58
4.3 การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	68
5.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข	68
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต	69
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	71
ก.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	71
ก.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร	72
ก.3 หลักการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	75
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน	76
ข.1 โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม	76
ข.2 โปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์	132
ภาคผนวก ค. คู่มือประกอบการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในโครงงานนี้	134
ค.1 อุปกรณ์ในส่วนวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	134
ค.1.1 ทรานซิสเตอร์ TIP31C	134
ค.1.2 ทรานซิสเตอร์ TIP32C	134
ค.1.3 ทรานซิสเตอร์ MJ15015	134
ค.1.4 ทรานซิสเตอร์ MJ15016	134
ค.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนโซลินอยด์	137
ค.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ	138
ค.4 อุปกรณ์ในส่วนของวงจรปรับปรุงแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์หรือสิทธิการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4.1 ไอซี LM317	139
ค.4.2 ไอซี LM337	139
ค.4.3 ไอซี LM78XX	139
ค.4.4 ไอซี LM79XX	139
ค.5 อุปกรณ์ตัวควบคุม	144
ค.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก	145
ภาคผนวก ง. แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของถูกน่อง	146
เอกสารอ้างอิง	147



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 น้่องวงใหญ่	1
2.1 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุต	6
2.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี	6
2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี	7
2.4 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ	8
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบไอ	8
2.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี	9
2.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบดี	10
2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ	11
2.9 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ	11
2.10 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีดี	13
2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	14
2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนตี้ไวคัฟ	15
3.1 โครงสร้างของแกนกลดีน้่องวงใหญ่	17
3.2 โครงสร้างฐานของแกนกล	18
3.3 โครงสร้างส่วนการหมุนแกน	19
3.4 โครงสร้างส่วนการยึดและหุดแกน	19
3.5 โครงสร้างส่วนไม้น้่อง	20
3.6 แผนผังของระบบอิเล็กทรอนิกส์	23
3.7 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	25
3.8 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริง	26
3.9 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	27
3.10 กราฟผลการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	29
3.11 วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์	30
3.12 วงจรขยายสัญญาณ	30
3.13 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/- 26 โวลท์	32
3.14 วงจรปรับปรุงแรงดัน +24 โวลท์	33
3.15 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-15 โวลท์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.16 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-5 โวลต์	34
3.17 โครงสร้างระบบควบคุมแกนกลติ่งอ็องวงใหญ่	35
3.18 แผนผังการทำงานของคอมพิวเตอร์	36
3.19 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC1 และ PIC2	37
3.20 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส	40
3.21 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	41
3.22 ไอซี MAX232	42
3.23 การจัดขาของคอนเน็คเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS232 แบบDB-9 และ DB-25	42
3.24 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์	43
3.25 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก	46
3.26 ลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดและการติดตั้ง ในส่วนการยึดและหัดแกน	48
3.27 ลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดและการติดตั้ง ในส่วนการหมุนแกน	49
3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับมุมการเคลื่อนที่	51
3.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับมุมการเคลื่อนที่	53
4.1 ผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแกนด้วยตัวควบคุมแบบพี	55
4.2 ผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแกนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	55
4.3 ผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแกนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี	56
4.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแกนด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ	56
4.5 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแกนด้วยตัวควบคุมแบบพี	57
4.6 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแกนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	58
4.7 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแกนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี	59
4.8 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแกนด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ	59
4.9 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกัน	60
4.10 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนบนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระยะเวลาเคลื่อนที่ห่างกันหนึ่งลูกช็อง	61
4.11 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนล่างด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระยะเวลาเคลื่อนที่ห่างกันหนึ่งลูกช็อง	62
4.12 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนบนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระยะเวลาเคลื่อนที่ห่างกันสามลูกช็อง	63
4.13 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนล่างด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระยะเวลาเคลื่อนที่ห่างกันสามลูกช็อง	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

4.14 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการบิดและหดรัดด้วยอัตราขยายของตัวควบคุม แบบพีที่เหมาะสมในระหว่างการเคลื่อนที่ต่างๆ	64
4.15 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแกนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุม แบบพีไอดีที่เหมาะสมในระหว่างการเคลื่อนที่ต่างๆ	64
4.16 ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแกนกลและโซลินอยด์	65
4.16 ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแกนกลและ โซลินอยด์	66
ก.1 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้า	73
ก.2 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	75
ก.3 บล็อกไดอะแกรมที่ใส่โพเทนชิโอมิเตอร์	75
ข.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี	76
ข.2 หน้าต่างรองของโปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี	77
ข.3 หน้าต่างรองของโปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี	77
ข.4 หน้าต่างของโปรแกรมตีฆ้องวง	90
ค.1 ทรานซิสเตอร์ TIP31C และ TIP32C	135
ค.2 ทรานซิสเตอร์ MJ15015 และ MJ15016	136
ค.3 ทรานซิสเตอร์ IRF540	137
ค.4 ไอซี LM741	138
ค.5 ไอซี LM317	140
ค.6 ไอซี LM337	141
ค.7 ไอซี LM78XX	142
ค.8 ไอซี LM79XX	143
ค.9 ไอซี 16F877	144
ค.10 ไอซี DAC0832	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนการหมุนแขนเมื่อยังไม่เชื่อมต่อกับแขน (ขณะไม่มีโหลด)	21
3.2 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนการหมุนแขนเมื่อมีการเชื่อมต่อกับแขน (ขณะมีโหลด)	21
3.3 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนขีดและหดแขน	22
3.4 ข้อมูลภาระทางไฟฟ้า	24
3.5 ข้อมูลภาระทางไฟฟ้าของส่วนประกอบต่างๆ	24
3.6 ผลการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	28
3.7 ตำแหน่งขาของคอนเน็คเตอร์พอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS232 แบบ DB-9 และ DB-25	43
3.8 ผลการทดลองอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับของไมโครคอนโทรลเลอร์	45
3.9 ผลการทดลองแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก	47
3.10 ผลการทดลองวัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขนล่าง	50
3.11 ผลการทดลองวัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขนบน	52
4.1 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี	67
ง.1 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของลูกมือ	146

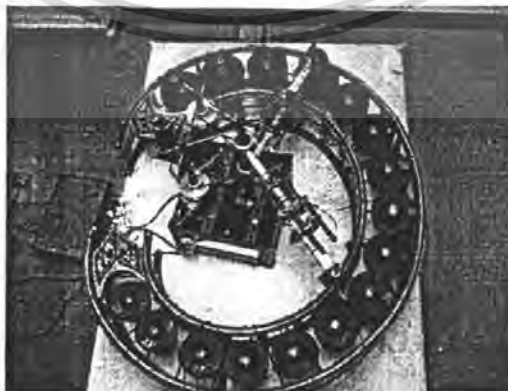
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้แพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ นับตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม นับจากการประยุกต์ใช้ในเครื่องจักรไอน้ำ การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ การประยุกต์ใช้ในยุทโธปกรณ์ การประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมอากาศยาน ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน เป็นต้น โดยเฉพาะระบบควบคุมอัตโนมัติในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิเช่น การควบคุมมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนสายพานในกระบวนการต่างๆ การควบคุมมอเตอร์ในการยกและขนถ่ายสินค้า การควบคุมแขนกล การควบคุมมอเตอร์ของรถไฟฟ้าชนิดต่างๆ ดังนั้นในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจในการใช้งานการควบคุมอัตโนมัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยได้ทำการศึกษาและจำลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง บนพื้นฐานของทฤษฎีการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) ทั้งในเชิงเส้นและเชิงมุม โดยนำมาประยุกต์ใช้งานกับการควบคุมแขนกลตีหม่องวงใหญ่ เพื่อเป็นตัวอย่างของระบบในการศึกษา ส่วนประกอบสำคัญในระบบควบคุมอัตโนมัติสิ่งหนึ่งคือการป้อนกลับซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์วัด (Sensor) ในกรณีนี้อาศัยแรงดันไฟฟ้าจากความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งทำหน้าที่เป็น โปเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อตรวจสอบมุมและระยะที่ต้องการควบคุม

หม่องวงใหญ่มีลูกหม่องอยู่ 16 ลูก เรียงตัวเป็นวงรี จึงทำให้ต้องมีการเคลื่อนที่ของแขนกลในเชิงมุมเพื่อสามารถ ไปยังมุมที่สอดคล้องกับลูกหม่องในแต่ละลูก และยังคงจำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่ในเชิงเส้นเพื่อปรับระยะความยาวของแขนกลให้ตรงกับจุดศูนย์กลางของลูกหม่อง ดังนั้นด้วยเหตุที่การควบคุมแขนกลตีหม่องนี้ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ทั้งเชิงมุมและเชิงเส้น จึงเหมาะสมในการนำมาจำลองเป็นระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมตำแหน่ง



รูปที่ 1.1 หม่องวงใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 โครงสร้างของแขนกลตีฆ้องวงใหญ่

โครงสร้างของแขนกลตีฆ้องวงใหญ่ซึ่งสร้างขึ้นในโครงการนี้ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1.1.1 โครงสร้างส่วนแขนกล

โครงสร้างส่วนแขนกล ประกอบด้วย

- ฐาน มีไว้สำหรับยึดอุปกรณ์ทางกลทั้งหมด ดังนั้นจำเป็นต้องมีน้ำหนักมากเพื่อลดการเหวี่ยงของแขนกล
- ส่วนหมุนแขน ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 2 ตัว และชุดทดรอบ ซึ่งในที่นี้ใช้สายพานเป็นตัวส่งผ่านกำลัง และมีความต้านทานปรับค่าได้แบบหมุนต่อไว้กับส่วนที่ทำหน้าที่หมุน เพื่อตรวจสอบมุมการเคลื่อนที่ของแขนกล แล้วส่งค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปยังส่วนประมวลผล
- ส่วนยึดและหัดแขน ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 2 ตัว และชุดทดรอบ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการของเฟืองตัวหนอนเป็นตัวส่งผ่านกำลัง เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมให้เป็นเชิงเส้น และมีความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนต่อไว้กับส่วนที่ทำหน้าที่ยึดและหัดเพื่อตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของแขนกล แล้วส่งค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปยังส่วนประมวลผลเช่นกัน
- ส่วนไม้ฆ้อง มีหน้าที่ตีลงตามจังหวะที่กำหนด ประกอบด้วยโซลินอยด์ 24 โวลต์ 2 ตัว และส่วนปลายของไม้ฆ้องจริงติดกับสปริงเพื่อลดแรงกระแทก

1.1.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย

- วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply Circuits) เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าแล้วใช้ไดโอดบริดจ์ชนิดเต็มคลื่น (Full Wave Diode Bridges) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) เพื่อทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่มากขึ้น และมีวงจรปรับปรุ้งแรงดัน (Voltage Regulator) เมื่อมีการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างออกไป
- วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive Motor Circuits) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่รับระดับแรงดันไฟฟ้าจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าค้า แล้วส่งค่าระดับแรงดันไฟฟ้านั้น ไปยังมอเตอร์เพื่อขยายกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น

- วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์ (DC Drive Solenoid Circuits) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ ก็จะยอมให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับโซลินอยด์ เมื่อได้รับสัญญาณควบคุมซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต่ำได้
- วงจรขยายสัญญาณ (Signal Amplifier Circuit) เนื่องจากส่วนประมวลผลนั้นไม่สามารถจ่ายระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการได้ จึงต้องทำการเพิ่มค่าระดับแรงดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการก่อนที่จะส่งเข้าไปยังวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.1.3 ส่วนการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

ส่วนการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย

- ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ (User Interface) เนื่องจากต้องการให้การควบคุมเป็นไปโดยง่าย จึงใช้โปรแกรมภาษาซี
- ส่วนติดต่ออุปกรณ์ภายนอก โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ PIC16F877A ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก และเป็นตัวประมวลผลแล้วส่งสัญญาณดิจิทัล ผ่านตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Converter : D/A Converter) เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ และมีการรับสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ผ่านตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter : A/D Converter) เพื่อส่งให้ตัวประมวลผล
- ส่วนประมวลผล จะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากความต้านทานปรับค่าได้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Reference Value) แล้วทำการคำนวณ จากนั้นจึงส่งสัญญาณออกไปเพื่อควบคุมให้แกนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

1.2 เนื้อหาของปริญาานิพนธ์

ในปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาเป็นส่วนต่างๆ ไว้ในแต่ละบท ได้กล่าวถึงโครงสร้างทางกล ทั้งหลักการในการออกแบบ การคำนวณคุณลักษณะของอุปกรณ์ โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ ที่โครงสร้างทางกลใช้ สำหรับในการออกแบบส่วนควบคุม หลักการทำงานของแกนกลที่มีองศาอิสระ และการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในส่วนควบคุมจะกล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งในการควบคุมได้อาศัยทฤษฎีของตัวควบคุมจากบทที่ 2 โดยผลการทดลองการควบคุม จะระบุด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ แสดงในบทที่ 4 และท้ายที่สุด ในบทที่ 5 เป็นส่วนสรุป วิเคราะห์ และนำเสนอข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีตัวควบคุม

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตของอุปกรณ์ขับสำหรับพลานท์ (Plant) ที่ต้องการควบคุม ส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม นิยมเรียก กฎการควบคุม (Control Law) โดยในโครงงานนี้มี 5 รูปแบบด้วยกัน คือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด
2. ระบบควบคุมแบบพี
3. ระบบควบคุมแบบพีไอ
4. ระบบควบคุมแบบพีไอดี
5. ระบบควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนตี้ไวค้อพ

อย่างไรก็ตามในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมยังสามารถทำได้โดยการใช้ตัวควบคุมแบบอื่นหรือส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้าไปในระบบควบคุม

2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด

ในระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะขึ้นอยู่กับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมเป็น ค่าความผิดพลาด $e(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max} & ; e(t) > 0 \\ 0 & ; e(t) = 0 \\ u_{\min} & ; e(t) < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่

u_{\max} คือ ค่าอิมิตัวทางด้านบวกของ $u(t)$

u_{\min} คือ ค่าอิมิตัวทางด้านลบของ $u(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีอาจกำหนดให้ยอมรับค่าความผิดพลาด เพื่อป้องกันการแกว่งของสัญญาณในระบบ โดยหากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เป็น ε จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max} & ; e(t) > 0 \\ 0 & ; -\varepsilon < e(t) < \varepsilon \\ u_{\min} & ; e(t) < -\varepsilon \end{cases} \quad (2.2)$$

2.2 ระบบควบคุมแบบพี (P: Proportional Control)

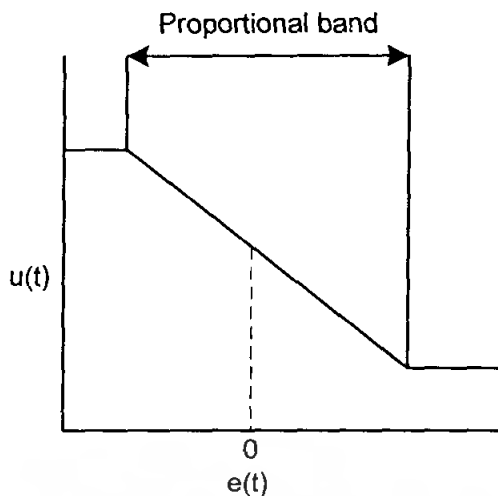
ในระบบควบคุมแบบพี เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมเป็นค่าความผิดพลาด ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain) จะพบว่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบพี เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่กำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีค่าเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.4)$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบนี้ก็จะเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากตัวควบคุมในเวลานั้น อย่างไรก็ตามการที่ให้อัตราขยายคงที่นั้นในทางปฏิบัติอาจกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น หรืออาจกำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าเอาต์พุตไม่น้อยกว่าค่าค่าหนึ่งและไม่มากเกินกว่าค่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 และการกำหนดเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ จะเรียกว่า Proportional Band

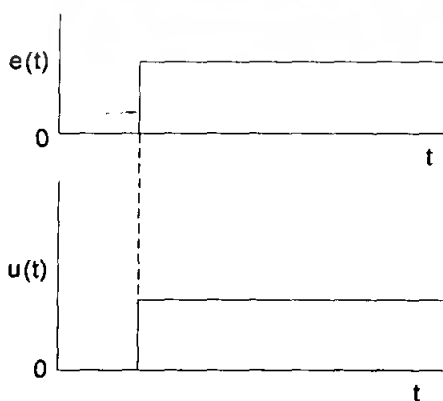


รูปที่ 2.1 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนด Proportional Band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่ค่าอนันต์ ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อตัวควบคุมมีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่ง ก็นิยมที่จะกำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งจะได้ว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \tag{2.5}$$

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ (Step) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับเช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.2 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของตัวควบคุม เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง Proportional Band



รูปที่ 2.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบพีนี้มีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ก็จะได้ลักษณะของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี ดังบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ที่จะแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad (2.6)$$

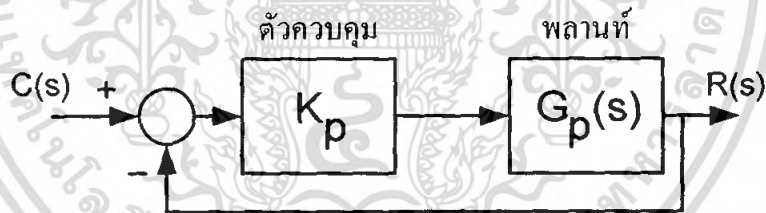
เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานท์ที่ต้องการควบคุม

ข้อเสียของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี คือ ไม่มีการเพิ่มอินทิเกรตหรือ $1/s$ ในส่วน Forward Path ซึ่งหมายความว่า ถ้าพลานท์เป็นชนิด (Type) 0 ระบบควบคุมแบบพีก็ยังคงเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว (Steady State Error)

จากรูปที่ 2.3 เป็นระบบควบคุมแบบพี ซึ่งมีการป้อนกลับหนึ่งหน่วย จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.7)$$

มีสมการคุณลักษณะเป็น $(1 + K_p G_p(s))$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ K_p



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี

2.3 ระบบควบคุมแบบไอ (I: Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบไอเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับการอินทิเกรตสัญญาณของค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา คือ

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยายแบบอินทิเกรต (Integral Gain) ซึ่งจะมีหน่วยเป็น sec^{-1} รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

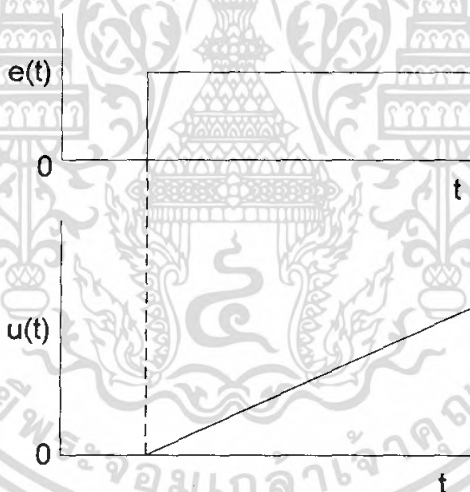
ค่า $u(t)$ ณ เวลา t ใดๆ หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุตจากเวลา 0 ถึง t คูณด้วยอัตราขยายอินทิเกรต ดังนั้นเนื่องจากเริ่มการมีสัญญาณอินพุตแบบระดับ เอาท์พุตที่ออกจากตัวควบคุมจึงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ในลักษณะรูปสัญญาณความชัน (Ramp) จากสมการที่ (2.8) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบไอเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.9)$$

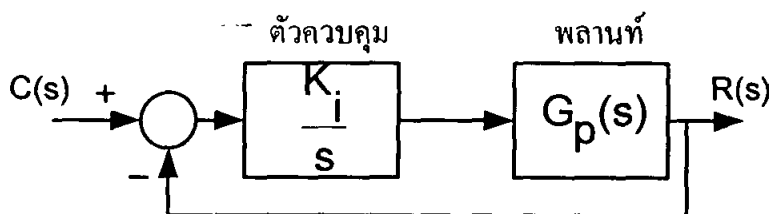
ทำให้ระบบควบคุมแบบไอสามารถแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอน Forward-Path เป็น

$\frac{K_i}{s} G_p(s)$ และมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดเป็น

$$G(s) = \frac{\frac{K_i}{s} G_p(s)}{1 + \frac{K_i}{s} G_p(s)} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.4 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

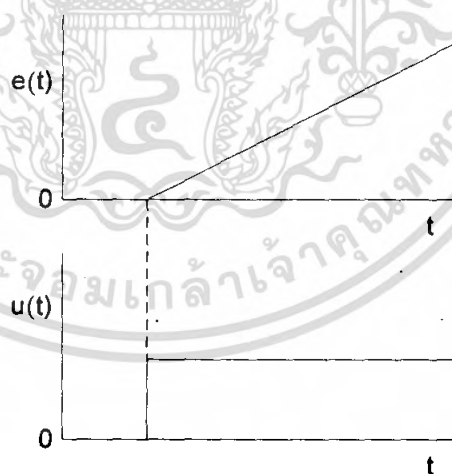
ดังนั้นสามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบโอได้จากฟังก์ชันถ่ายโอน Forward-Path เห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบโอ จะเพิ่มชนิดของระบบขึ้นมา 1 ระดับ เช่น ถ้าพลานท์เป็นชนิด 0 ระบบควบคุมแบบโอจะเป็นชนิด 1 ซึ่งทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัวเป็นศูนย์เทียบกับสัญญาณอินพุตแบบระดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ $s = 0$ ในระบบวงเปิดและไม่มีการเพิ่มซีโรให้กับระบบควบคุม ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนซีโร (m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งมีผลให้มุมของเส้นอะซิมโทต (Asymptote Angles) ของเส้นทางรากลดลง และจุดตัดของเส้นอะซิมโทตบนแกนจริง (Centroid) เคลื่อนไปทางครึ่งขวาของระนาบ s (s -Plane) มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

2.4 ระบบควบคุมแบบดี (D: Derivative Control)

ระบบควบคุมแบบดีนี้ เอาท์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอินพุตความผิดพลาดเทียบกับเวลา นั่นคือ

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

เมื่อ K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative Gain) และมีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี

รูปที่ 2.6 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบความชัน จากสมการที่ (2.11) จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบดีจะให้สัญญาณที่ส่งออกจากตัวควบคุมมีค่ามาก เมื่อค่าอินพุตความผิดพลาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง ก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริงๆ

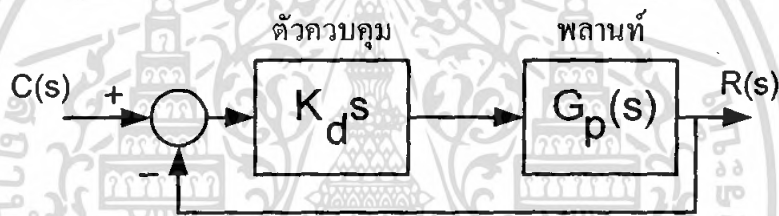
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามหากค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบดีนี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงไม่นิยมใช้เพียงลำพัง แต่มักจะใช้ควบคู่ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบดี จะเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.12)$$

ดังนั้น สำหรับระบบควบคุมแบบดีซึ่งมีการป้อนกลับหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดเป็น

$$G(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.7 บล็อก โคอะแกรมของระบบควบคุมแบบดี

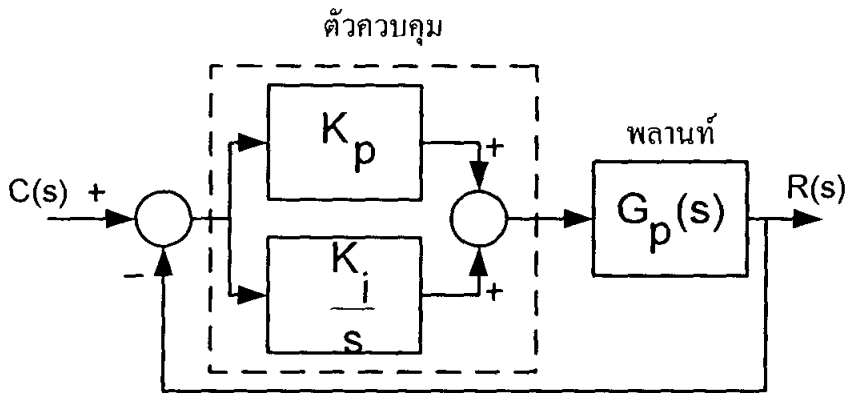
จะเห็นได้ว่าถ้าพลานท์เป็นชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบดีจะลดเทอม s ในพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Forward-Path ลง ซึ่งจะไปลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวก่อนหน้าแล้วว่า การควบคุมแบบดีนี้จะไม่ใช่เพียงลำพังแต่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะจะทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ในทางปฏิบัติการนำตัวควบคุมแบบดีไปใช้นั้นค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบดีโดยใช้ตัวชดเชยแบบมูมนำ (Lead Compensator)

2.5 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI: Proportional plus Integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบไอ จะสามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการ ใช้การควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอ ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามรูปที่ 2.8

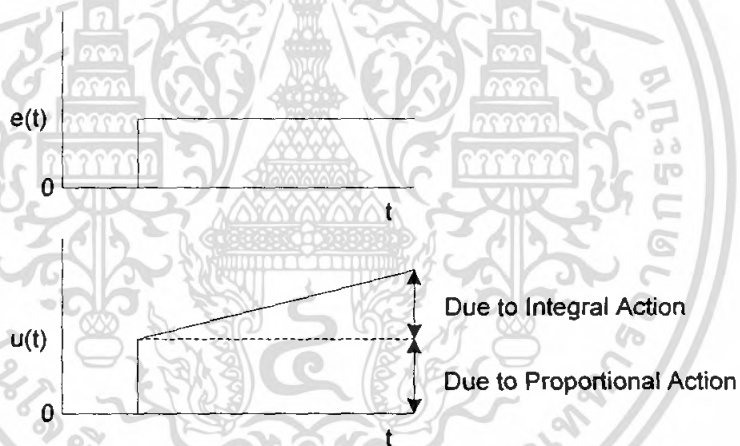
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.9 การตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากรูปที่ 2.9 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นแบบระดับ จากสมการที่ (2.14) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอ เป็น

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \\ &= \frac{sK_p + K_i}{s} \\ &= K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \end{aligned} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามค่าเวลาคงตัวอินทิกรัล (Integral Time Constant) เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]}{s} \quad (2.17)$$

และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดเป็น

$$\begin{aligned} G_o(s) &= G_c(s) G_p(s) \\ &= \frac{K_p [s + (1/\tau_i)] G_p(s)}{s} \end{aligned} \quad (2.18)$$

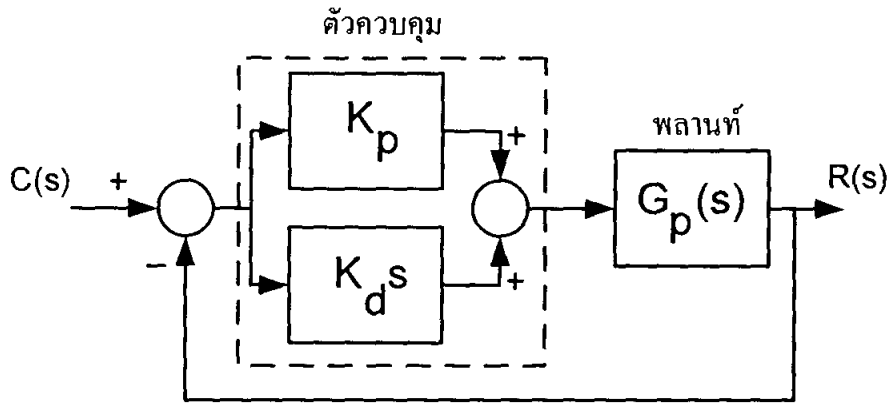
จะเห็นว่ามีซีโรที่ $s = -1/\tau_i$ และโพลที่ $s = 0$ เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็นการเพิ่มชนิดของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบควบคุมแบบพีไอนี้ไม่มีค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุตแบบระดับ นอกจากนั้นการที่เพิ่มซีโรให้กับระบบไปพร้อมๆกัน ก็จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนซีโร (m) มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของเส้นอะซิมโทตสำหรับเส้นทางรากมีค่าคงเดิม แต่จุดตัดของเส้นอะซิมโทตบนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้นเนื่องจาก

$$\text{จุดตัดของเส้นอะซิมโทตบนแกนจริง} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของซีโร}) / (n - m)$$

ดังนั้นจุดตัดของเส้นอะซิมโทตจะเปลี่ยนไปเท่ากับ $-(1/\tau_i) / (n - m)$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบไอเพียงอย่างเดียว

2.6 ระบบควบคุมแบบพีดี (PD: Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบดีใช้ร่วมกับการควบคุมแบบพี ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีดี

$$G_o(s) = (K_p + K_d s) G_p(s)$$

(2.19)

$$G_o(s) = K_p (1 + \tau_d s) G_p(s)$$

เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือ ค่าเวลาคงตัวอนุพันธ์ (Derivative Time Constant) ซึ่งในการควบคุมแบบนี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่ $s = -\tau_d$ และจะเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของระบบเกิดขึ้น ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัว

2.7 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID: Proportional plus Integral plus Derivative

Control)

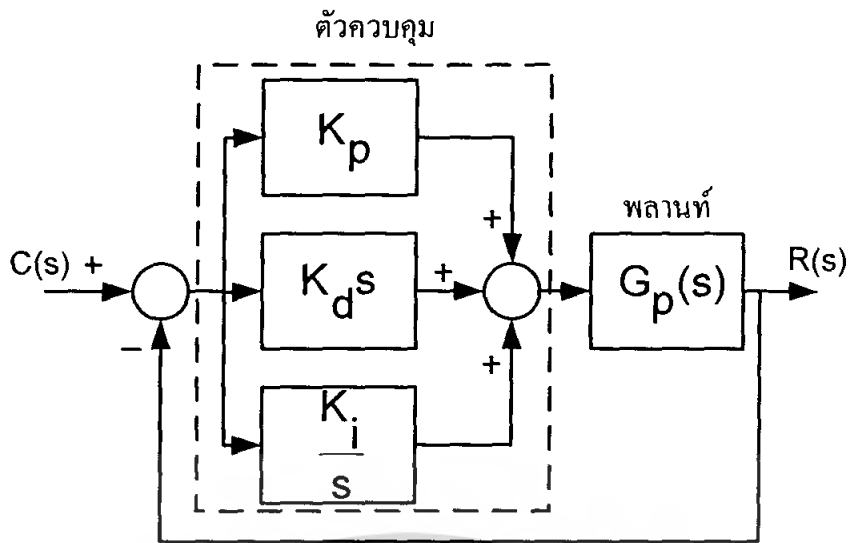
ระบบควบคุมแบบพีไอดีนี้เป็นการควบคุมโดยใช้แบบพีพร้อมกับแบบไอและรวมกับแบบดี หรือ ที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (Three-term Control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.11 ทำให้เอาท์พุทของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.20)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม จะเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 บล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.22)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่แสดงในรูปที่ 2.11 จะเป็น

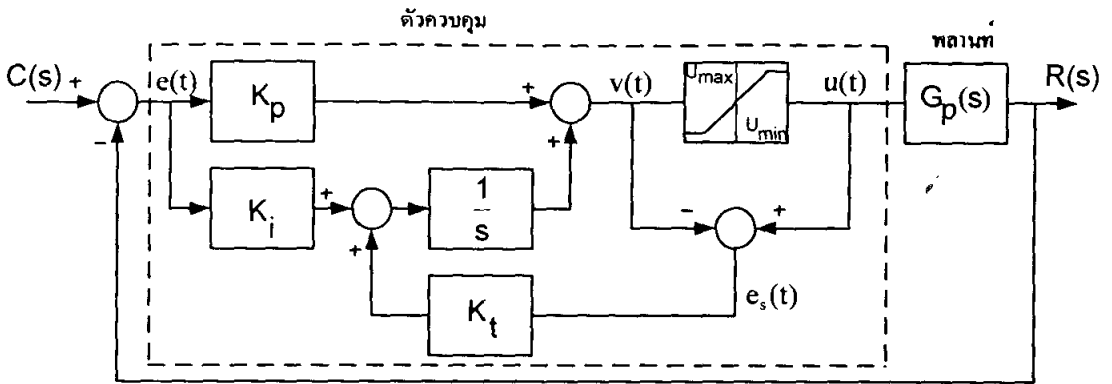
$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s) \quad (2.23)$$

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + 1)}{\tau_i s} G_p(s)$$

ดังนั้น การควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มจำนวนขั้วโขให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัวและเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัว และทำให้ชนิดระบบเพิ่มขึ้น 1

2.8 ระบบควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนตี้ไวต์อัฟ

ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนตี้ไวต์อัฟ สามารถที่จะแก้ปัญหาในกรณีที่สำคัญควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอ เกิดการอิมตัวเป็นเวลานานเกินไป เนื่องจากการสะสมค่าความผิดพลาดในส่วนอินทิเกรต ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนติอินทิเกรต

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t (K_i e(t) + K_t e_s(t)) dt + e_s(t) \quad (2.24)$$

ทำการแปลงลาปลาซ สมการ (2.24) จะได้

$$U(s) = \left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right) E(s) + \left(\frac{s + K_t}{s} \right) E_s(s) \quad (2.25)$$

เมื่อ K_t เป็นค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยายแบบติดตาม (Tracking Gain)

2.9 ตัวควบคุมแบบดิจิตอล

ในการใช้งานจริง เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้จึงต้องเป็นแบบดิจิตอล (Digital Control) แสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

ตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด

$$U[n] = \begin{cases} U_{\max} & ; e[n] > 0 \\ 0 & ; e[n] = 0 \\ U_{\min} & ; e[n] < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมแบบพี

$$U_p[n] = K_p e[n] \quad (2.27)$$

ตัวควบคุมแบบไอ

$$U_i[n] = U_i[n-1] + K_i \frac{T_s}{2} (e[n] + e[n-1]) \quad (2.28)$$

ตัวควบคุมแบบดี

$$U_D[n] = K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T_s} \quad (2.29)$$

ตัวควบคุมแบบพีดี

$$U_{PD}[n] = U_p[n] + U_D[n] \quad (2.30)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอ

$$U_{PI}[n] = U_p[n] + U_i[n] \quad (2.31)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$U_{PID}[n] = U_p[n] + U_i[n] + U_D[n] \quad (2.32)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอ อาศัย แอนต์ไวต์อัฟ

$$U_{I_a}[n] = U_{I_a}[n-1] + \frac{T_s}{2} [K_i (e[n] + e[n-1]) + K_i (e_s[n] + e_s[n-1])] \quad (2.33)$$

$$U_{PI_a}[n] = U_p[n] + U_{I_a}[n]$$

เมื่อ T_s คือคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (Sampling Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ

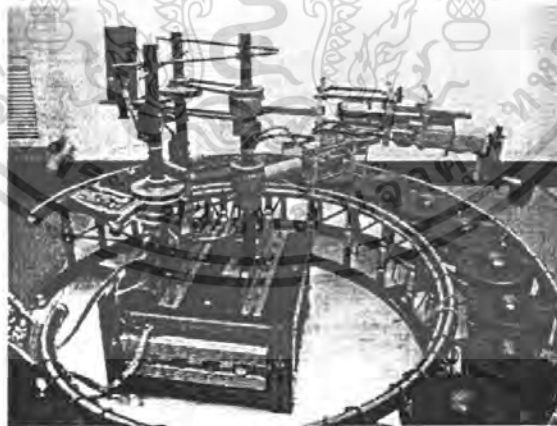
โครงสร้างทางกล

โครงสร้างทางกล เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญเนื่องจากเป็นส่วนดำเนินการหลักของระบบนี้ ดังนั้นในการออกแบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งก่อนที่จะนำมาสร้างเป็นชิ้นงานจริง

3.1 หลักการออกแบบ

เนื่องจากการสร้างชิ้นงานต้องอ้างอิงลักษณะของม็อดวงใหญ่ ดังนั้นจึงได้ออกแบบชิ้นงานให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยโครงสร้างทางกลประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- โครงสร้างส่วนฐาน
- โครงสร้างส่วนการหมุนแกน
- โครงสร้างส่วนการยึดและหัดแกน
- โครงสร้างส่วนไม้ม็อด

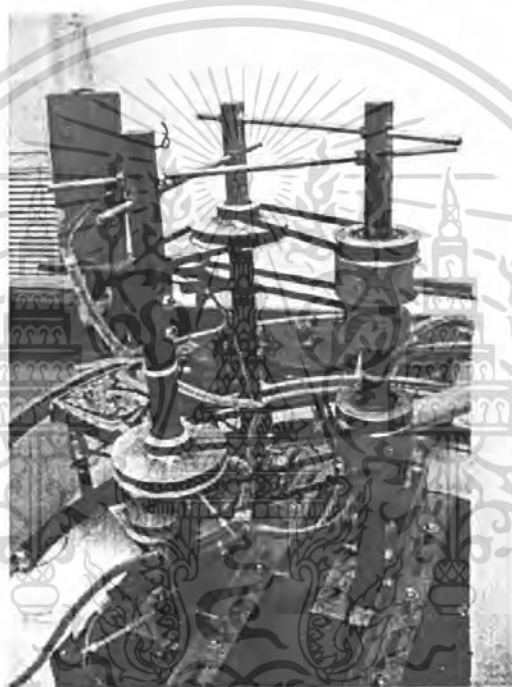


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแกนกลติม็อดวงใหญ่

3.1.1 โครงสร้างส่วนฐาน

ฐานหรือส่วนล่างมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากต้องการเพิ่มความมั่นคง และต้องมีน้ำหนักมากเพื่อลดการเหวี่ยงเมื่อมีการหมุนของแกนกล

ส่วนบนมีลักษณะเป็นเสาตั้งอยู่ในรูปของปริซึมฐานสามเหลี่ยม โดยเสาที่หนึ่งไว้สำหรับยึดแกนเพื่อให้มีศูนย์กลางการหมุนเดียวกัน ทำให้แกนกลสามารถหมุนได้ในระยะ 232.5 องศา ซึ่งเป็นค่าที่สามารถดึงมืองลูกแรกได้จนไปถึงลูกที่สิบสี่ ส่วนเสาที่สองและสามไว้สำหรับติดตั้งชุดทดรอบ และความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งระหว่างเสาทั้งสามมีแกนที่เป็นสลัก มีไว้เพื่อยึดเสาทั้งสามเสาให้มีความมั่นคงยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1

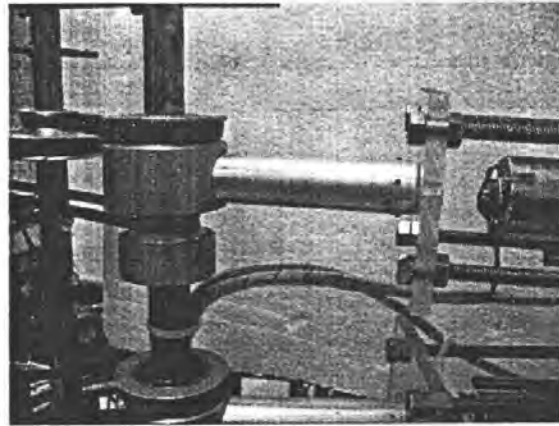


รูปที่ 3.2 โครงสร้างฐานของแกนกล

3.1.2 โครงสร้างส่วนการหมุนแกน

ส่วนหมุนแกน ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เชื่อมต่อกับชุดทดรอบซึ่งใช้สายพานในการส่งผ่านกำลังเพื่อลดความเร็ว และเพิ่มแรงบิด (Torque) โดยมีที่รองรับ (Bearing) ไว้สำหรับลดแรงเสียดทานระหว่างชุดทดรอบกับเสายึดจากนั้นจึงส่งผ่านกำลังมายังแกนหมุนซึ่งที่แกนหมุนนี้ได้ทำการเชื่อมต่อกับความต้านทานปรับค่าได้แบบหมุน โดยใช้สายพานเป็นตัวขับเคลื่อนในการหมุน เพื่อตรวจสอบมุมการหมุนของแกนกลโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

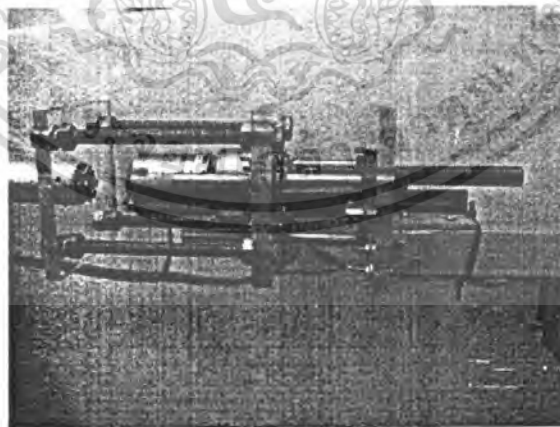


รูปที่ 3.3 โครงสร้างส่วนการหมุนแกน

3.1.3 โครงสร้างส่วนการยึดและหัดแกน

ส่วนการยึดและหัดแกนประกอบด้วย โครงสร้างส่วนคงที่จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับเกลิยว และยึดติดกับเป็นเป็นชิ้นที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่มีรู 3 รู ซึ่งติดตัวนำการเลื่อน (Sliding Guide) ไว้ให้สลักเกลิยว (Bolt) ซึ่งมีไว้รับน้ำหนักของส่วนหน้าทีเลื่อนเข้าและออกได้เมื่อมีการเคลื่อนที่ของส่วนหน้าเกิดขึ้น และได้เชื่อมต่อด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนไว้กับเป็นชิ้นที่เคลื่อนที่ได้และส่วนที่คงที่ เพื่อตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของแกนกล

ส่วนหน้ามีรูตรงกลาง ซึ่งเป็นเกลิยวภายใน และสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ โดยมีสลักเกลิยว 3 ตัว ไว้รับน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.4

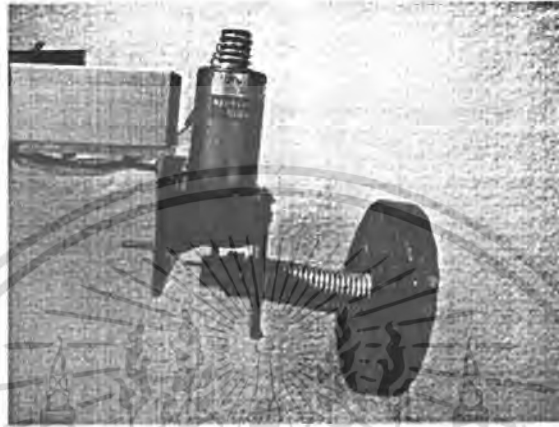


รูปที่ 3.4 โครงสร้างส่วนการยึดและหัดแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 โครงสร้างส่วนไม้ฉิ่ง

ไม้ฉิ่งและจังหวะการตีลงนั้น ได้อาศัยโซลินอยด์เป็นตัวขับเคลื่อน เนื่องจากต้องการความเร็วสูง และไม่จำเป็นต้องมีการป้อนกลับของระยะการตี ส่วนปลายใช้ไม้ฉิ่งจริงต่อเข้ากับสปริงเพื่อลดแรงในการตี เนื่องจากแกนกลนี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงระดับของแรงในการตีได้ ดังนั้นจึงให้สปริงเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อลูกฉิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างส่วนไม้ฉิ่ง

3.2 การคำนวณคุณลักษณะของอุปกรณ์

3.2.1 ส่วนการหมุนของแกน

ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 24 โวลต์ 4 แอมแปร์ มีความเร็ว 5000 รอบ/นาที ซึ่งได้สร้างชุดทดรอบที่มีอัตราทดเป็น 1:12.5 ทำให้ความเร็วในการหมุนแกนเป็น 400 รอบ/นาที แต่เนื่องจากภาระของมอเตอร์ไม่ส่งผลต่อแรงบิด ดังนั้นจึงมีเพียงแรงเสียดทานเท่านั้นที่ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งในความเป็นจริงนั้นต้องการความเร็วรอบเพียง 240 รอบ/นาที ดังนั้นแรงเสียดทานในการหมุนจึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ

ในที่นี้ได้ทำการทดลองมอเตอร์ส่วนการหมุนแกนเมื่อยังไม่เชื่อมต่อกับแกน และเชื่อมต่อกับแกน เพื่อดูความเร็วรอบของมอเตอร์ และระดับกระแสที่มอเตอร์ใช้ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนการหมุนแกนเมื่อยังไม่เชื่อมต่อกับแกน (ขณะไม่มีโหลด)

ค่าระดับแรงดัน (V)	ค่าระดับกระแส (A)	ความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)	ความเร็วรอบเมื่อผ่านชุด ทรอบ (RPM)
1	0.1	หมุนช้ามาก	หมุนช้ามาก
2	0.1	1000	80
6	0.1	1280	102.4
10	0.1	1400	112
14	0.2	3200	256
18	0.2	4200	336
24	0.2	4850	388

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อมอเตอร์มีการทรอบ จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงมาก

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนการหมุนแกนเมื่อมีการเชื่อมต่อกับแกน (ขณะมีโหลด)

ค่าระดับแรงดัน (V)	ค่าระดับกระแส(A)	การหมุนของแกน
1	0.25	ไม่หมุน
2	0.53	ไม่หมุน
4	1.16	ไม่หมุน
6	2.04	เริ่มหมุน
10	3.02	หมุนช้า
14	3.23	หมุนเร็ว
18	3.31	หมุนเร็ว
24	3.46	หมุนเร็ว

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า แกนจะหมุนก็ต่อเมื่อค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 6 โวลต์ และวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ต้องมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากกว่า 3.5 แอมแปร์เป็นอย่างน้อย ซึ่งผลการทดลองต่างๆ นี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการนำไปพิจารณาหาขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ส่วนการยึดและหัดแขน

ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 24 โวลต์ 3 แอมแปร์ มีความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ซึ่งได้สร้างชุดทดสอบแบบเฟืองตัวหนอนที่มีอัตราทดเป็น 2 มิลลิเมตร/รอบ ทำให้ความเร็วรอบในการยึดและหัดเป็น 100 เซนติเมตร/นาที แต่เนื่องจากภาระทางมอเตอร์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อแรงบิดเช่นกัน ดังนั้นจึงมีเพียงแรงเสียดทานในการหมุนเท่านั้นที่ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งในความเป็นจริงนั้นต้องการความเร็วในการยึดและหัดแขนเป็น 90 เซนติเมตร/นาที ดังนั้นแรงเสียดทานในการหมุนจึงส่งผลกระทบต่อระบบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในที่นี้ได้ทำการทดลองมอเตอร์ส่วนการยึดและหัดแขนแขนเมื่อได้เชื่อมต่อกับแขน เพื่อดูความเร็วรอบของมอเตอร์ และระดับกระแสที่มอเตอร์ใช้ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองมอเตอร์ส่วนยึดและหัดแขน

ค่าระดับแรงดัน (V)	ค่าระดับกระแส (A)	ความเร็วรอบในการหมุน
1	0.23	ไม่หมุน
2	0.47	ไม่หมุน
4	0.49	เริ่มหมุน
6	0.52	หมุนช้ามาก
10	0.74	หมุนเร็ว
14	0.87	หมุนเร็ว
18	1.0	หมุนเร็ว
24	1.1	หมุนเร็ว

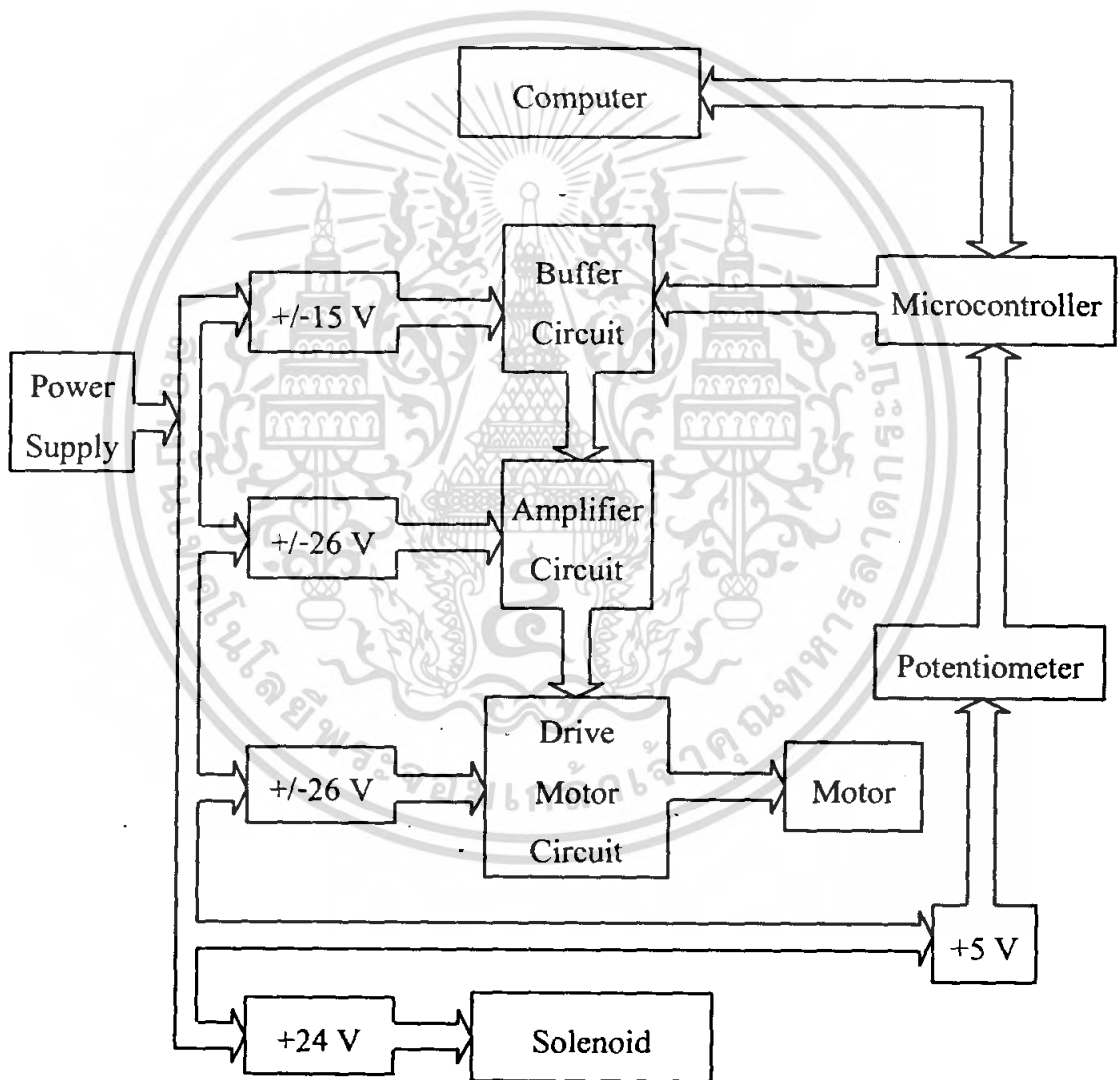
จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า แขนกลจะเคลื่อนที่ก็ต่อเมื่อค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 4 โวลต์ และจะเคลื่อนที่ได้ดีเมื่อค่าระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 6 โวลต์ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ต้องมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากกว่า 1.5 แอมแปร์เป็นอย่างน้อย ซึ่งผลการทดลองต่างๆ นี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการนำไปพิจารณาหาขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

3.2.3 ส่วนของไม้ข้อง

การขับเคลื่อนต้องการระยะเพียง 1 ถึง 2 เซนติเมตรเท่านั้น จึงสามารถใช้โซลินอยด์ในการขับเคลื่อนได้ ซึ่งโซลินอยด์ที่ใช้มีขนาด 24 โวลต์ 1 แอมแปร์

โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

จากโครงสร้างเชิงกล จะเห็นได้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางกลส่วนหนึ่งทั้งในส่วนการหมุนแขนและส่วนการยึดและหัดแขนนั้น เมื่อนำไปเชื่อมต่อกับแขน ทั้งสองส่วนจะใช้กระแสสูง ซึ่งอยู่ในระดับแอมแปร์ แต่ในการควบคุมระบบโดยคอมพิวเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นการควบคุมโดยสัญญาณกระแสต่ำ ซึ่งอยู่ในระดับมิลลิแอมแปร์เท่านั้น จึงไม่สามารถนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ทางกลต่างๆ ที่ต้องการกระแสสูงได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องอาศัยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวส่งผ่านแรงดัน และจ่ายกระแสให้เพียงพอกับความต้องการของอุปกรณ์ทางกล โดยมีแผนผังของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังของระบบอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการทดสอบโครงสร้างทางกลในบทที่ 2 ทำให้สามารถกำหนดได้ว่าต้องการใช้กระแสไฟฟ้าและแรงดันในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าและโซลีนอยด์เท่าไร รวมถึงระดับแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรต่างๆ ซึ่งมีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลภาระทางไฟฟ้า

ชนิดของอุปกรณ์	ระดับแรงดัน (V)	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)
มอเตอร์(หมุนแขน)	+/-24	3.5
มอเตอร์(ยึดและหดแขน)	+/-24	1.5
โซลีนอยด์	+24	1.0

จากตารางพบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์ข้างต้นพร้อมกันทั้งหมดจำนวน 2 ชุด จะต้องจ่ายกระแสให้กับภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดเป็น 12 แอมแปร์

หลักการคำนวณพิกัดกระแสของหม้อแปลง

$$\text{กระแสไฟฟ้าสูงสุดของภาระทางไฟฟ้า} \times \text{ค่าชดเชยความผิดพลาด} = \text{พิกัดกระแสของหม้อแปลง}$$

$$12 \times 1.5 = 18 \text{ A}$$

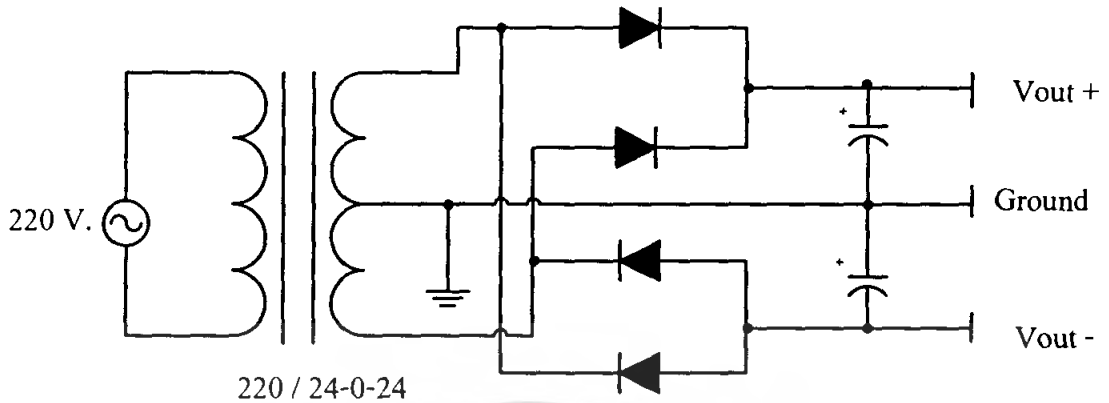
จากการคำนวณไม่สามารถหาหม้อแปลงที่มีขนาด 18 แอมแปร์ได้ จึงจำเป็นต้องทำการแยกภาระไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลภาระทางไฟฟ้าของส่วนประกอบต่างๆ

ชนิดของอุปกรณ์	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	พิกัดกระแส (A)	ขนาดที่ใช้จริง (A)
มอเตอร์(หมุนแขน)	3.5	5.25	5.0 *
มอเตอร์(ยึดและหดแขน)และ โซลีนอยด์	2.5	3.75	4.0

* ในกรณีนี้ใช้หม้อแปลงซึ่งมีพิกัดต่ำกว่าพิกัดกระแสที่ต้องการเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นหม้อแปลงที่มีอยู่แล้ว

เมื่อทราบพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว การทำให้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้นั้น จะอาศัยวงจรดังรูปที่ 3.6 ซึ่งยังต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นๆ ดังนี้



รูปที่ 3.7 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

1. ไดโอดบริดจ์ชนิดเต็มคลื่น (Full Wave Bridge) ต้องมีความสามารถในการทนกระแสได้อย่างน้อยสองเท่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และมีค่าแรงดันพังทลาย (Break Down Voltage) มากกว่า $4\sqrt{2}$ เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

2. ตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่ให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีความเรียบมากขึ้น ซึ่งมีการคำนวณ ดังนี้

$$C \geq I_{\max} / (F_r \times \Delta V)$$

เมื่อ

I_{\max} คือ กระแสสูงสุดที่ภาระไฟฟ้าต้องการ

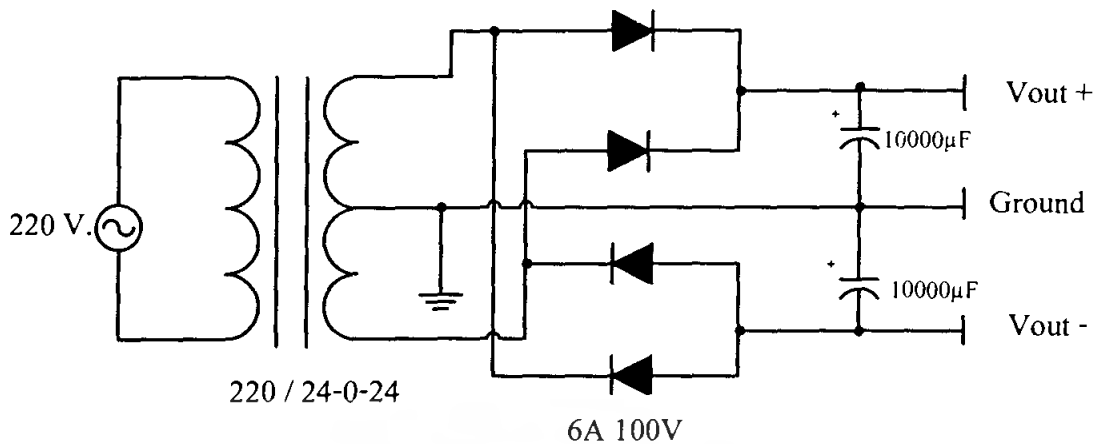
F_r คือ ความถี่ของแรงดันที่ออกจากไดโอดบริดจ์

ΔV คือ ขนาดของแรงดันกระเพื่อมที่ต้องการ

ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรมีการคำนวณ ดังนี้

$$3.5 / (100 \times 3.5) = 10000 \mu\text{F}$$

ซึ่งจากค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ ทำให้สามารถออกแบบวงจรที่ใช้งานจริง ดังรูปที่ 3.7

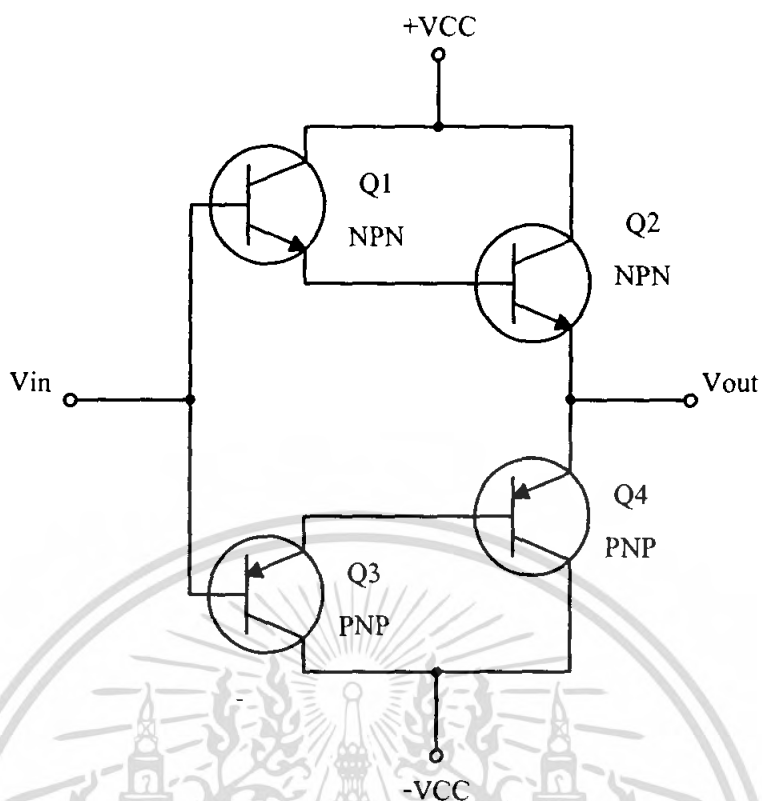


รูปที่ 3.8 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริง

3.4 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากลำดับข้างต้นการสั่งงานเพื่อควบคุมมอเตอร์นั้น เมื่อโปรแกรมที่เขียนเพื่อกำหนดระดับแรงดันควบคุมมอเตอร์ได้คำนวณและส่งระดับแรงดันออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแล้ว ยังจำเป็นต้องมีวงจรที่ช่วยจ่ายกระแสและคงระดับแรงดันควบคุมก่อนที่จะส่งไปจ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะกระแสที่จ่ายออกมาจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกนั้นอยู่ในระดับแอมแปร์เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอที่มอเตอร์ต้องการ (มอเตอร์ต้องการกระแสเฉลี่ย 3 แอมแปร์ขณะหมุน)

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เลือกใช้ในโครงการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวงจรดาร์ลิงตัน (Darlington) คือการนำทรานซิสเตอร์ (Transistor) ทั้งชนิด PNP และ NPN มาต่อร่วมกันเพื่อช่วยกันทำงานในกรณีที่สัญญาณขาเข้า มีทั้งซีกบวกและซีกลบ



รูปที่ 3.9 วงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดย

- Q1 ใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN เบอร์ TIP31C
- Q2 ใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN เบอร์ MJ15015
- Q3 ใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP เบอร์ TIP32C
- Q4 ใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP เบอร์ MJ15016

การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ ดังนี้

- ถ้าอินพุตเป็นบวก ทรานซิสเตอร์ Q1 จะทำงาน ขา BE ถูกกระตุ้น แบบ forward bias ทำให้มีกระแสไหลจากขา C ไปขา E ส่งผลให้ขา BE ของทรานซิสเตอร์ Q2 ถูกกระตุ้นด้วย ทำให้เอาต์พุต ได้รับแรงดันเป็นบวกมีขนาดเท่ากับแรงดันอินพุต ส่วนกระแสจะได้จากแหล่งจ่ายไฟบวก (+Vcc) ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q2 ซึ่งจะเป็นตัวช่วยจ่ายกระแสให้กับโหลดแทนกระแสจากอินพุตที่มีค่าน้อยมากไม่พอที่จะจ่ายให้กับโหลด ส่วนทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 ไม่ทำงาน เพราะ ขา BE ได้รับแบบ reward bias

- ถ้าอินพุตเป็นลบ ทรานซิสเตอร์ Q3 จะทำงาน ขา BE ถูกกระตุ้นแบบ forward bias ทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q4 ทำงานด้วย ซึ่งมีหลักการการทำงานเช่นเดียวกับเป็นอินพุตบวก ทำให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟลบ (-Vcc) ดังนั้นแรงดันและกระแสที่ออกเอาต์พุตจะกลับทิศทางกับแบบ

เอกสารแรกนี้ ซึ่งทรานซิสเตอร์ Q4 จะเป็นตัวช่วยจ่ายกระแสเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

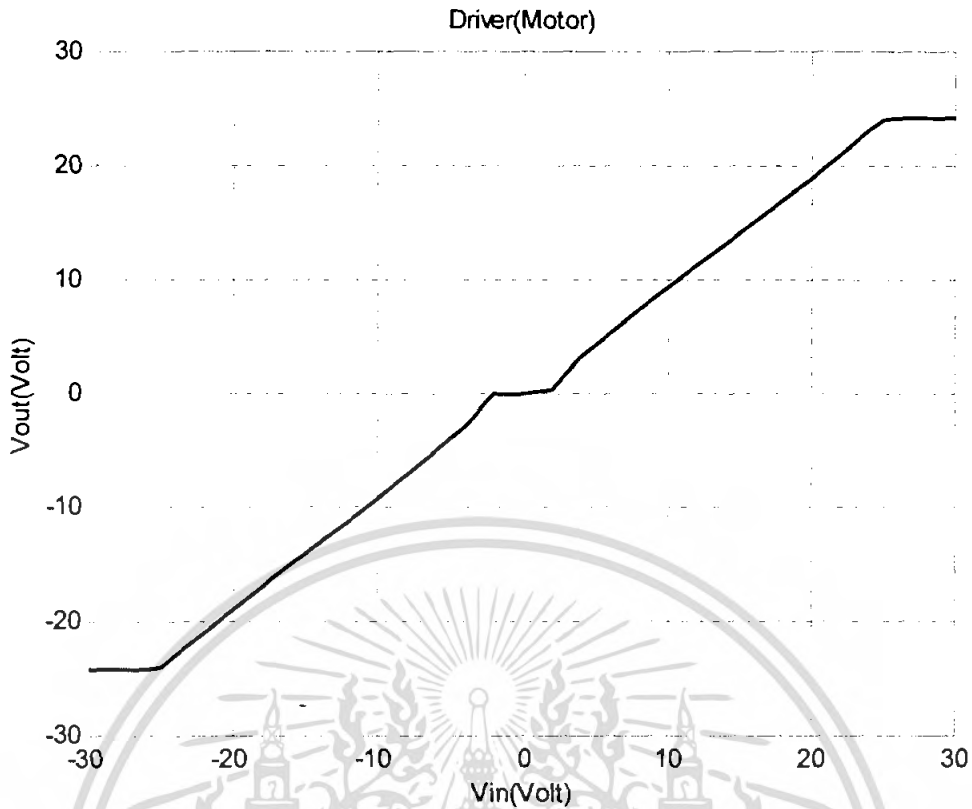
คุณสมบัติของวงจร

- ค่าความต้านทานอินพุตสูงมาก
- ค่าความต้านทานเอาต์พุตต่ำมาก
- ไม่ดึงกระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุต
- สามารถจ่ายกระแสได้สูง
- มีอัตราขยายแรงดัน $\frac{V_{out}}{V_{in}} \cong 1$

จากวงจรดังรูปที่ 3.9 ได้นำมาทดลองในขณะที่ไม่มีโหลด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.10 โดยในการทดลองนั้นแรงดัน +/-VCC มีค่าเท่ากับ +/-26 โวลต์ เป็นค่าที่ได้มาจากวงจรปรับปรุงแรงดันดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.7.1

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แรงดันอินพุต (V)		แรงดันเอาต์พุต (V)	
อินพุตบวก	อินพุตลบ	เอาต์พุตซีกบวก	เอาต์พุตซีกลบ
0	0	0	0
2	2	0.225	0.175
4	4	3.152	2.925
8	8	7.223	7.056
12	12	11.123	11.098
16	16	15.012	14.825
20	20	18.902	18.878
24	24	23.223	22.965
25	25	24	23.956
26	26	24.123	24.2
27	27	24.2	24.256
28	28	24.156	24.26
29	29	24.178	24.27
30	30	24.178	24.27

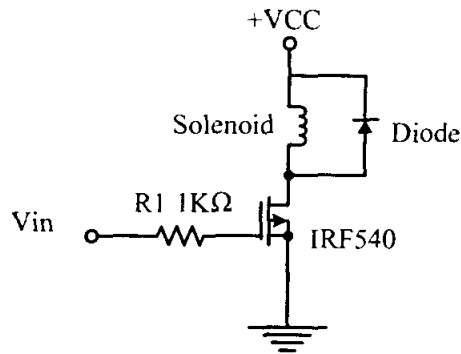


รูปที่ 3.10 กราฟผลการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีช่วงการทำงานที่แรงดันอินพุตอยู่ในช่วงประมาณ -25 โวลต์ ถึง 25 โวลต์ เนื่องจากถ้าจ่ายแรงดันอินพุตมากกว่าช่วงการทำงานนี้แล้วแรงดันเอาต์พุตจะเกิดการอิ่มตัว จากผลการทดลองนี้ สามารถกำหนดการออกแบบของวงจรมอเตอร์ได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.6

3.5 วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์

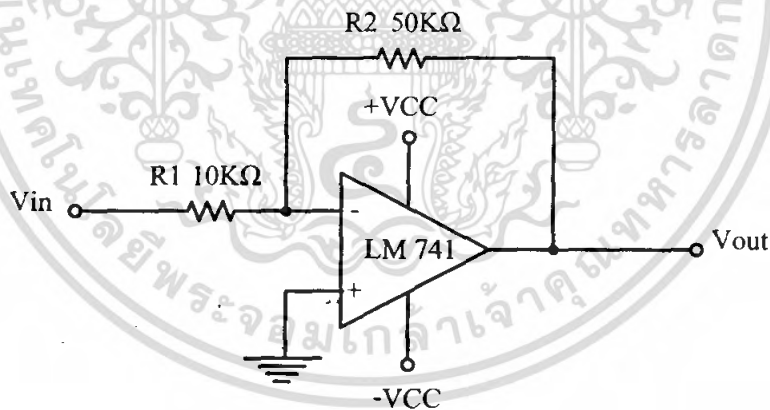
เป็นวงจรที่ใช้คุณสมบัติของ FET (Field Effect Transistor) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งทำหน้าที่เหมือนสวิตช์เปิด-ปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า +VCC ที่จ่ายให้กับโซลินอยด์ ดังมีรายละเอียดของวงจรในรูปที่ 3.7 โดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีสัญญาณแรงดันขาเข้า V_{in} เป็นบวกมากระตุ้นให้ FET ทำงานที่ขา Gate จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากขา Drain ไปยังขา Source ทำให้โซลินอยด์ทำงานและจะคงค้างสถานะการทำงานเดิมอยู่จนกว่าจะให้สัญญาณแรงดันขาเข้าเป็น 0 โวลต์ (Ground) ทำให้ FET ไม่ทำงาน และโซลินอยด์ก็จะไม่ทำงานด้วย



รูปที่ 3.11 วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์

3.6 วงจรขยายสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกนั้นเป็นสัญญาณที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอต่อการจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า (ระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณควบคุมอยู่ในช่วง -5 โวลต์ ถึง +5 โวลต์) ซึ่งจากผลการทดลองดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.10 นั้นแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องออกแบบวงจรขยายสัญญาณให้มีเอาต์พุตอยู่ในย่านการทำงาน โดยระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณควบคุมที่ต้องการอยู่ในช่วง -24 โวลต์ ถึง +24 โวลต์ วงจรขยายสัญญาณในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณ

วงจรมีใช้คุณสมบัติของออปแอมป์ (Operation Amplifier) มาทำเป็น Inverting Amplifier เนื่องจากต้องการขยายสัญญาณจาก +/- 5 โวลต์เป็น +/- 24 โวลต์ ดังนั้นจึงให้อัตราขยายของ Inverting Amplifier เป็น 4.8 เท่า จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของ Inverting Amplifier

$$\text{ฟังก์ชันถ่ายโอน } \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไม่สามารถหาออปแอมป์ ที่จ่ายแรงดันขาออกVout ได้ถึง +/-24 โวลต์ได้ (โดยดูจากคู่มือพิกัดแรงดันที่ออปแอมป์ที่ต้องการ) ดังนั้นจึงใช้ออปแอมป์เบอร์ LM741 ซึ่งมีพิกัดที่เท่ากับ +/-22 โวลต์ ซึ่งให้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดประมาณ +/-20 โวลต์ ดังนั้นจะขยายสัญญาณจาก +/-5 โวลต์ แล้วให้แรงดันได้ไม่เกิน +/-20 โวลต์

อย่างไรก็ตามในวงจรที่ใช้งานจริง พบว่าสามารถจ่ายแรงดันได้ถึง +/-26 โวลต์ จากอัตราขยายของ Inverting Amplifier 4.8 เท่า ซึ่งเลือกใช้อัตราขยายที่ 5 เท่า ดังนั้นจึงให้ R1 เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม และ R2 เท่ากับ 50 กิโลโอห์ม ทำให้สามารถขยายสัญญาณจาก +/-5 โวลต์ เป็น +/-24 โวลต์ โดยประมาณ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ขับมอเตอร์ และเนื่องจากแกนกลมีมอเตอร์อยู่ 4 ตัว จึงต้องมีสัญญาณควบคุม 4 สัญญาณ และต้องมีวงจรขยายสัญญาณ 4 ชุด

3.7 วงจรปรับปรุงแรงดัน

หลังจากที่ได้สร้างวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้ว แต่ในวงจรส่วนต่างๆ นั้นต้องการแรงดันที่ไม่เท่ากันจึงจำเป็นต้องสร้างวงจรปรับปรุงแรงดันเพื่อปรับปรุงแรงดันให้มีหลายๆ ระดับ ให้เพียงพอกับความต้องการของระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มี

จากรูปที่ 3.5 ที่แสดงแผนผังของระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าต้องมีวงจรปรับปรุงแรงดันที่ต่างกัน ดังนี้

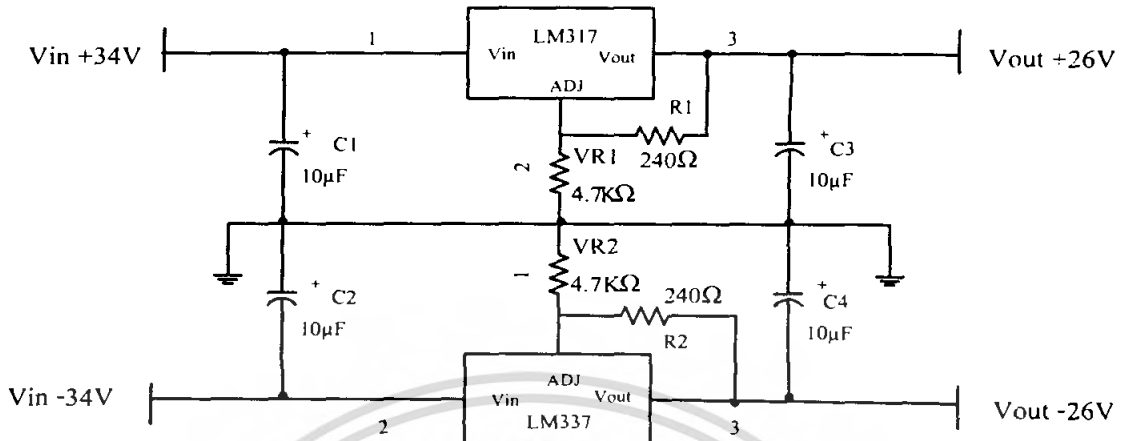
- วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-26 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรขยายสัญญาณที่จ่ายให้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- วงจรปรับปรุงแรงดัน +24 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์
- วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-15 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณที่อยู่ในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก
- วงจรปรับปรุงแรงดัน +5 โวลต์ จ่ายให้กับอุปกรณ์วัด จ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และจ่ายเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

วงจรปรับปรุงแรงดันทั้ง 4 วงจรข้างต้นใช้วงจรจ่ายแรงดันคงที่ (Voltage Regulator) ในการสร้างระดับแรงดันทุกวงจร แต่รายละเอียดจะแตกต่างกันไปเล็กน้อยเนื่องจากระดับแรงดันที่ใช้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจะจำแนกรายละเอียดที่ละวงจรจากแรงดันมากไปหาแรงดันน้อย ดังนี้

3.7.1 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/- 26 โวลต์

เป็นวงจรที่ใช้แรงดันอินพุต Vin จากแรงดันเอาต์พุตของวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 เพราะเป็นวงจรที่ต้องการระดับแรงดันที่สูงที่สุด ได้ใช้ไอซี (IC: Integrated Circuit) วงจรจ่ายแรงดันคงที่เบอร์ LM317 ซึ่งเป็นวงจรจ่ายแรงดันคงที่ทางด้านบวกที่ปรับค่าได้ (Adjustable Positive Voltage Regulator) และเบอร์ LM337 ซึ่งเป็นวงจรจ่ายแรงดันคงที่ด้านลบที่

ปรับค่าได้ (Adjustable Negative Voltage Regulator) และทั้งสองเบอร์นี้สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 1.5 แอมแปร์ โดยรายละเอียดวงจรแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรปรับปรุ้งแรงดัน +/- 26 โวลต์

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร VR1 และ Vout คือ

$$V_{out} = 1.25 \times [1 + (VR1/R1)] + I_{adj} \times VR1$$

เมื่อ I_{adj} คือ กระแสที่ไหลผ่าน VR1 มีค่าประมาณ 50 ไมโครแอมแปร์ และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร VR2 และ Vout ก็เป็นเช่นเดียวกับข้างต้น

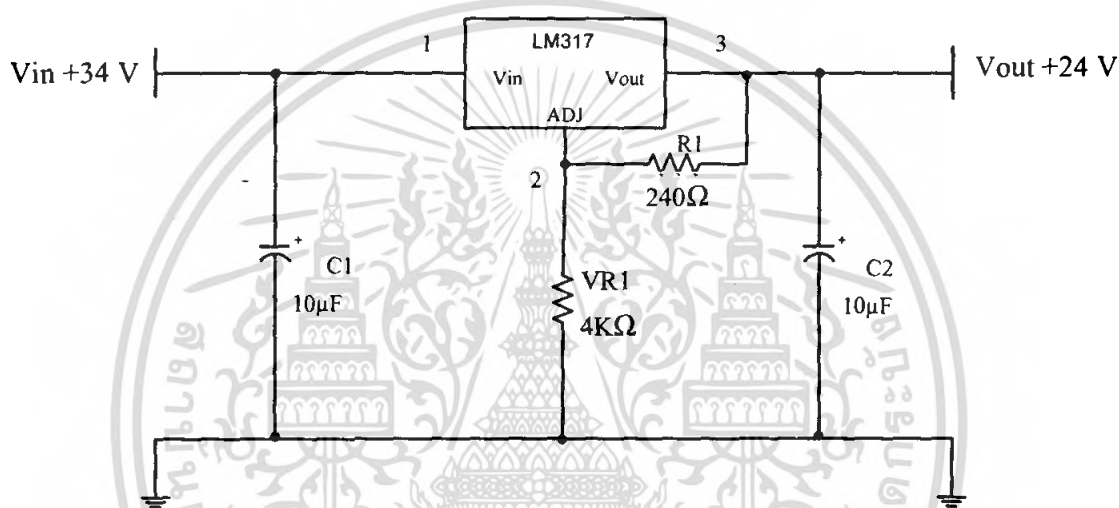
เนื่องจากวงจรต้องการระดับแรงดัน +/-26 โวลต์ และจ่ายกระแสได้ 3.5 แอมแปร์อย่างต่ำ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ R1 เป็น 240 โอห์ม จึงต้องใช้ VR1 และ VR2 เท่ากับ 4.7 กิโลโอห์ม จึงจะได้ระดับแรงดันเอาต์พุต Vout เป็น +/-26 โวลต์

วงจรปรับปรุ้งแรงดัน +/-26 โวลต์นี้ ต้องมีด้วยกัน 4 จุด คือ 2 จุดแรก ในแต่ละจุดต้องสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 2.25 แอมแปร์เป็นอย่างต่ำ จึงนำ LM317 มาขนานกัน 2 ตัว และ LM337 มาขนานกัน 2 ตัว เพื่อเพิ่มกระแสเป็น 3 แอมแปร์ ทั้งด้านบวกและด้านลบ เพื่อจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรขยายสัญญาณที่จ่ายให้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนยึดและหัดแขน ส่วนอีก 2 จุด ต้องสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 5 แอมแปร์เป็นอย่างต่ำ จึงนำ LM317 และ LM337 อย่างละ 4 ตัว มาขนานในลักษณะเดียวกันกับข้างต้นเพื่อเพิ่มกระแสเป็น 6 แอมแปร์ เพื่อจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรขยายสัญญาณที่จ่ายให้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนหมุนแขน

3.7.2 วงจรปรับปรุ้งแรงดัน +24 โวลต์

วงจรขับเคลื่อนโซลีนอยด์นั้นต้องการระดับแรงดัน 24 โวลต์ จะเห็นได้ว่าใช้ระดับแรงดันเพียงด้านเดียว คือ ด้านบวก และต้องการกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ จึงใช้วงจรจ่ายแรงดันคงที่เบอร์ LM317 เพียงตัวเดียว ซึ่งเพียงพอทั้งระดับแรงดันและความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโซลีนอยด์ โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่าง VR1 และ Vout เหมือนวงจรข้างต้น

เนื่องจากต้องการระดับแรงดัน 24 โวลต์ และจ่ายกระแสได้ 1.5 แอมแปร์ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ R1 เป็น 240 โอห์ม ดังนั้นจะต้องใช้ VR1 เท่ากับ 4 กิโลโอห์ม ซึ่งจึงจะได้ระดับแรงดันด้านขาออก เป็น 24 โวลต์ ตามที่ต้องการ โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 3.10



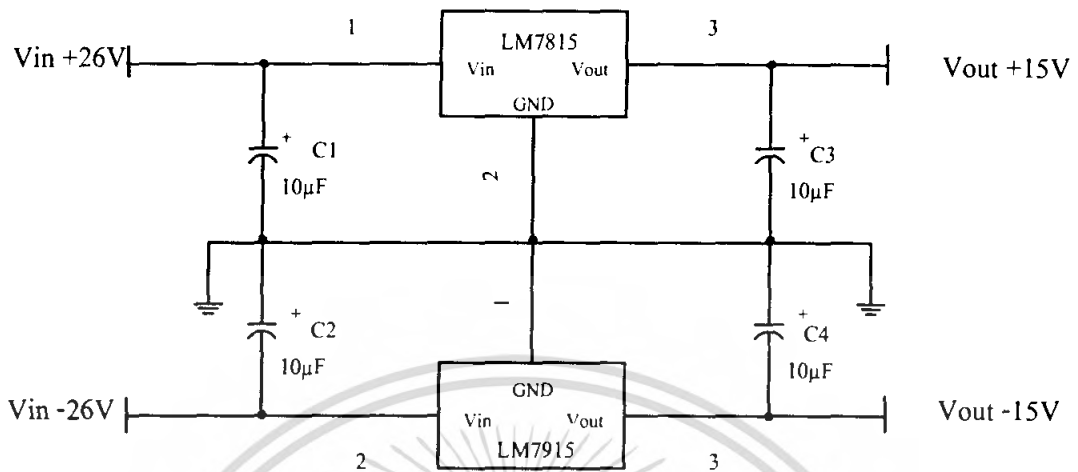
รูปที่ 3.14 วงจรปรับปรุ้งแรงดัน +24 โวลต์

เนื่องจากวงจร โซลีนอยด์ต้องการกระแส 1.5 แอมแปร์ ดังนั้นจึงใช้ LM317 เพียงตัวเดียวก็เพียงพอ แต่วงจร โซลีนอยด์มี 2 ชุด จึงต้องมีวงจรปรับปรุ้งแรงดัน 24 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนโซลีนอยด์ 2 ชุด ด้วยเช่นกัน

3.7.3 วงจรปรับปรุ้งแรงดัน +/-15 โวลต์

เนื่องจากมีสัญญาณควบคุม 4 สัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิตอล จึงต้องมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยกัน 4 ชุด ซึ่งทั้ง 4 ชุดนั้น ต้องการกระแสรวมกันน้อยมาก อยู่ในระดับมิลลิแอมแปร์เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถนำแรงดันเอาท์พุทของวงจรปรับปรุ้งแรงดัน +/-26 โวลต์ ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.7.1 จ่ายเป็นแรงดันอินพุท Vin ของวงจรจ่ายแรงดันคงที่ เบอร์ LM7815 และ LM7915 เพราะวงจรจ่ายแรงดันคงที่ เบอร์ LM7815 มีแรงดันเอาท์พุทเป็น 15 โวลต์ คงที่ และ เบอร์ LM7915 มีแรงดันเอาท์พุทเป็น -15 โวลต์ คงที่ และ

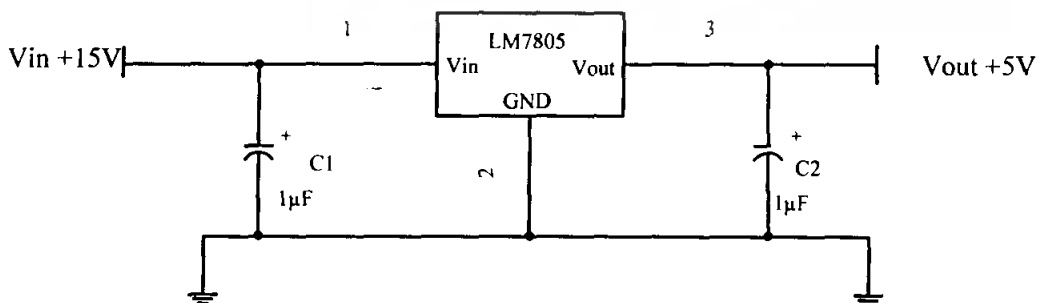
ทั้งสองเบอร์นี้สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 1 แอมแปร์ ดังนั้นจึงสามารถใช้วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-15 โวลต์ เพียง 1 ชุดได้ โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-15 โวลต์

3.7.4 วงจรปรับปรุงแรงดัน +5 โวลต์

เนื่องจากอุปกรณ์วัด ไมโครคอนโทรลเลอร์ และแรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ต้องการแรงดัน +5 โวลต์ โดยการใช้งานดังกล่าวจะใช้กระแสรวมกันแล้วไม่มาก ซึ่งอยู่ในระดับมิลลิแอมแปร์เท่านั้น ดังนั้นจึงนำแรงดันเอาต์พุตของวงจรปรับปรุงแรงดัน +15 โวลต์ ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.7.3 ง่ายเป็นแรงดันอินพุต V_{in} ของวงจรจ่ายแรงดันคงที่ เบอร์ LM7805 เพราะวงจรจ่ายแรงดันคงที่เบอร์ LM7805 มีแรงดันเอาต์พุตเป็น 5 โวลต์ คงที่ ซึ่ง LM7805 นี้สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 1 แอมแปร์ ดังนั้นจึงสามารถใช้วงจรปรับปรุงแรงดัน +5 โวลต์ เพียง 1 ชุดได้ โดยวงจรมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรปรับปรุงแรงดัน +/-5 โวลต์

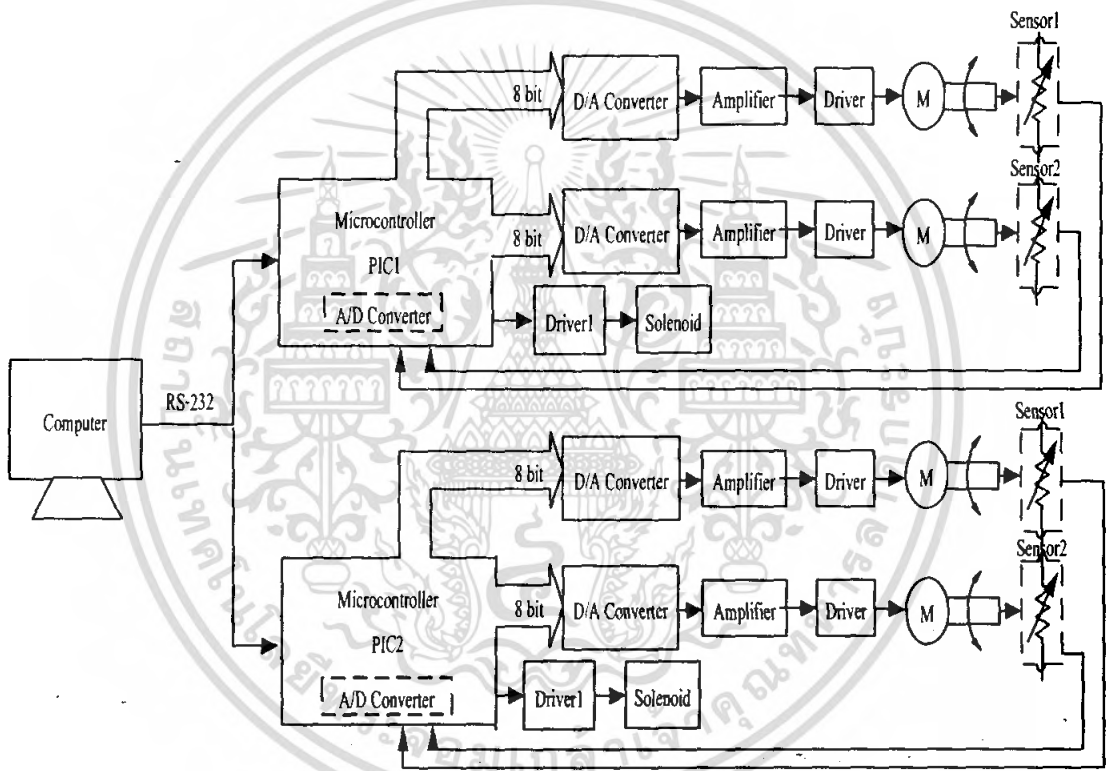
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบส่วนควบคุม

ส่วนนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในโรงงานนี้ พร้อมทั้งอธิบายการทำงานจากระบบ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุม

โครงสร้างระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมต้องเลือกอุปกรณ์ที่การทำงานมีประสิทธิภาพและความเร็วสูง แต่ควรอยู่ในขอบเขตงบประมาณของโรงงาน ซึ่งในปัจจุบันมีโรงงานมากมายที่ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกมาในรูปแบบของอุปกรณ์ไอซี ที่มีขนาดเล็กลง สามารถหาซื้อได้ง่าย และการใช้งานที่ง่ายขึ้น ในโรงงานนี้อาศัยแนวคิดโครงสร้างระบบควบคุมดังรูปที่ 3.17



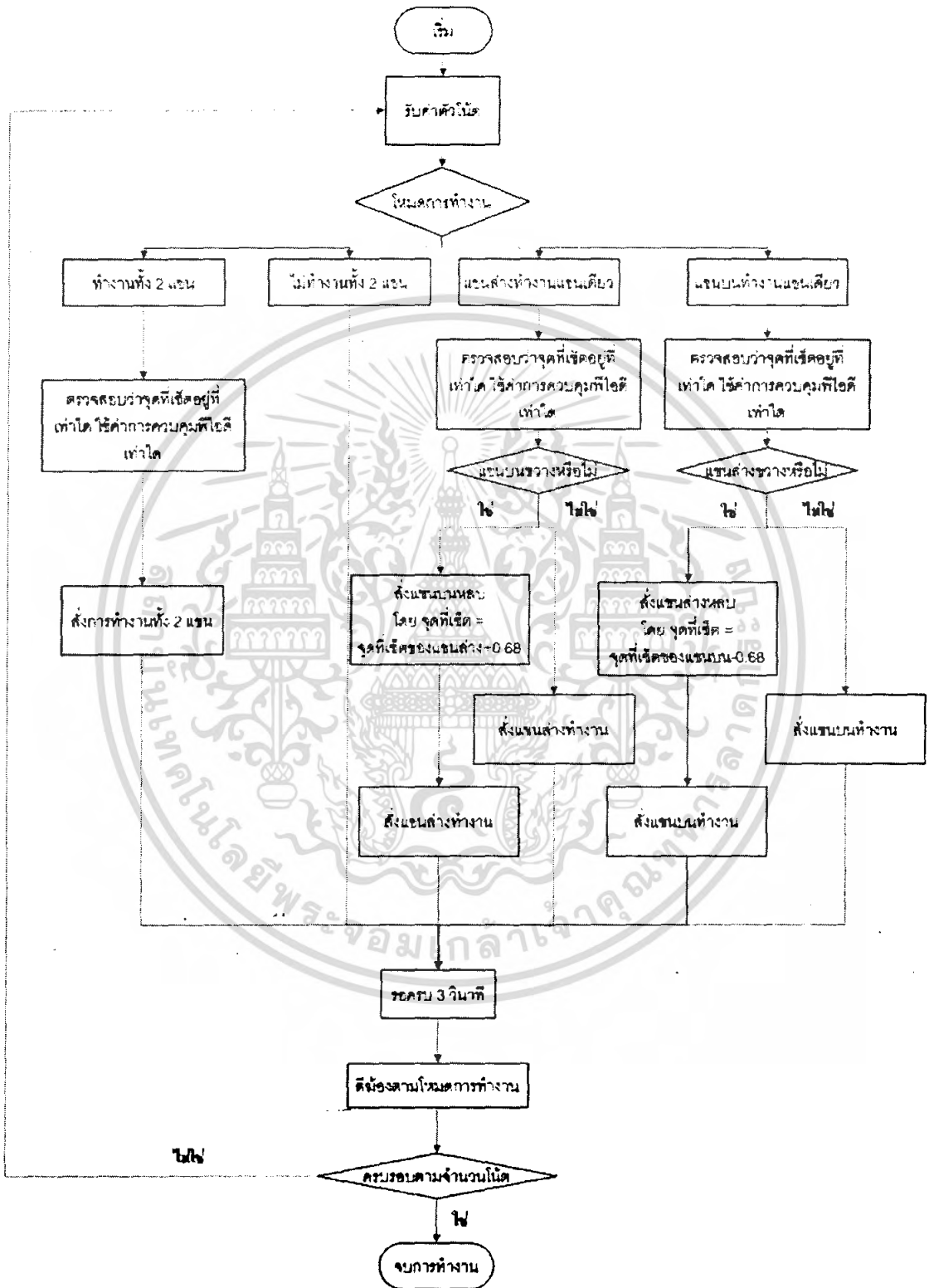
รูปที่ 3.17 โครงสร้างระบบควบคุมแบบกลตึ้น้องวงใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 หลักการทำงานของแขนกลตีหม้อวงใหญ่

จากรูปที่ 3.17 จะกล่าวถึงหลักการทำงานของส่วนต่างๆ ดังนี้

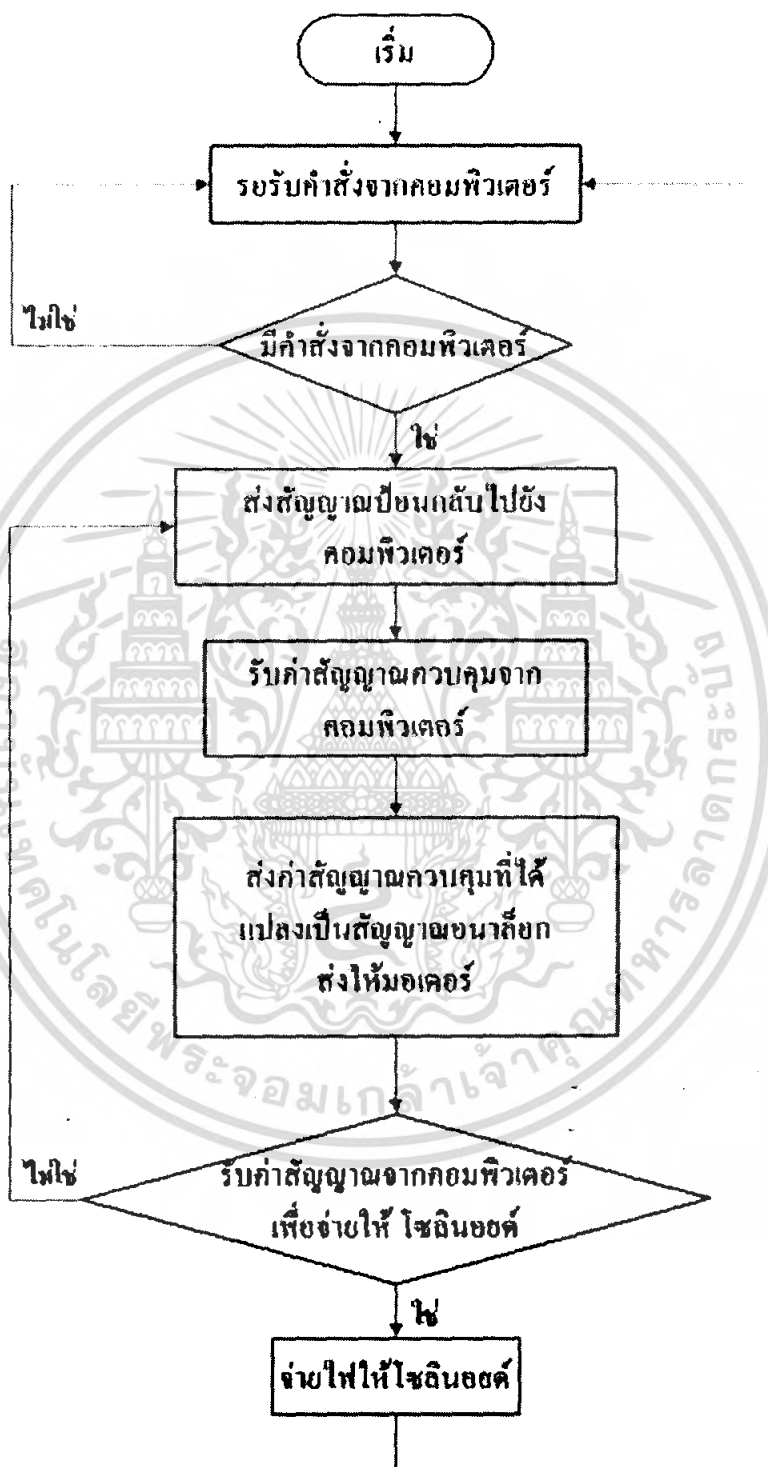
Computer : คอมพิวเตอร์ มีการทำงานตามขั้นตอนดังอธิบายในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนผังการทำงานของคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microcontroller PIC1 และ PIC2 : ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรายละเอียดและข้อมูลต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.10 ซึ่งมีการทำงานตามขั้นตอนดังอธิบายในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC1 และ PIC2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D/A Converter : วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต จะรับสัญญาณดิจิทัลจากพอร์ตเอาต์พุตขนาด 8 บิต ของไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกส่งให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งรายละเอียดของวงจรและผลการทดลองต่างๆของ D/A Converter จะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.12.2

Amplifier : วงจรขยายสัญญาณ จะรับสัญญาณอนาล็อกจากเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกมาขยายสัญญาณตามอัตราขยายของวงจร เพื่อจ่ายเป็นสัญญาณอินพุตให้กับ Driver

Driver : วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบและหลักการทํางานได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4

M : มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะรับแรงดันจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นส่วนในการเคลื่อนที่ของแขนกล รายละเอียดและข้อมูลต่างๆ ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3

Sensor1 : อุปกรณ์วัด จะวัดระยะการเคลื่อนที่ในส่วนการยืดและหดแขน ซึ่งจ่ายเอาต์พุตออกมาเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า รายละเอียดของอุปกรณ์และผลการทดลองต่างๆจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.12.1

Sensor2 : อุปกรณ์วัด จะวัดระยะทางของการหมุนแขน จ่ายเอาต์พุตออกมาเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รายละเอียดของอุปกรณ์และผลการทดลองต่างๆจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.12.2

Driver1 : วงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์ หลักการทํางานและรายละเอียดของวงจรได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5

Solenoid : โซลินอยด์ เป็นอุปกรณ์ในส่วนของไม้ฆ้อง รายละเอียดข้อมูลของโซลินอยด์และส่วนของไม้ฆ้องได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1.4 และ 3.2.3

3.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ไอซี ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อนสามารถรับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิทัลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิทัลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในชิพจะมีหน่วยประมวลผล หน่วยความจำและพอร์ต (Port) อยู่ในชิพเพียงตัวเดียวซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ชิพเดี่ยว ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU : Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาภายหลังเพื่อนำไปใช้ในวงจรทางด้านงานควบคุม คือ แทนที่ในการใช้งานจะต้องวางรายนอกต่างๆเพิ่มเติมเช่นเดียวกับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครโปรเซสเซอร์ ก็จะทำการรวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ ส่วนอินพุต/เอาต์พุต บางส่วนเข้าไปในตัวไอซีเดียวกัน และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปด้วยเพื่อให้มีความสามารถเหมาะสมกับการใช้งานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา วงจรการสื่อสารอนุกรม วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เป็นต้น สรุปคือ

$$\text{Microcontroller} = \text{Microprocessor} + \text{Memory} + \text{I/O}$$

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีการนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะเป็นการนำไปฝัง (Embedded) ในระบบของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานบางอย่าง อาทิ ในรถยนต์ เตอบไมโครเวฟ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้าอัตโนมัติ นาฬิกาดิจิทัล เป็นต้น เพราะว่าไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีเหมาะสมต่อการใช้งานควบคุมหลายประการ

- ชิพไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็ก
- ระบบที่ได้มีราคาถูกกว่าการใช้ชิพไมโครโปรเซสเซอร์
- วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
- มีคุณสมบัติเพิ่มเติมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะ ซึ่งใช้งานได้ง่าย
- ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันทำให้เลือกใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม

ในโครงการนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC (Peripheral Interface Controller) เบอร์ PIC16F877 เพราะมีคุณสมบัติที่ต้องการในโครงการนี้ และง่ายต่อการโปรแกรมควบคุม

คุณสมบัติทั่วไปของ PIC16F877

- 35 Instruction คำสั่ง
- ปฏิบัติคำสั่งทั่วไปใน Cycle เดียว และ 2 Cycle ในคำสั่งการกระโดด
- ทำงานที่ความถี่สูงสุด 20 MHz (16F877-20/P)
- หน่วยความจำโปรแกรม 8 กิโลเวิร์ด (โดยข้อมูล 1 เวิร์ด มี 14 บิต)
- หน่วยความจำข้อมูล (RAM) 368 ไบต์
- EEPROM 256 ไบต์
- สามารถตอบสนองอินเทอร์รัพท์ 14 แหล่ง
- STACK 8 ระดับ
- สามารถเลือกโหมดของสัญญาณนาฬิกาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

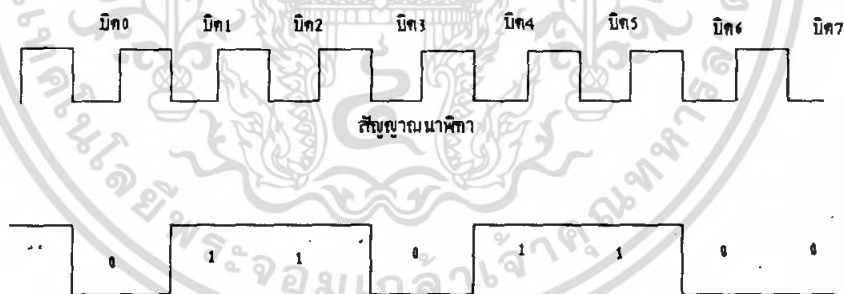
- กระแสทั้งซิงก์ และซอร์สของพอร์ต คือ 25 mA
- Timer/Counter 3 ตัว Timer0 Timer1 และ Timer2
- โมดูล Capture/Compare/PWM จำนวน 2 ชุด
- วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ขนาด 10 บิต 8 ช่องรับสัญญาณ
- พอร์ต I/O จำนวน 5 พอร์ต คือ พอร์ต A B C D และ E รวมทั้งสิ้น 33 บิต

3.10 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านพอร์ตอนุกรม

การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือการสื่อสารแบบซิงโครนัส และการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

3.10.1 การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วยการติดต่อกันแบบนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ สัญญาณนาฬิกา ข้อมูล และ กราวด์ ข้อดีของการสื่อสารแบบนี้ คือสามารถควบคุมให้เครื่องส่งและเครื่องรับทำงานได้พร้อมกันอย่างถูกต้อง ซึ่งทางเครื่องรับสามารถแปลรหัสข่าวสารได้ถูกต้องตรงตามข้อมูลที่ส่งจากเครื่องส่ง การส่งสัญญาณแบบนี้มีใช้ทั่วไปในเครื่องรับและส่งที่มีความเร็วสูง แสดงดังรูปที่ 3.20

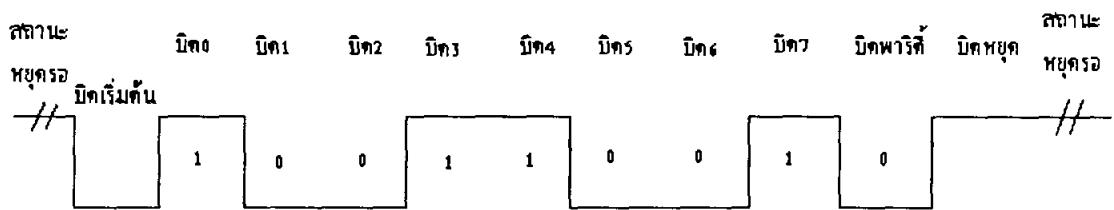


รูปที่ 3.20 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส

3.10.2 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือการรับส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา ร่วม แต่จะใช้การกำหนดของสัญญาณนาฬิกาทั้งในการรับและการส่งข้อมูล ให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณนาฬิกา นี้ว่า อัตราการถ่ายข้อมูล หรือ บอดเรต (Baud Rate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bit per second : bps) แสดงดังรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

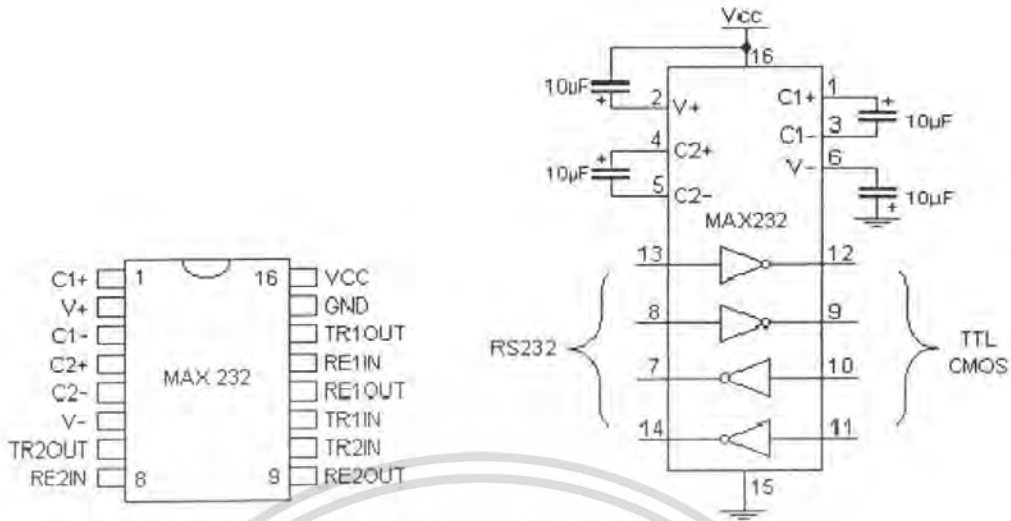


รูปที่ 3.21 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS232 ในโครงงานนี้จะต้องติดต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยผ่านพอร์ตอนุกรม ในที่นี้จึงขอกล่าวถึงการสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส ซึ่งเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดยได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment : DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating : DCE) ไว้ว่า อุปกรณ์ DTE ต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัว ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น

ขาสัญญาณเอาต์พุตของพอร์ตอนุกรม ได้แก่ ขา DTR RTS และ TxD โดยรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมขาเหล่านี้คือรีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม (MCR) โดยมีแอดเดรสอยู่ถัดจากรีจิสเตอร์หลักของพอร์ตอนุกรม 4 ตำแหน่ง รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของขา DTR อยู่ที่ตำแหน่งบิต 0 ขา RTS อยู่ที่ตำแหน่งบิต 1 และขา TxD เป็นขาปกติในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงมีแอดเดรสอยู่ที่แอดเดสรีจิสเตอร์หลัก

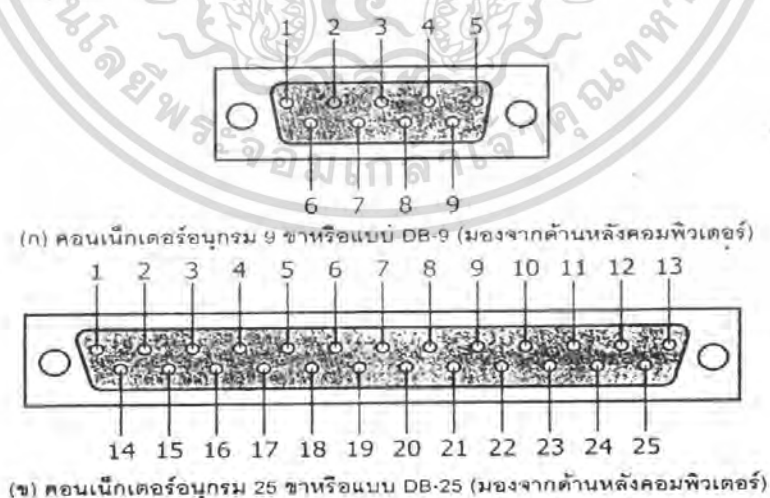
ระดับแรงดันที่ใช้งานสำหรับพอร์ตอนุกรม RS232 ได้ระบุช่วงระดับแรงดัน สำหรับการ ทำงานของพอร์ตอนุกรมไว้ว่า ที่ลอจิก “0” จะมีระดับสัญญาณ +3 โวลต์ ถึง +15 โวลต์ ส่วน ลอจิก “1” จะมีระดับสัญญาณ -3 โวลต์ ถึง -15 โวลต์ ระดับสัญญาณนี้ไม่สามารถที่จะนำไปต่อ เข้ากับลอจิกเกตใช้งานได้โดยตรง จะต้องผ่านวงจรเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันเสียก่อน โดยปกติจะใช้ ไอซีจำพวก RS232 ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันของ RS232 ให้อยู่ในระดับที่ที่แอล โดย ลอจิก “0” ซึ่งเดิมมีระดับสัญญาณ +3 โวลต์ ถึง +15 โวลต์ จะถูกแปลงเป็น 0 โวลต์ ส่วนลอจิก “1” ซึ่งมีระดับสัญญาณ -3 โวลต์ ถึง -15 โวลต์ จะเปลี่ยนเป็น +5 โวลต์ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดิจิทัลอื่นที่ใช้ระดับแรงดันที่ที่แอลได้จึงจำเป็นต้องใช้ IC MAX232 ดัง แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ไอซี MAX232

3.10.3 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้ หรือ DB-9 ตัวผู้ ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้น เช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆ ที่เคยใช้งานในอดีต ปัจจุบันมีการใช้งานไม่มากนัก จึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาในรูปที่ 3.23 และรายละเอียดผังตารางที่ 3.7



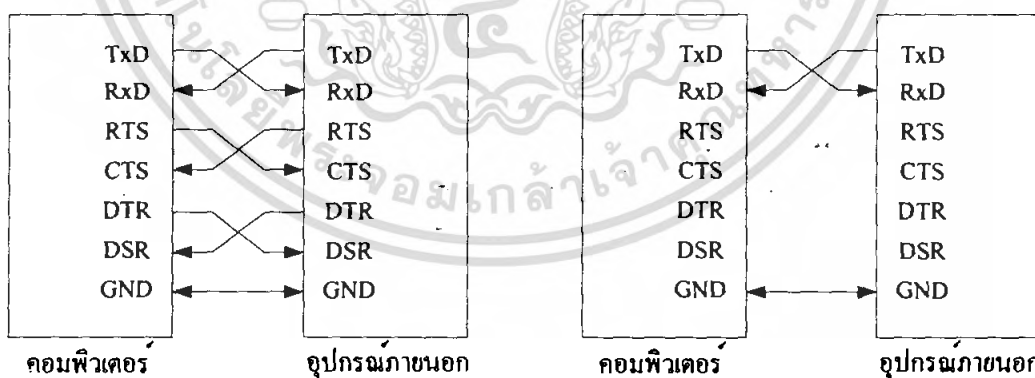
รูปที่ 3.23 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS232 แบบDB-9 และ DB-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตำแหน่งขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS232 แบบ DB-9 และ DB-25

คอนเน็กเตอร์ DB-9	คอนเน็กเตอร์ DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	ชนิดของสายสัญญาณ
1	8	Data Carrier Detect : DCD	อินพุต
2	3	Received Data : RxD	อินพุต
3	2	Transmitted Data : TxD	เอาต์พุต
4	20	Data Terminal Ready : DTR	เอาต์พุต
5	7	Signal Ground : GND	-
6	6	Data Set Ready : DSR	อินพุต
7	4	Request To Send : RTS	เอาต์พุต
8	5	Clear To Send : CTS	อินพุต
9	22	Ring Indicator : RI	อินพุต

สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังรูปที่ 3.24 ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางของข้อมูล ในรูปที่ 3.24(ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem หรือการเชื่อมต่อโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านโมเด็ม โดยมีการตรวจสอบหรือแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบ ส่วนในรูปที่ 3.24(ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ RS232 ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น โดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นหนึ่งสำหรับรับข้อมูล และเส้นสุดท้ายเป็นกราวด์



(ก) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ Null modem

(ข) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ RS232 โดยใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น

รูปที่ 3.24 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์

3.10.4 หน้าที่การทำงานแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS232

จากตารางที่ 3.8 ตำแหน่งขาของคอนเน็คเตอร์พอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25 ในแต่ละขานั้น มีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกัน โดยการทำงานในแต่ละขาสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขานี้จะแอกทีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาห์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก
- Received Data : RD หรือ RxD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลทีอ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์
- Transmitted Data : TD หรือ TxD ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล
- Data Terminal Ready : DTR เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่า ต้องการติดต่อด้วย โดยขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ ถ้าใช้การเชื่อมต่อแบบ Null Modem ซึ่งใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 เส้น จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน และต้องต่อกับขา DCD ด้วย ในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์
- Signal Ground : GND ขากราวด์ของระบบ
- Data Set Ready : DSR ขานี้จะใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรับข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR
- Request To Send : RTS เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RST ก็คือ ขา CTS ในกรณีที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ Null modem 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อกับขา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา
- Clear To Send : CTS ขานี้จะคอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับสัญญาณได้ข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้นขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือไม่
- Ring Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับ โมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 วงจรแปลงสัญญาณ

ในการออกแบบระบบควบคุมได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมแขนกล ซึ่งรับสัญญาณป้อนกลับเป็นสัญญาณอนาล็อก และส่งสัญญาณควบคุมเป็นดิจิทัล จึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณด้วยกันสองส่วนคือวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

3.11.1 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

จากสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณอนาล็อก โดยระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อนกลับอยู่ในช่วง 0 โวลต์ ถึง +5 โวลต์ จึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลได้ ซึ่งโครงงานนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ที่ได้ผนวกโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลไว้ด้วยภายใน มีความละเอียด 10 บิต 8 ช่องรับสัญญาณ ในการนำไปใช้งานจริงได้ใช้แรงดันอ้างอิงเท่ากับ 5 โวลต์ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งคิดเป็นค่าความละเอียดของแรงดันได้เท่ากับ $5/1023$ หรือประมาณ 0.004888 โวลต์

ในที่นี้ได้ทำการทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับ ดังมีผลการทดลองในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ผลการทดลองอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับของไมโครคอนโทรลเลอร์

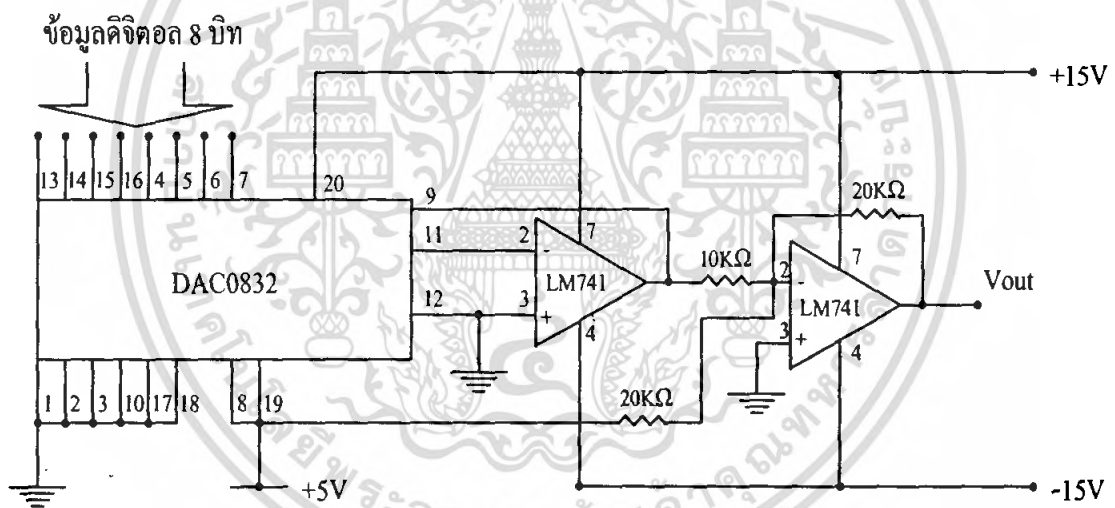
สัญญาณป้อนกลับ (V)	ค่าที่อ่านได้ของไมโครคอนโทรลเลอร์ (เลขฐานสิบ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าความแตกต่าง
5	1023	1022	1021	1023	2
4.5	920	921	920	919	2
4	818	816	819	817	3
3.5	716	715	716	717	2
3	613	611	610	613	3
2.5	511	510	509	511	2
2	409	407	408	409	2
1.5	306	306	305	306	2
1	204	203	204	204	1
0.5	102	101	100	102	2
0	0	1	0	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดสูงสุดได้เท่ากับ $\frac{5}{1023} \times 3 = 0.014663$ โวลต์ ซึ่งยังเป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ เมื่อเทียบกับขนาดของลูกน้ำ

3.11.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) ดังรูปที่ 3.17 ต้องเป็นสัญญาณอนาล็อก แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายสัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณดิจิทัลจึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์ไอซีเบอร์ DAC0832 เป็นตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต เพื่อให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ (ระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง -5 โวลต์ ถึง $+5$ โวลต์) ภายในวงจรต้องเพิ่มออปแอมป์ ซึ่งเลือกใช้เบอร์ LM741 และตัวต้านทาน (ชนิดค่าความผิดพลาด 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อความแม่นยำของแรงดันเอาต์พุต V_{out}) ต่อกันเป็นวงจร ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{out} สามารถคำนวณ ดังสมการนี้

$$V_{out} = 5 \times \frac{\text{Digital} - 128}{128}$$

โดย Digital คือ ค่าข้อมูลดิจิทัล ขนาด 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ได้ทำการทดลองวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ใ้รับค่าข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วทำการวัดแรงดันเอาต์พุต V_{out} ซึ่งได้ผลการทดลองดังในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลการทดลองแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

ข้อมูลดิจิทัล (เลขฐานสิบ)	การทดลอง V_{out} (V)	การคำนวณ V_{out} (V)	ค่าความแตกต่าง
0	-5.076	-5.07	0.006
15	-4.482	-4.476	0.006
30	-3.887	-3.882	0.005
45	-3.294	-3.288	0.006
60	-2.74	-2.693	0.047
75	-2.103	-2.1	0.003
90	-1.51	-1.505	0.005
105	-0.915	-0.911	0.004
120	-0.319	-0.317	0.002
135	0.278	0.277	0.001
150	0.873	0.871	0.002
165	1.468	1.461	0.007
180	2.063	2.06	0.003
195	2.657	2.654	0.003
210	3.252	3.248	0.004
225	3.847	3.842	0.005
240	4.442	4.436	0.006
255	5.036	5.03	0.006

จากตารางที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{out} ที่ได้จากการทดลองนั้น มีค่าความผิดพลาดน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถนำไปจ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณได้เลย

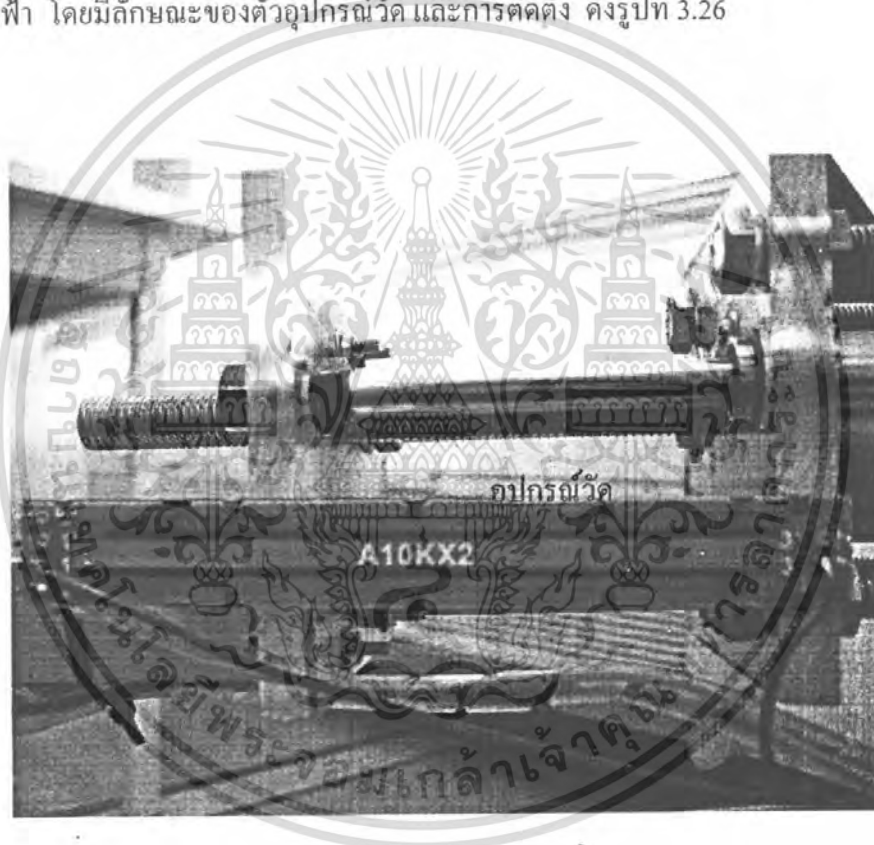
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 อุปกรณ์วัด

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณป้อนกลับ ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดด้วยกันสองส่วน คืออุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ในส่วนการยืดและหดแขน และ อุปกรณ์วัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนหมุนแขน

3.12.1 อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ในส่วนการยืดและหดแขน

ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนขนาด 10 กิโลโอห์ม เป็นอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการวัดสัญญาณป้อนกลับ ที่เป็นระยะการเคลื่อนที่ในส่วนการยืดและหดแขน ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า โดยมีลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดและการติดตั้ง ดังรูปที่ 3.26

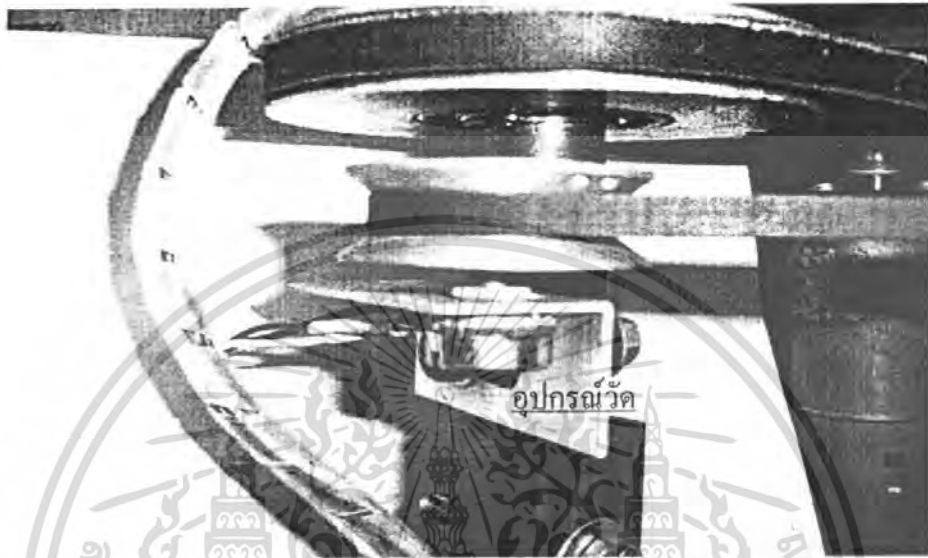


รูปที่ 3.26 ลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดและการติดตั้ง ในส่วนการยืดและหดแขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12.2 อุปกรณ์วัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขน

ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบหมุนขนาด 10 กิโลโอห์ม เป็นอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการวัดสัญญาณป้อนกลับ ที่เป็นมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขน ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า โดยมีลักษณะของตัวอุปกรณ์วัด และการติดตั้ง ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดและการติดตั้ง ในส่วนการหมุนแขน

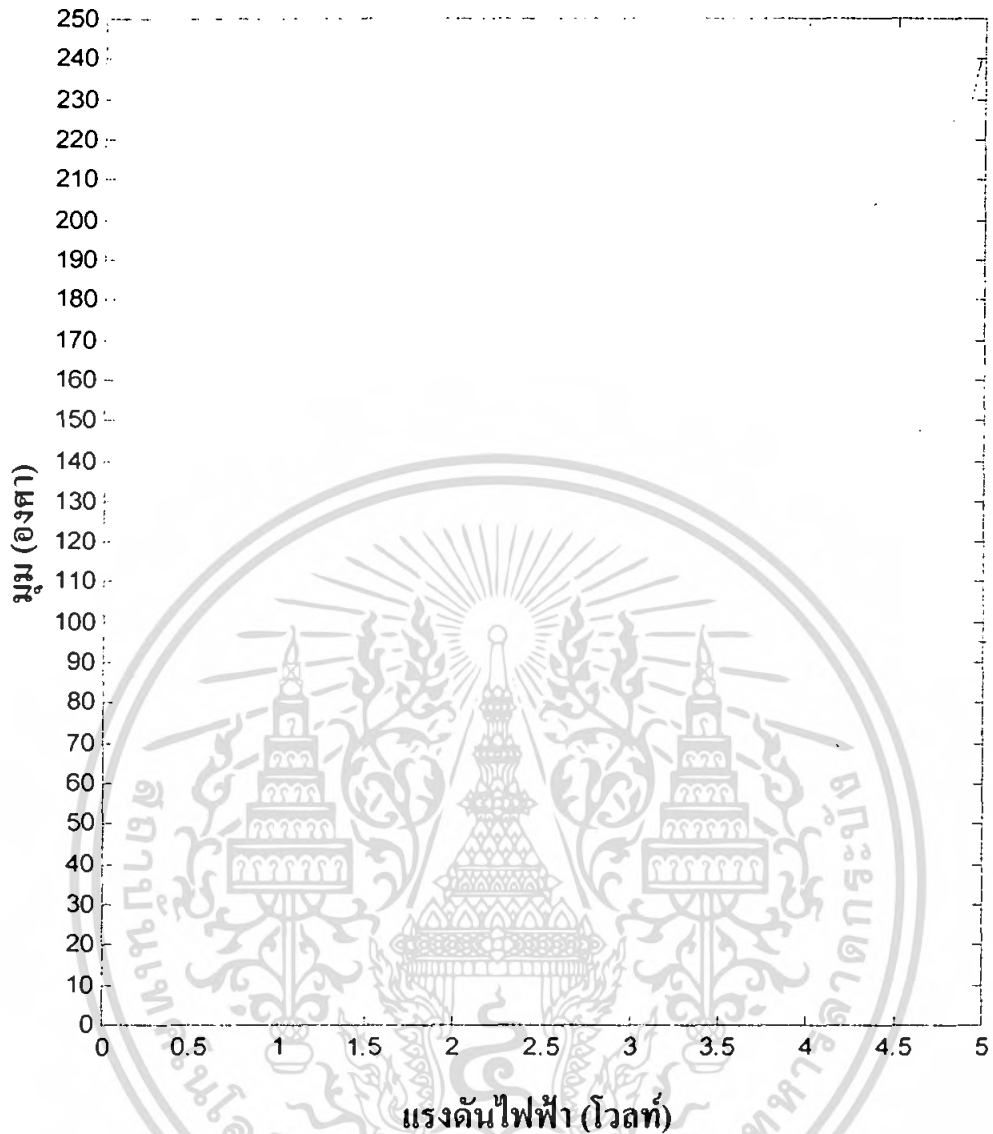
ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า (เอาต์พุตของอุปกรณ์วัด) กับมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขน เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่ามุมการเคลื่อนที่ได้จากค่าวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมระบบ โดยเฉพาะการนำค่ามุมนี้มาใช้ในการเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของแขนทั้งสองว่าอยู่ที่ใด เพราะเมื่อจะทำการควบคุมแขนใดแขนหนึ่งให้ไปยังตำแหน่งมุมที่ต้องการนั้นต้องตรวจสอบดูก่อนว่าตำแหน่งมุมที่จะเคลื่อนที่ไปนั้น มีแขนอีกแขนหนึ่งขวางการเคลื่อนที่ของแขนที่ต้องการควบคุมไปยังมุมที่ต้องการนั้นหรือไม่ ถ้ามีการกีดขวางก็จะควบคุมให้แขนที่ต้องการเคลื่อนที่นั้นหมุนหลบไปก่อน แล้วจึงค่อยสั่งให้แขนที่ต้องการควบคุมเคลื่อน ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

เมื่อทำการทดลองหาความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.10 สำหรับแขนล่าง และตารางที่ 3.11 สำหรับแขนบน โดยได้นำค่าเฉลี่ยที่ได้จากตาราง มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่ามุมกับค่าแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 3.10 ผลการทดลองวัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขนล่าง

มุมการเคลื่อนที่ (องศา)	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 1	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 2	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 3	ค่าระดับแรงดัน เฉลี่ย (V)
0	0.099	0.100	0.101	0.100
10	0.318	0.318	0.315	0.317
20	0.526	0.525	0.522	0.524
30	0.741	0.737	0.739	0.739
40	0.972	0.970	0.972	0.971
50	1.192	1.191	1.195	1.193
60	1.400	1.406	1.406	1.404
70	1.610	1.609	1.611	1.610
80	1.835	1.835	1.835	1.835
90	2.049	2.049	2.047	2.048
100	2.211	2.213	2.210	2.211
110	2.432	2.433	2.431	2.432
120	2.648	2.643	2.647	2.646
130	2.824	2.820	2.822	2.822
140	3.039	3.042	3.040	3.040
150	3.228	3.229	3.230	3.229
160	3.452	3.448	3.450	3.450
170	3.635	3.634	3.636	3.635
180	3.859	3.860	3.863	3.861
190	4.075	4.070	4.071	4.072
200	4.284	4.285	4.280	4.283
210	4.517	4.518	4.516	4.517
220	4.715	4.720	4.723	4.719
230	4.915	4.915	4.915	4.915
240	4.975	4.973	4.974	4.974

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับมุมการเคลื่อนที่

จากกราฟทำให้สามารถนำมาคำนวณหาสมการเส้นตรงที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับ องศา ณ ตำแหน่งของแรงดันนั้นเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าในคอมพิวเตอร์เพื่อการป้อนกลับตำแหน่งเชิงมุมของเซนล่างได้ค่าความสัมพันธ์ คือ

$$Y = 0.020943X + 0.1$$

โดย Y คือมุมการเคลื่อนที่(องศา)

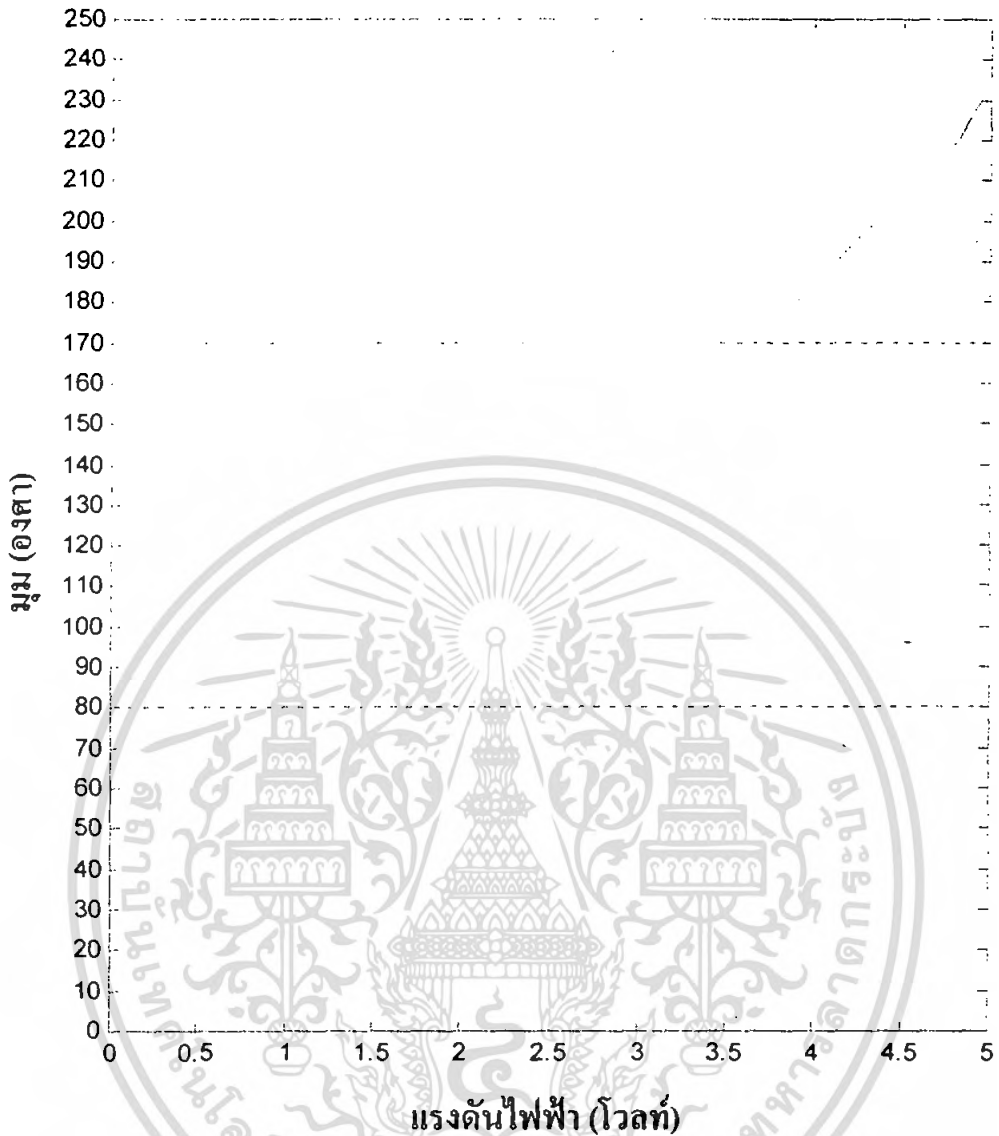
X คือแรงดันไฟฟ้า (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ผลการทดลองวัดมุมการเคลื่อนที่ในส่วนการหมุนแขนบน

มุมการเคลื่อนที่ (องศา)	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 1	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 2	ค่าระดับแรงดัน (V) ครั้งที่ 3	ค่าระดับแรงดัน เฉลี่ย (V)
0	0.102	0.103	0.106	0.104
10	0.302	0.302	0.302	0.302
20	0.526	0.526	0.529	0.527
30	0.749	0.751	0.750	0.750
40	0.995	0.990	0.987	0.991
50	1.209	1.208	1.210	1.209
60	1.432	1.433	1.430	1.432
70	1.656	1.656	1.658	1.658
80	1.862	1.862	1.862	1.862
90	2.068	2.066	2.067	2.067
100	2.265	2.264	2.266	2.265
110	2.470	2.470	2.266	2.469
120	2.656	2.657	2.659	2.657
130	2.844	2.848	2.852	2.848
140	3.039	3.039	3.039	3.039
150	3.224	3.225	3.226	3.255
160	3.458	3.456	3.460	3.458
170	3.660	3.660	3.660	3.660
180	3.906	3.907	3.908	3.907
190	4.128	4.128	4.128	4.128
200	4.335	4.339	4.337	4.337
210	4.592	4.593	4.591	4.592
220	4.816	4.816	4.819	4.817
230	4.945	4.945	4.945	4.945

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับมุมการเคลื่อนที่

จากกราฟพบว่ามีความชันกราฟ 3 ช่วงทำให้สามารถนำมาคำนวณหาสมการเส้นตรงที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับ องศา ณ ตำแหน่งของแรงดันนั้นเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าในคอมพิวเตอร์เพื่อการย้อนกลับตำแหน่งเชิงมุมของแขนล่างได้ค่าความสัมพันธ์ 3 สมการคือ

ช่วงมุมระหว่าง 0 – 80 องศาคือ $Y = 0.02312X + 0.104$

ช่วงมุมระหว่าง 81 – 170 องศาคือ $Y = 0.01998X + 0.250$

ช่วงมุมระหว่าง 171 – 230 องศาคือ $Y = 0.02256X + 0.120$

โดย Y คือมุมการเคลื่อนที่(องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการทำงานของแขนกลคีม้องวงใหญ่ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งเป้าหมาย เพื่อดูการทำงานของแขนว่า เมื่อใช้ตัวควบคุมในแบบต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะอาศัยการควบคุมแบบพี แบบพีไอ และแบบพีไอดีเป็นหลัก ทั้งในส่วนหมุนแขนและส่วนยึดและหคแขน ในการควบคุมให้แขนเคลื่อนที่ไปจุดที่ต้องการ เพื่อศึกษาผลการควบคุมว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนเท่าไร ใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงที่นานเท่าไร เพื่อนำมาใช้เป็นเหตุผลอ้างอิงว่าควรเลือกตัวควบคุมแบบใดในการควบคุมแขน

โดยการทดลองแยกเป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งแบบวงปิดในส่วนยึดและหคแขน และส่วนหมุนแขน ด้วยตัวควบคุมในแบบต่างๆ เพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสม จากนั้นจะเป็นการทดลองเพื่อหาเวลาใน 1 จังหวะที่แขนกลสามารถทำงานได้ โดยใช้เวลาน้อยที่สุด เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรมให้สามารถเล่นเพลงได้อย่างต่อเนื่องและมีจังหวะสม่ำเสมอทุกตัวโน้ต ซึ่งในการทดลองทั้งหมดนี้ได้ใช้คาบเวลาการสุ่มสัญญาณ (Sampling Time) เท่ากับ 60 มิลลิวินาที โดยแต่ละส่วนในการทดลองมีรายละเอียดต่อไปนี้

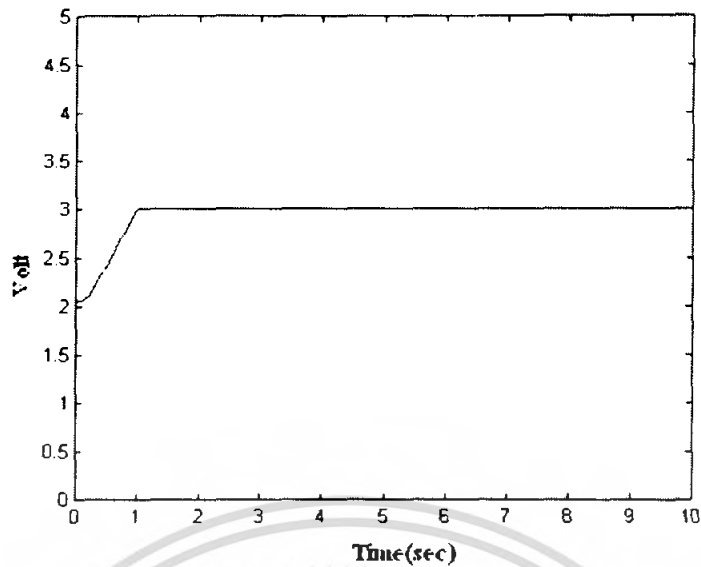
4.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและหคแขนแบบวงปิด

การทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของแขนกลคีม้องวงใหญ่ในส่วนยึดและหคแขน โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูกในการปรับอัตราขยายที่แตกต่างกันของตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมแขนกลคีม้องวงใหญ่ ซึ่งได้เลือกใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ดังนี้

- ตัวควบคุมแบบพี
- ตัวควบคุมแบบพีไอ
- ตัวควบคุมแบบพีไอดี

4.1.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและหคแขนด้วยตัวควบคุมแบบพี

ในการทดลองนี้ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบพี โดยมีอัตราขยาย $K_p = 20$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2.0 โวลต์ ไปยัง ตำแหน่ง 3.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

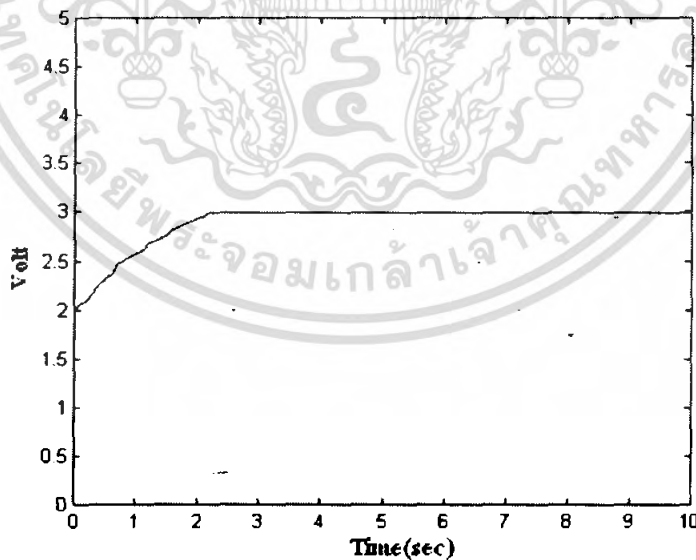


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของระบบในส่วนของชดเชยและหัดแชนด้วยตัวควบคุมแบบพี

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบในรูปได้ขึ้นได้เร็ว และ ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้น

4.1.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนของชดเชยและหัดแชนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

ในการทดลองนี้ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยมีอัตราขยาย $K_p = 3$ และ $K_i = 1.75$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2.0 โวลต์ ไปยัง ตำแหน่ง 3.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



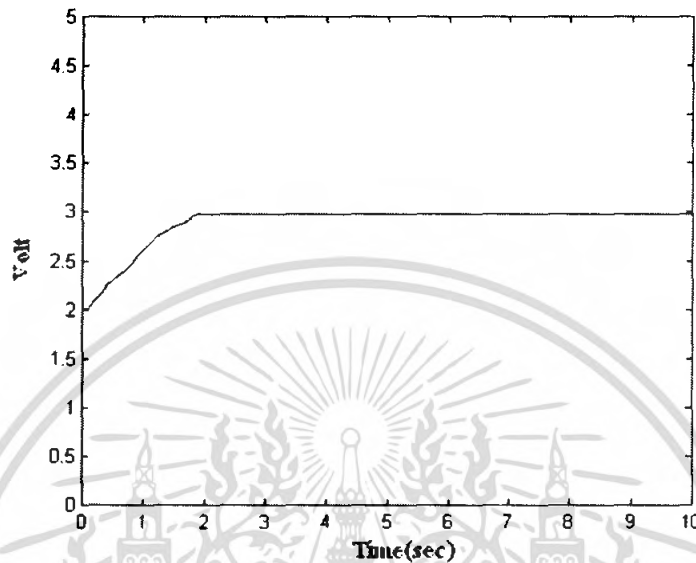
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของระบบในส่วนของชดเชยและหัดแชนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

จากรูปที่ 4.2 เป็น จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบในรูปจะค่อยๆ ได้เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ แต่ใช้เวลานานกว่าตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและหัดแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

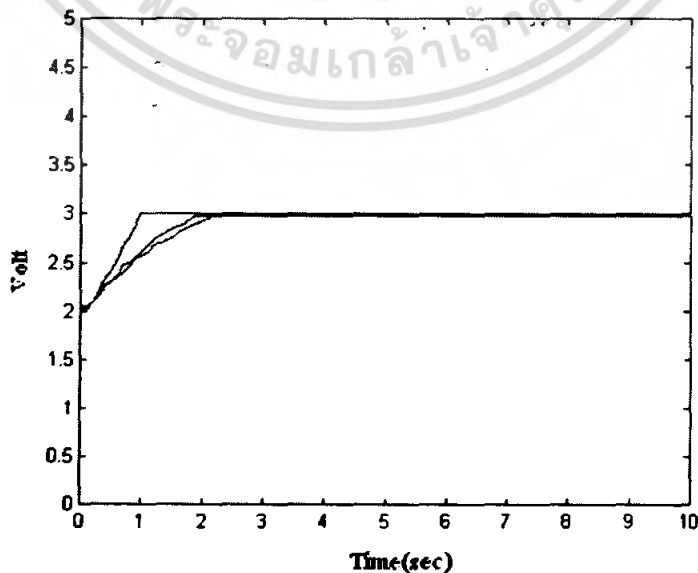
ในการทดลองนี้ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยมีอัตราขยาย $K_p = 3$ $K_i = 1$ และ $K_d = 1$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 2.0 โวลต์ ไปยัง ตำแหน่ง 3.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.3 เป็น จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบในรูปได้ขึ้นได้ขึ้นเร็ว แต่จะช้ากว่าตัวควบคุมแบบพีไคเล็กน้อย

เมื่อนำผลการทดลองทั้งสามมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบในส่วนยึดและหัดแขนด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารนี้มีความจำเป็นต่อการใช้งานของตนเอง กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนยึดและทดแขนแบบวงปิด

จากผลการทดลองโดยการใช้ตัวควบคุมที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีเหมาะสมที่สุด คือ สามารถควบคุมในทุกๆตำแหน่งเป้าหมายได้ โดยผลตอบสนองของระบบมีเวลาในการไต่ขึ้นเร็ว ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อย มีค่าความผิดพลาดสุดท้ายที่ยอมรับได้ และไม่มีการฟุ้งเกินเกิดขึ้น

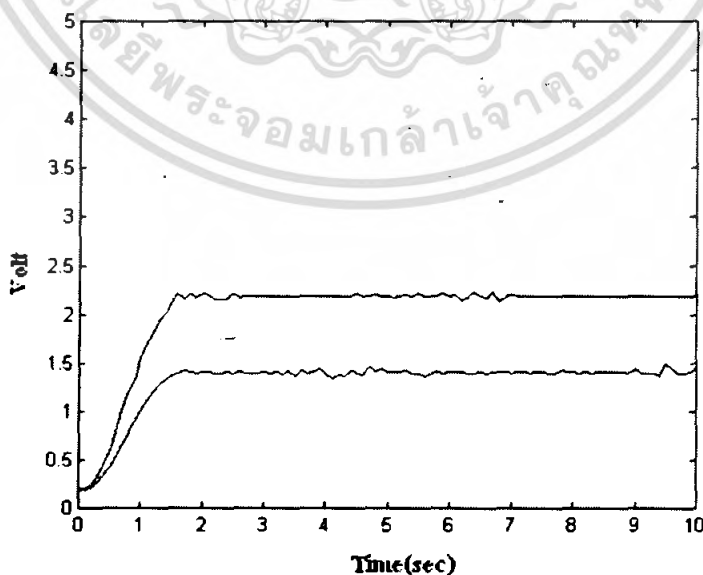
4.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนแบบวงปิด

การทดลองนี้เป็นการทดสอบ เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของแขนกลตีฆ้องวงใหญ่ในส่วนหมุนแขน โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูกในการปรับอัตราขยายที่แตกต่างกันของตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการควบคุมแขนกลตีฆ้องวงใหญ่ ซึ่งได้เลือกใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ดังนี้

- ตัวควบคุมแบบพี
- ตัวควบคุมแบบพีไอ
- ตัวควบคุมแบบพีไอดี

4.2.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพี

ในการทดลองนี้ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบพี โดยทำการทดลอง 2 ครั้ง โดยใช้อัตราขยายที่ $K_p = 0.85$ และ $K_p = 1.1$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0.2 โวลต์ ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 2.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



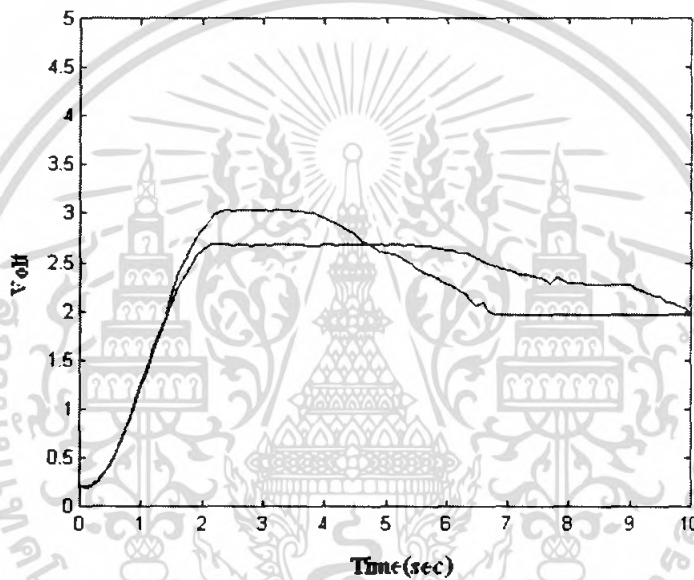
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพินั้นไม่สามารถควบคุมตำแหน่งของแขนให้เข้าจุดที่ต้องการได้ กล่าวคือถ้าให้ $K_p = 0.85$ ค่าอัตราขยายจะน้อยเกินไปไม่สามารถควบคุมตำแหน่งของแขนเข้าจุดที่ต้องการได้ ถ้าให้ $K_p = 1.1$ ค่าอัตราขยายจะมากเกินไปไม่สามารถควบคุมตำแหน่งของแขนเข้าจุดที่ต้องการได้

4.2.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

ในการทดลองนี้ ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการปรับอัตราขยายที่ $K_p = 0.8$ $K_i = 0.5$ และ $K_p = 1$ $K_i = 0.7$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0.2 โวลต์ ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 2.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

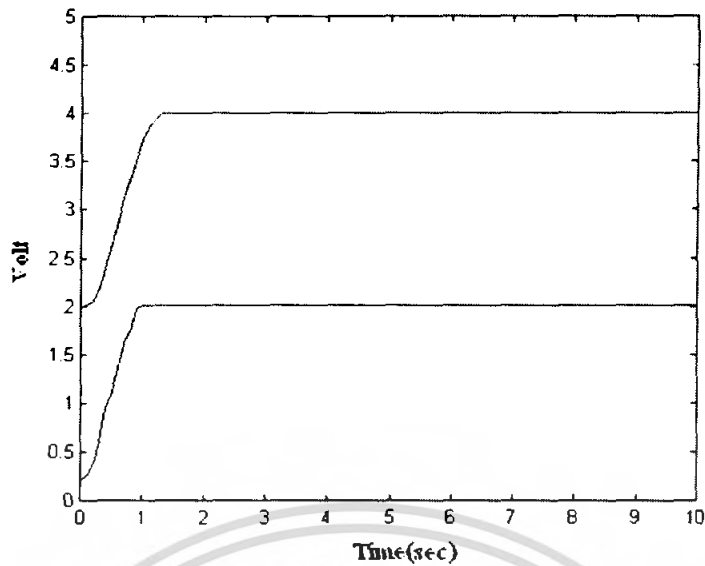


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอนั้นสามารถควบคุมตำแหน่งของแขนให้เข้าจุดที่ต้องการได้ โดยจะค่อยๆ ไล่เข้าหาจุดที่ต้องการแต่ใช้เวลาในการทำงานนาน

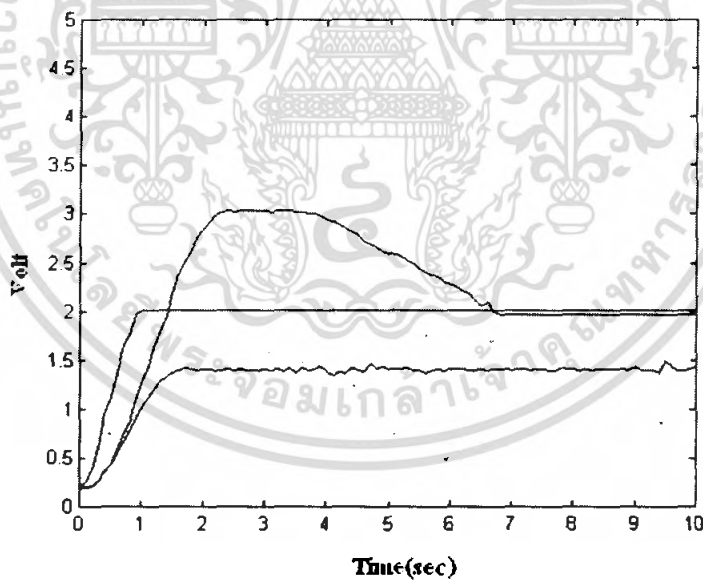
4.2.3 การทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองนี้ ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยการปรับอัตราขยายที่ $K_p = 1.45$ $K_i = 0.5$ $K_d = 0.9$ และ $K_p = 1.75$ $K_i = 0.75$ $K_d = 1$ ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0.2 โวลต์ ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ 2.0 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีนั้นสามารถควบคุมตำแหน่งของแขนให้เข้าสู่จุดที่ต้องการได้และสามารถเข้าสู่จุดที่ต้องการได้เร็ว เมื่อนำผลการทดลองทั้งสามมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบในส่วนหมุนแขนด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ

สรุปผลการทดลองควบคุมตำแหน่งในส่วนหมุนแขนแบบวงปิด

จากผลการทดลองโดยการใช้ตัวควบคุมที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเหมาะสมที่สุด คือ สามารถควบคุมในทุกๆตำแหน่งเป้าหมายได้ โดยผลตอบสนองของระบบมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการไต่ขึ้นเร็ว ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อย มีการพุ่งเกินที่ยอมรับได้ และไม่มีค่าความผิดพลาดสุดท้ายเกิดขึ้น

4.3 การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในการเล่นคนตานั้น จำเป็นต้องให้จังหวะในการเล่นที่คงที่และสม่ำเสมอในทุกช่วง โน้ต ดังนั้นในการควบคุมแขนกลนั้นต้องกำหนดจังหวะของการเคลื่อนที่ด้วย คือเมื่อแขนเคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ต้องการแล้วจะต้องรอให้ครบตามเวลาที่กำหนดก่อน แล้วจึงค่อยดีลู๊กฆ้อง ดังนั้นจึงต้องหาช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่แขนสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกๆตัวโน้ต โดยแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งลู๊กฆ้องต่างๆ ได้ทำการบันทึกไว้ในภาคผนวก ง.

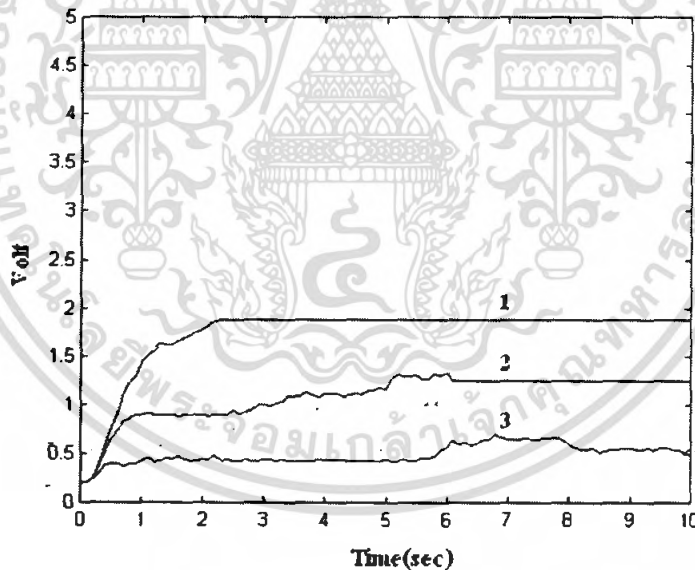
ผลการทดลองปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี

การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ $K_p = 1.75$ $K_i = 0.75$ และ $K_d = 1$

กรณีที่ 1 จากตำแหน่งฆ้องลูกที่ 1 (0.2 โวลต์) ไปยังลูกที่ 6 (1.90 โวลต์) และ

กรณีที่ 2 จากตำแหน่งฆ้องลูกที่ 1 (0.2 โวลต์) ไปยังลูกที่ 4 (1.22 โวลต์) และ

กรณีที่ 3 จากตำแหน่งฆ้องลูกที่ 1 (0.2 โวลต์) ไปยังลูกที่ 2 (0.54 โวลต์) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนโดยใช้อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีเดียวกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการตั้งอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี จาก ตำแหน่งฆ้องลูกที่ 1 (0.2 โวลต์) ไปยังลูกที่ 6 (1.90 โวลต์) นั้นไม่สามารถนำมาใช้เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ต่างกัน ได้ ดังนั้นจึงต้องปรับค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบพีไอดีทุกระยะการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนนั้นใช้เวลาที่ไม่เท่ากัน คือ เข้าสู่จุดที่ต้องการในเวลา 2.3 6.2 และ เกิน 10 วินาที เป็นเพราะไม่ทราบข้อมูลที่ถูกต้องของมอเตอร์ ทำให้ไม่สามารถหาสมการของระบบเพื่อนำมาหาอัตราขยายตัวควบคุมแบบ พีไอดี ได้อย่างถูกต้องรวมถึง แขนมีน้ำหนักมาก เวลาเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเฉื่อยจึงไม่สามารถหยุดแขนได้ในทันที และแรงเฉื่อยในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ก็ไม่เท่ากันด้วย จึงจำเป็นต้องเลือกอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี ในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ของแขนหมุนด้วย

ทดลองปรับอัตราขยายเพื่อให้แขนหมุนไปในระยะความห่างๆ ที่เท่ากันในตำแหน่งต่างๆ ของลูกช้อง เพื่อดูว่าในระยะการเคลื่อนที่ที่เท่ากันนั้นใช้อัตราขยายที่เท่ากันหรือไม่โดยปรับอัตราขยายดังนี้

การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ $K_p = 3.25$ $K_i = 1$ และ $K_d = 1.3$

กรณีที่ 1 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 2 (0.20 โวลต์) ไปยังลูกที่ 3 (0.62 โวลต์) และ

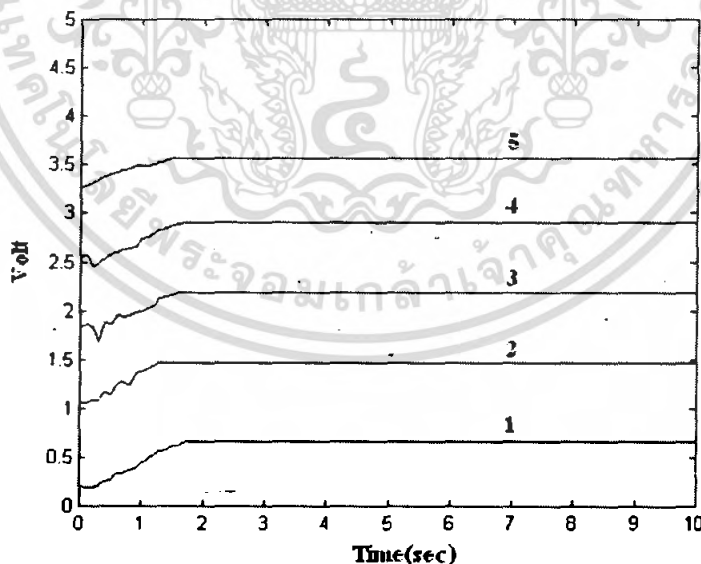
กรณีที่ 2 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 4 (1.05 โวลต์) ไปยังลูกที่ 5 (1.45 โวลต์) และ

กรณีที่ 3 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 6 (1.82 โวลต์) ไปยังลูกที่ 7 (2.19 โวลต์) และ

กรณีที่ 4 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 8 (2.54 โวลต์) ไปยังลูกที่ 9 (2.88 โวลต์) และ

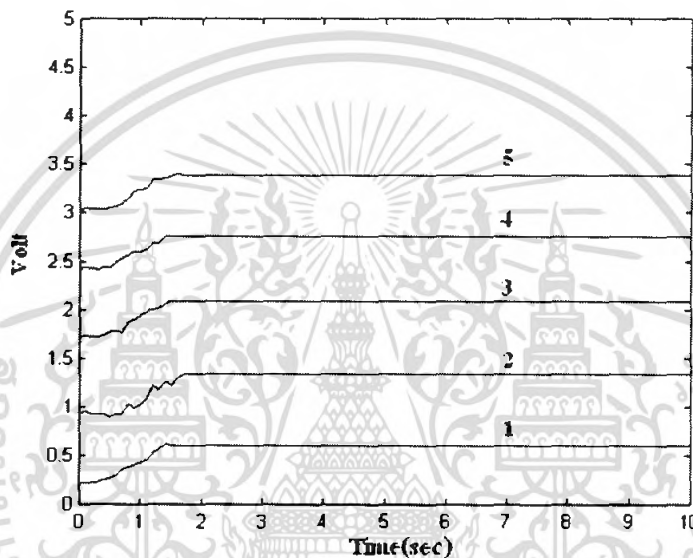
กรณีที่ 5 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 10 (3.21 โวลต์) ไปยังลูกที่ 11 (3.56 โวลต์)

ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10



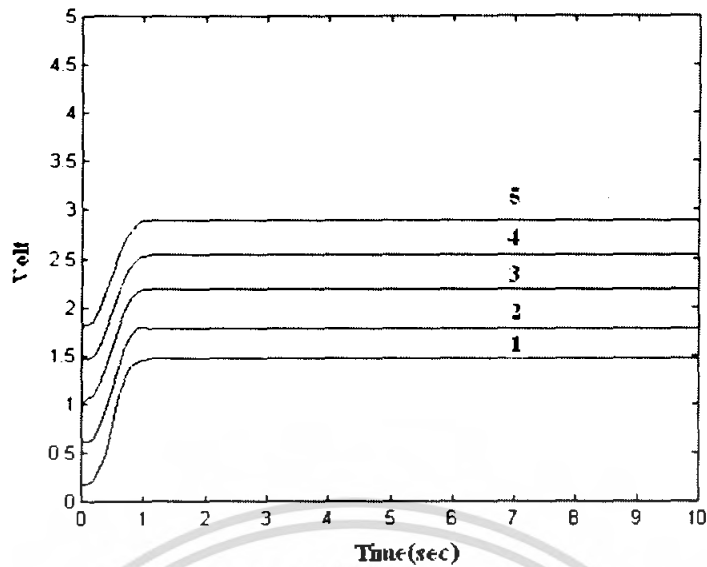
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนบนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระยะการเคลื่อนที่ห่างกันหนึ่งช้อง

การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ $K_p = 3.25$ $K_i = 1$ และ $K_d = 1.3$
 กรณีที่ 1 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 1 (0.2 โวลต์) ไปยังลูกที่ 2 (0.54 โวลต์) และ
 กรณีที่ 2 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 3 (0.88 โวลต์) ไปยังลูกที่ 4 (1.22 โวลต์) และ
 กรณีที่ 3 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 5 (1.56 โวลต์) ไปยังลูกที่ 6 (1.90 โวลต์) และ
 กรณีที่ 4 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 7 (2.24 โวลต์) ไปยังลูกที่ 8 (2.58 โวลต์) และ
 กรณีที่ 5 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 9 (2.92 โวลต์) ไปยังลูกที่ 10 (3.26 โวลต์)
 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนต่างด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระหว่างการเคลื่อนที่ห่างกันหนึ่งลูกห้อง

การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ $K_p = 2.2$ $K_i = 0.8$ และ $K_d = 1$
 กรณีที่ 1 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 2 (0.20 โวลต์) ไปยังลูกที่ 5 (1.45 โวลต์) และ
 กรณีที่ 2 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 3 (0.62 โวลต์) ไปยังลูกที่ 6 (1.82 โวลต์) และ
 กรณีที่ 3 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 4 (1.05 โวลต์) ไปยังลูกที่ 7 (2.19 โวลต์) และ
 กรณีที่ 4 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 5 (1.45 โวลต์) ไปยังลูกที่ 8 (2.54 โวลต์) และ
 กรณีที่ 5 จากตำแหน่งห้องลูกที่ 6 (1.82 โวลต์) ไปยังลูกที่ 9 (2.88 โวลต์)
 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนบนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระหว่างการเคลื่อนที่ห่างกันสามลูกช้อง

การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ $K_p = 2$ $K_i = 0.9$ และ $K_d = 1$

กรณีที่ 1 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 1 (0.20 โวลต์) ไปยังลูกที่ 4 (1.45 โวลต์) และ

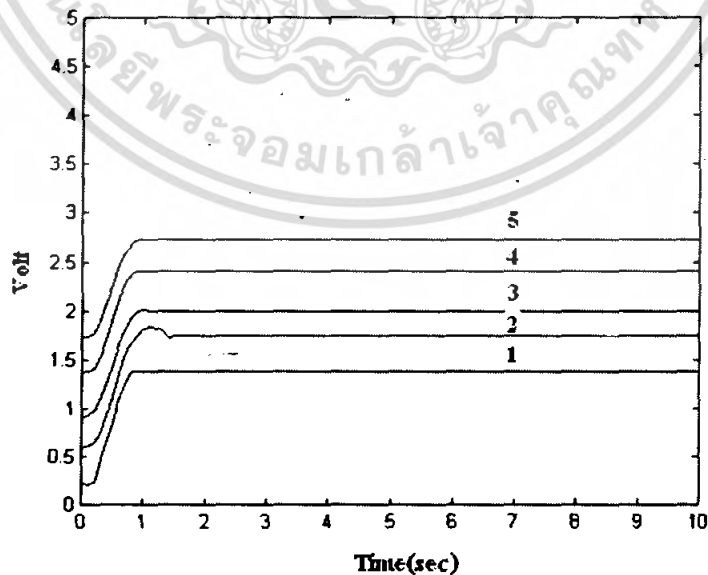
กรณีที่ 2 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 2 (0.59 โวลต์) ไปยังลูกที่ 5 (1.82 โวลต์) และ

กรณีที่ 3 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 3 (0.93 โวลต์) ไปยังลูกที่ 6 (2.19 โวลต์) และ

กรณีที่ 4 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 4 (1.37 โวลต์) ไปยังลูกที่ 7 (2.54 โวลต์) และ

กรณีที่ 5 จากตำแหน่งช้องลูกที่ 5 (1.73 โวลต์) ไปยังลูกที่ 8 (2.88 โวลต์)

ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

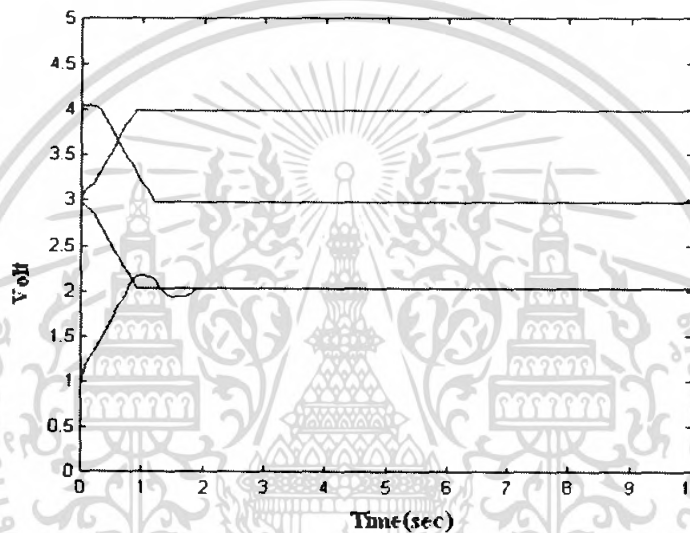


รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนล่างด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดเดียวกันในระหว่างการเคลื่อนที่ห่างกันสามลูกช้อง

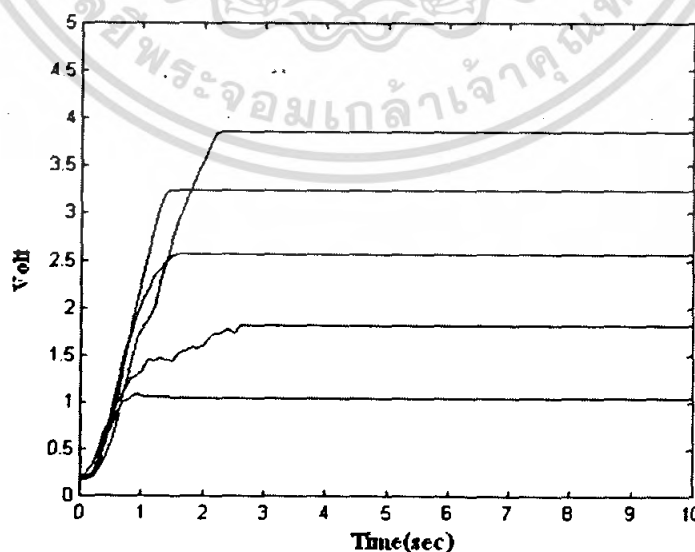
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13 ทำให้สรุปได้ว่าสามารถเลือกอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีในระบะการเคลื่อนที่ต่างๆกัน ในตำแหน่งที่ต่างกันได้ ต่อไปจะเป็นการเลือกจังหวะในแต่ละโน้ตโดยทดลองให้แขนเคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ต่างกัน โดยจะทดลองทั้งส่วนชืดและหคแขนและส่วนของแขนหมุนเพื่อหาช่วงระยะเวลาที่ดีที่สุดที่กำหนดหนึ่งจังหวะของแต่ละโน้ต

ในรูปที่ 4.14 นำเสนอผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการชืดและหคแขนที่ออกแบบเหมาะสมแล้วในระบะการเคลื่อนที่ต่างๆ และ รูปที่ 4.15 นำเสนอผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนที่ออกแบบเหมาะสมแล้วในระบะการเคลื่อนที่ต่างๆ ทำให้สามารถเลือกจังหวะในการตีได้ โดยจะเลือกให้ 1 จังหวะของแต่ละโน้ตเป็น 3 วินาทีเพื่อนำค่านี้ไปใส่ในโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์ห่นวงเวลาไว้ให้ถึง3 วินาทีก่อนค่อยส่งสัญญาณให้โซลินอยด์ทำงาน



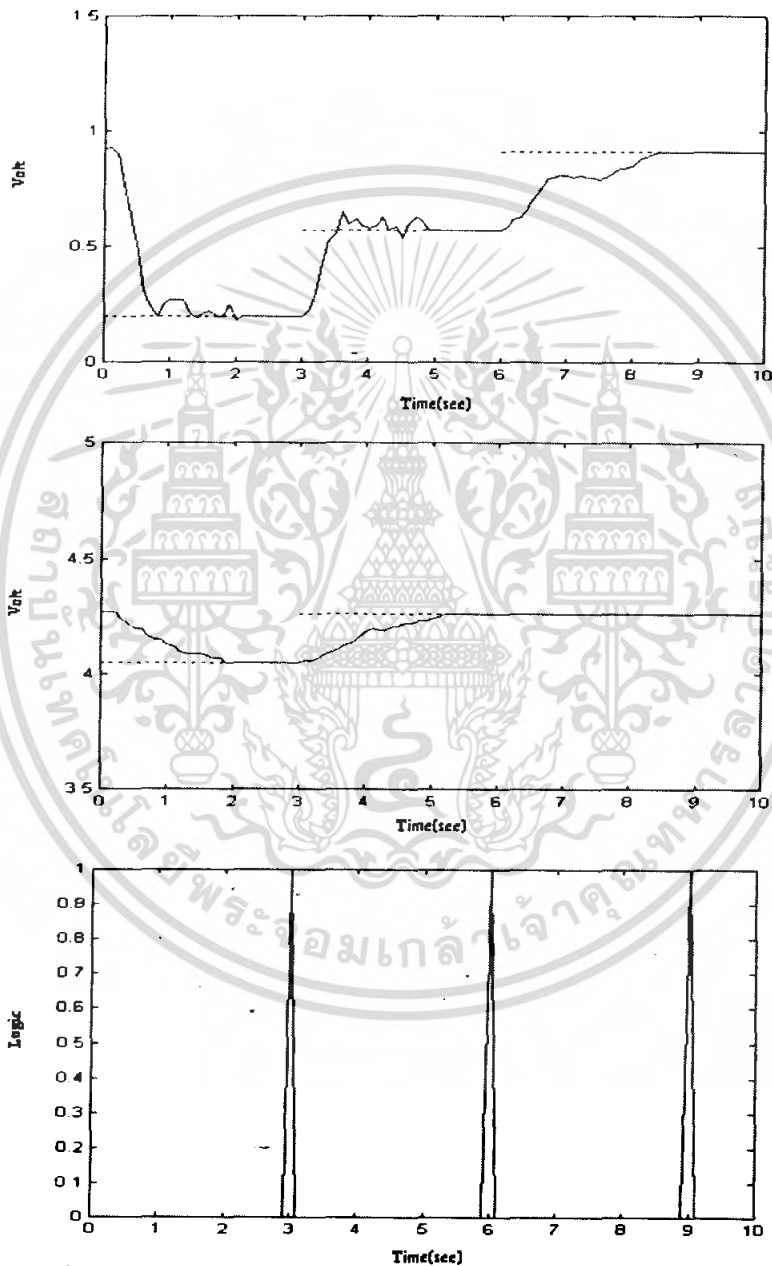
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการชืดและหคแขนด้วยอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมในระบะการเคลื่อนที่ต่างๆ



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของการหมุนแขนด้วยอัตราขยายตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมในระบะการเคลื่อนที่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

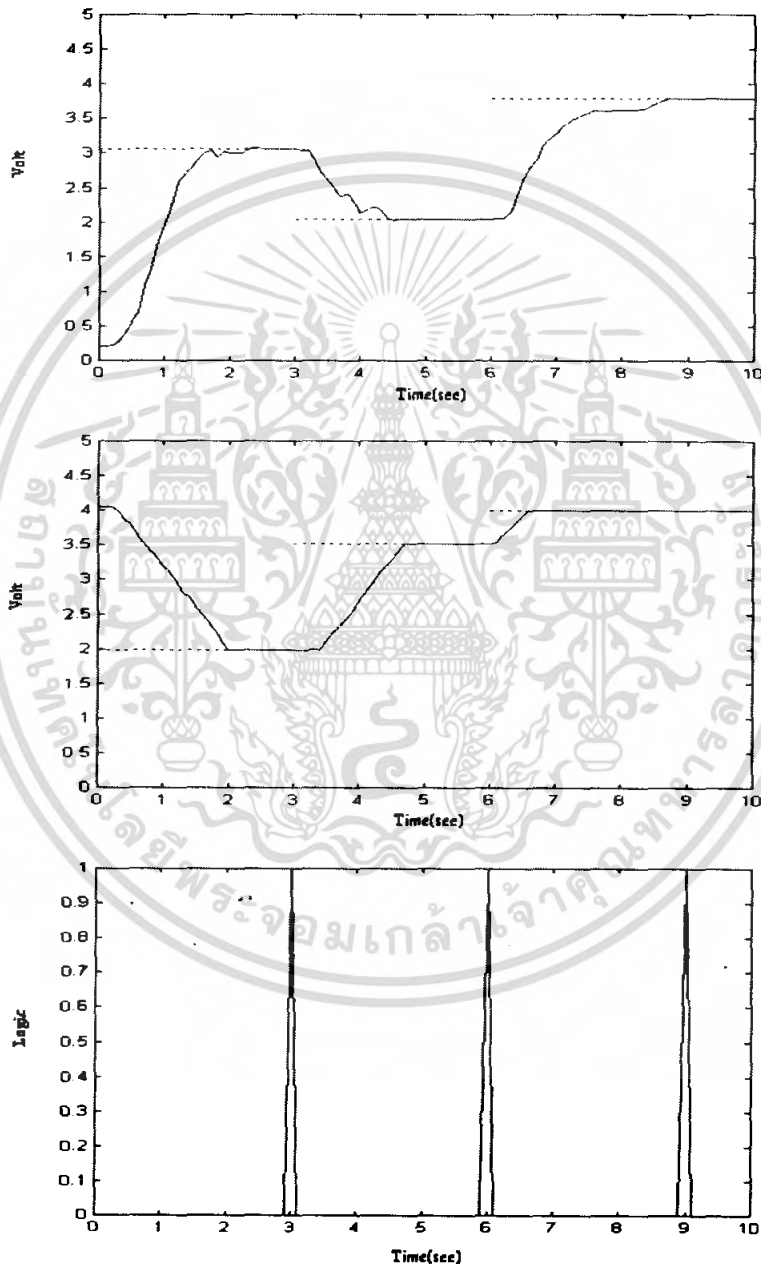
ตัวอย่างผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของแขนกลในส่วนหมุน ส่วนขีคและหค และโซลินอยด์ เพื่อดูการทำงานของแขนกลในขณะที่ทำการดีโน้ตเพลงอย่างค่อเนื่อง โดยในการทดลองนี้ จะให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งข้องลูกที่ 3 ไปข้องลูกที่ 1 ไปข้องลูกที่ 2 และเคลื่อนที่ไปข้องลูกที่ 3 โดยจะโซลินอยด์จะทำงานเมื่อแขนเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งข้องลูกที่ 1 2 และ 3 และรอบการทำงานครบ 3 วินาที



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแขนกลและโซลินอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแขนกลในส่วนหมุน ส่วนขีดและหัด และ โซลินอยด์ เพื่อดูการทำงานของแขนกลในขณะที่ทำการดีโน้ตเพลงอย่างต่อเนื่อง โดยในการทดลองนี้จะให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งห้องลูกที่ 1 ไปห้องลูกที่ 9 ไปห้องลูกที่ 6 และเคลื่อนที่ไปห้องลูกที่ 11 โดยจะโซลินอยด์จะทำงานเมื่อแขนเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งห้องลูกที่ 9 6 และ 11 และรอบการทำงานครบ 3 วินาที



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแขนกลและโซลินอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี

เมื่อทำการทดลองหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี แล้วพบว่าไม่สามารถใช้ อัตราขยายค่าเดียวกันได้เนื่องจากโครงสร้างเชิงกลของแกนนั้นมีน้ำหนักมากทำให้เกิดแรงเฉื่อยจึง ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดที่ต้องการ ได้ช้า และ การอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ช้าจึงทำให้รอบการทำงานของระบบใช้เวลานานมาก ขาดต่อการควบคุม จึงต้องหาค่าอัตราขยายของ ตัวควบคุมแบบพีไอดีตามระยะการเคลื่อนที่ของแกน ซึ่งจากการทดลองจะได้อัตราขยายตัวควบคุม แบบพีไอดีได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดี

ระยะห่างลูกช้อน	อัตราขยายของตัวควบคุม					
	แกนบน			แกนล่าง		
	Kp	Ki	Kd	Kp	Ki	Kd
1	3	0.8	1	3	0.8	1
2	2.7	0.7	1	2.3	1.25	1.2
3	2.2	0.8	1	2	0.9	1
4	1.83	0.72	1	1.75	0.75	1
5	1.7	0.68	1	1.75	0.75	1
6	1.45	0.5	0.95	1.75	0.75	1
7	1.1	0.3	1	1.65	0.75	1
8	1.4	0.3	1	1.55	0.65	0.9
9	1.38	0.25	1	1.35	0.5	1
10	1.275	0.2	1	1.35	0.5	0.9
11	1.275	0.21	1	1.15	0.3	0.8
12	1.27	0.225	1	1.15	0.3	0.8
13	1.27	0.2	1	1.15	0.3	0.8
14	1.27	0.2	1	1.15	0.3	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

แผนกคดีฟ้องวงใหญ่ในโครงการนี้ ได้ประกอบขึ้นด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ โครงสร้างทางกล เป็นส่วนดำเนินการหลักของระบบ โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนในการส่งผ่านแรงดัน และจ่ายกระแสให้เพียงพอกับความกับความต้องการของอุปกรณ์ทางกล และส่วนการควบคุม เป็นส่วนในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลคดีฟ้องวงใหญ่ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยในแต่ละส่วนนั้น ได้มีขั้นตอนในการออกแบบ จัดหาอุปกรณ์ที่เหมาะสม นำมาประกอบ ทดลองและสังเกตการณ์ และนำไปใช้งานจริง

ในส่วนการทดลองควบคุมแขนกลคดีฟ้องวงใหญ่ สามารถควบคุมแขนกลซึ่งแยกกันในแต่ละส่วนให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ ได้ โดยควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งมุมการหมุน ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งขีดและหยุด ด้วยตัวควบคุมแบบพี และสามารถควบคุมให้ไม่ผิดตามจังหวะการควบคุมได้

อย่างไรก็ตามในการทำโครงการได้พบปัญหาในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไป ดังมีรายละเอียดของปัญหาที่เกิดขึ้น แนวทางในการแก้ไข และข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต ต่อไปนี้

5.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

- โครงสร้างทางกลมีความไม่เที่ยงตรง เนื่องจากความไม่ชำนาญในการออกแบบชิ้นส่วนทางกลต่างๆ และการใช้เครื่องมือกล เช่น สว่าน เครื่องกลึง เครื่องตัด เป็นต้น แนวทางแก้ไข ควรฝึกฝนให้เกิดความชำนาญมากกว่านี้

- ไม่สามารถทราบข้อมูลที่แน่นอนของมอเตอร์ไฟฟ้า และข้อมูลของโครงสร้างทางกลในส่วนที่จะนำมาหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ทำให้ยากต่อการหาอัตราขยายต่างๆที่เหมาะสมของตัวควบคุม เพื่อที่จะนำไปควบคุมแขนกล ซึ่งมีผลทำให้ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก ในการหาอัตราขยายที่เหมาะสม ซึ่งใช้เวลานานมาก จึงควรใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่ทราบข้อมูลที่ต้องการ และควรหาข้อมูลของโครงสร้างทางกลด้วย

- ความไม่เข้าใจในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้เกิดความเสียหายในส่วนของวงจรมอเตอร์ขณะที่ทำการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เสียเวลาในการทำความเข้าใจ และแก้ไขปรับปรุงวงจร จึงควรศึกษาทุกส่วนของวงจรมอเตอร์ให้เกิดความเข้าใจก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อนำไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีพื้นฐานความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมทั้งในส่วนของคอมพิวเตอร์ และ ไมโครคอนโทรลเลอร์น้อยมาก ทำให้เสียเวลาลองผิดลองถูกในการเขียนโปรแกรม จึงควรศึกษาพื้นฐานของภาษาที่จะนำมาเขียนเป็นโปรแกรมให้มากกว่านี้

- มีปัญหาทางกล คือ แขนมีน้ำหนักมาก ทำให้มีแรงเฉื่อยมาก แขนจึงไม่สามารถหยุดในตำแหน่งที่ต้องการได้ในทันทีและมีแรงเฉื่อยไม่เท่ากันในแต่ละระยะในการเคลื่อนที่ แนวทางแก้ไข ต้องตั้งค่าพีไอดี ในแต่ละระยะของการเคลื่อนที่

- เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ อ่านค่าอนาล็อกได้ช้า จึงทำให้ค่าการทำงานในแต่ละรอบช้าไปด้วย ทำให้ควบคุมแขนกลได้ไม่คึกฉิว แนวทางแก้ไข ใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แทนการอ่านค่าโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

- เมื่อจ่ายสัญญาณไฟให้กับมอเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง มอเตอร์อีกตัวจะมีกระแสไฟฟ้ามารบกวนในจังหวะเริ่มการทำงาน และ ทำให้วงจรแปลงไฟที่จ่ายให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีสัญญาณรบกวนทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานได้ไม่สมบูรณ์ แนวทางแก้ไข ต้องทำการแยกแหล่งจ่ายไฟ

- สุดท้ายเป็นปัญหา การขาดความรอบคอบ ในส่วนของการต่อวงจร ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรเกิดความเสียหาย และการเลือกใช้อุปกรณ์มาใช้แต่ไม่เหมาะสม ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณ จึงต้องมีความรอบคอบทุกครั้งในการต่อวงจร และก่อนที่จะซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ต้องศึกษาถึงรายละเอียดที่จำเป็นของอุปกรณ์นั้น

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต

แขนกลดีของวงใหญ่ในโครงการนี้ ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือสามารถควบคุมแขนกลให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการได้ โดยสามารถควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งมุมการหมุน และตำแหน่งขีดและหุดของแขนกล แต่ยังมีข้อจำกัดในความเร็วของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ยังช้า เพราะในการเล่นเพลงจริงๆ นั้นใช้ความไวมากซึ่งสามารถที่จะพัฒนาต่อไปให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สูงสุดคือสามารถเล่นดนตรีไทยได้ โดยการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวมาในข้อที่ 5.1 เพื่อเพิ่มความเร็วในการควบคุมให้สูงขึ้น และอาจเปลี่ยนโครงสร้างทางกลเพื่อลดแรงเฉื่อยทำให้ควบคุมแขนได้ง่ายขึ้น ในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประจัน พลังสันติกุล. **เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC**. กรุงเทพมหานคร: อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์. 2547.
- [2] พิสมัย สุภัทรานนท์. **ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2545.
- [3] นิรุช อำนวยศิลป์. **คู่มือเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี**. กรุงเทพมหานคร: โปรวิชั่น. 2546.
- [4] อภิชาติ ภู่อัลป์. **สนุก! กับการประยุกต์ใช้ VISUAL BASIC**. นนทบุรี : อินโฟเพรส, 2546.
- [5] อภิชาติ ภู่อัลป์. **เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วย VISUAL BASIC** นนทบุรี : อินโฟเพรส, 2546.
- [6] กิตติ ภัคดีวัฒนกุล, จำลอง ครูอุตสาหะ. **Visual Basic 6 ฉบับโปรแกรมเมอร์**. กรุงเทพมหานคร: เกทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์, 2547.
- [7] ฐานิต สรรพตังเกตุ, สิทธิพล ปิ่นสุข, อารัติ นิ่มเสมอ. **“แผนกคดีห้องวงใหญ่.”** ปรินญาณินพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [8] อานัติ ชนะพัฑ, อารัติ นิ่มเสมอ. **“แผนกคดีห้องวงใหญ่.”** ปรินญาณินพนธ์วิศวกรรมศาสตร-บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระ-จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การจะทำให้แขนกลดีมีองวงใหญ่ในโรงงานนี้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้นั้น จำเป็นต้องมีตัวขับเคลื่อน ซึ่งส่วนมากจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ดังนั้นจึงควรรู้คุณลักษณะ และหลักการทํางาน รวมถึงหลักการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ชนิดนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 หลักการทํางานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษ คือ แรงบิดของเพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลามอเตอร์จะได้จากผลคูณระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า หลักการในทีนี้ คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้น จะทำให้เกิดแรงขึ้นในตัวนำ ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสที่ไหลผ่านในตัวนำนั้นๆ และจะเกิดการทำปฏิกิริยากับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงผลักดันขึ้นบนตัวนำ จึงทำให้อาร์เมเจอร์หมุนไปได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลากับกระแสเท่ากับ

$$T_d = K\Phi I \quad (ก.1)$$

เมื่อ T_d คือ แรงบิดของเพล (นิวตัน-เมตร)

Φ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้าเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวมันเอง เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf) ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลามอเตอร์ และต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับกับความเร็วของมอเตอร์ เป็น

$$E_b = K\Phi\omega \quad (ก.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ E_b คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (โวลต์)
 Φ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)
 ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ (เรเดียน/วินาที)

มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนแขนกลที่มีองศาใหญ่ในโครงการนี้ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ก.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร มีคุณลักษณะความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ เป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้ง่ายต่อการควบคุมตำแหน่ง และสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ทางเชิงกล อธิบายได้ดังนี้

$$\text{จาก } \Sigma \text{Torque} = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (\text{ก.3})$$

- เมื่อ $J(t)$: โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) (กิโลกรัม/ตารางเมตร)
 $T_f(t)$: แรงบิดเสียดทานในที่นี้คิดเฉพาะวิสคอสฟริกชัน (Viscous Friction) (นิวตัน-เมตร)
 $T_d(t)$: แรงบิดจากมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร)
 $T_L(t)$: แรงบิดจากผลของภาระมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร)
 $\omega(t)$: ความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)
 N : อัตราทดรอบเฟือง
 $\theta(t)$: ตำแหน่งเชิงมุม (เรเดียน)
 B : สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในที่นี้คิดเฉพาะวิสคอสฟริกชัน (นิวตัน-เมตร-วินาที/เรเดียน)

$$\Sigma \text{Torque} = T_d(t) - T_f(t) - T_L(t)$$

$$\Sigma \text{Torque} = T_d(t) - B\omega(t) - T_L(t) \quad (\text{ก.4})$$

แทนค่า (ก.4) ใน (ก.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 T_d(t) - B\omega(t) - T_L(t) &= J \frac{d\omega(t)}{dt} \\
 T_d(t) - T_L(t) &= J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \\
 \text{ให้ } T_d(t) - T_L(t) &= T(t) \\
 T(t) &= J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)
 \end{aligned} \tag{ก.5}$$

ทำการแปลงลาปลาซ สมการ (ก.5) โดยกำหนดให้มีสถานะเริ่มต้นที่ $\omega(s) = 0$ เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\begin{aligned}
 T(s) &= Js\omega(s) + B\omega(s) \\
 \frac{\omega(s)}{T(s)} &= \frac{1}{(Js + B)}
 \end{aligned} \tag{ก.6}$$

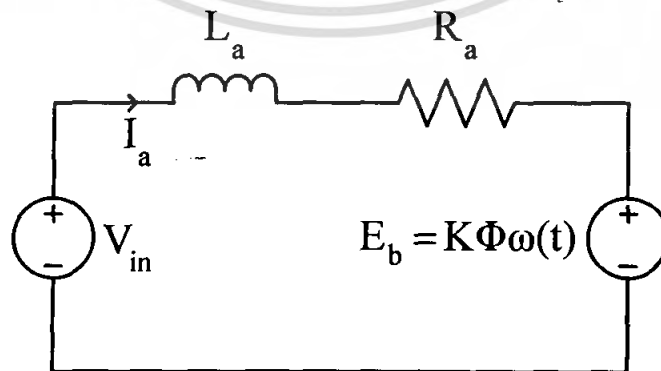
เนื่องจาก

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt \tag{ก.7}$$

ทำการแปลงลาปลาซ สมการ (ก.7) โดยกำหนดให้มีสถานะเริ่มต้นที่ $\omega(0) = 0$ เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\begin{aligned}
 \theta(s) &= \frac{1}{Ns} \omega(s) \\
 \frac{\theta(s)}{\omega(s)} &= \frac{1}{Ns}
 \end{aligned} \tag{ก.8}$$

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎคักคาของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Voltage Law : KVL)

$$V_{in}(t) - L_a \frac{dI_a(t)}{dt} - R_a I_a(t) - E_b(t) = 0 \quad (ก.9)$$

โดย E_b : แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (โวลท์)
 R_a : ความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ (โอห์ม)
 L_a : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาเมเจอร์ (เฮนรี)
 V_{in} : แรงดันอินพุต (โวลท์)
 I_a : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ (แอมแปร์)

$$\text{ให้ } V_{in}(t) - E_b(t) = L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + R_a I_a(t) \quad (ก.10)$$

$$V_{in}(t) - E_b(t) = V(t)$$

$$V(t) = L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + R_a I_a(t) \quad (ก.11)$$

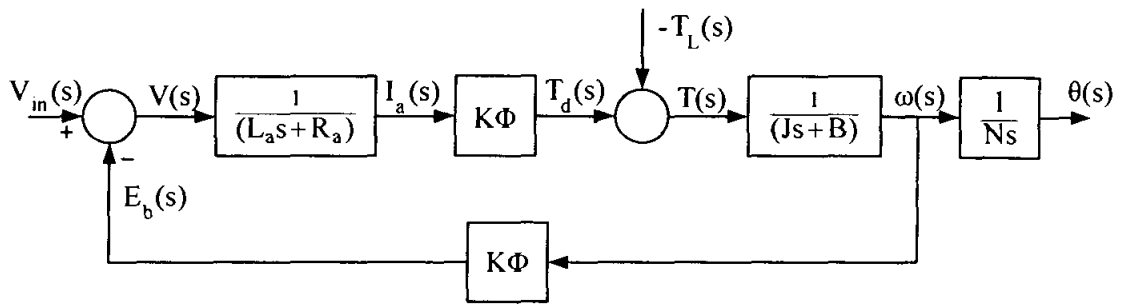
ทำการแปลงลาปลาซ สมการ (ก.11) โดยกำหนดให้มีสถานะเริ่มต้นที่ $I_a(0) = 0$ เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\begin{aligned} V(s) &= (L_a s + R_a) I_a(s) \\ \frac{I_a(s)}{V(s)} &= \frac{1}{(L_a s + R_a)} \end{aligned} \quad (ก.12)$$

นำระบบทางเชิงกลและทางไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกัน โดยให้ระบบรวมมี $V(s)$ เป็นอินพุต และ $\theta(s)$ เป็นเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ ก.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างระบบทั้งสองเป็นดังนี้

$$T_d(t) = K\Phi I_a(t) \quad (ก.13)$$

$$E_b(t) = K\Phi\omega(t) \quad (ก.14)$$



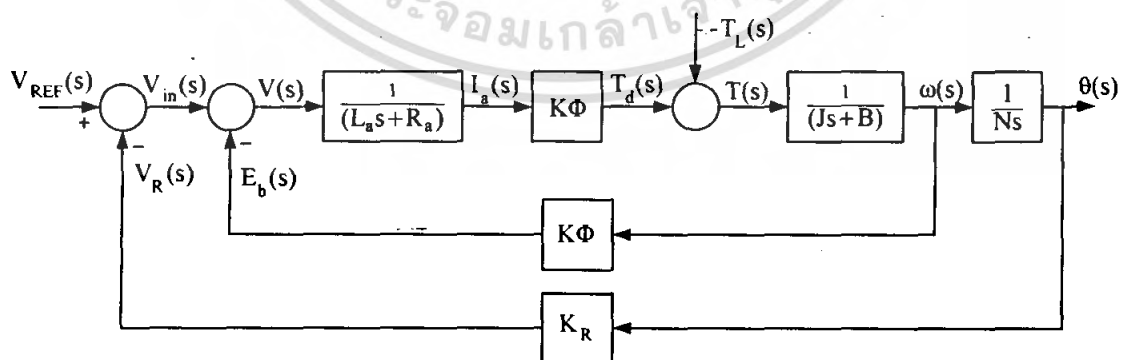
รูปที่ ก.2 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ ก.2 เป็นบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่มีส่วนการป้อนกลับ (Feedback Path) ซึ่งในการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้อาศัยส่วนการป้อนกลับนี้ในการตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุม ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ก.3 หลักการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System) สามารถควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ได้ โดยใช้โพเทนชิโอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุมจริง θ เปรียบเทียบกับตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิง θ_r ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลต่างระหว่างตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งเชิงมุมจริง ($\theta_r - \theta$) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลัดพ์ ($V_r - V$) ทำให้มอเตอร์กระแสตรงหมุนเพื่อลดผลต่างแรงดันไฟฟ้า ($\theta_r - \theta$) หรือผลต่างระหว่างตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิง θ_r กับตำแหน่งเชิงมุมจริง θ ให้เหลือน้อยที่สุด

ดังนั้นจากบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงในรูปที่ ก.2 ได้ทำการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งก็คือโพเทนชิโอมิเตอร์ในส่วนการป้อนกลับ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 บล็อกไดอะแกรมที่ใส่โพเทนชิโอมิเตอร์

โดย K_R คือ ค่าคงที่ของโพเทนชิโอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมที่ใช้ในโรงงาน

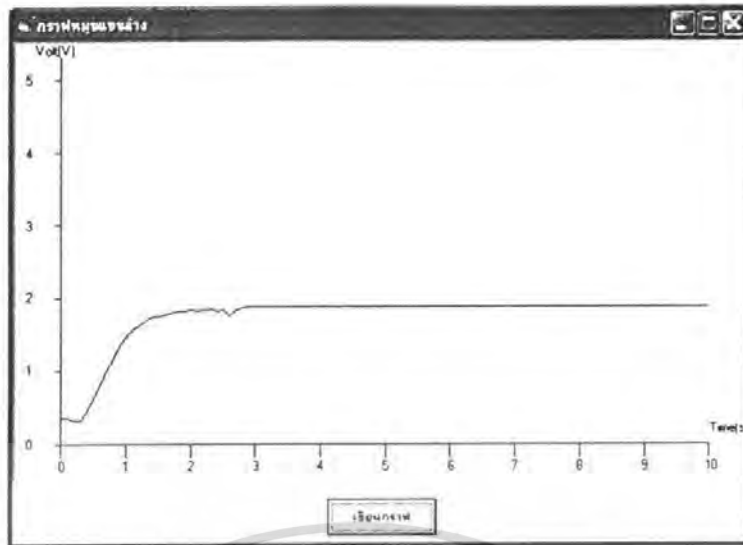
ในภาคผนวกนี้จะอธิบายถึงส่วนของโปรแกรมต่างๆ ที่ใช้ในโรงงานนี้ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และส่วนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมแขนกลคีม้องวงใหญ่

ข.1 โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม

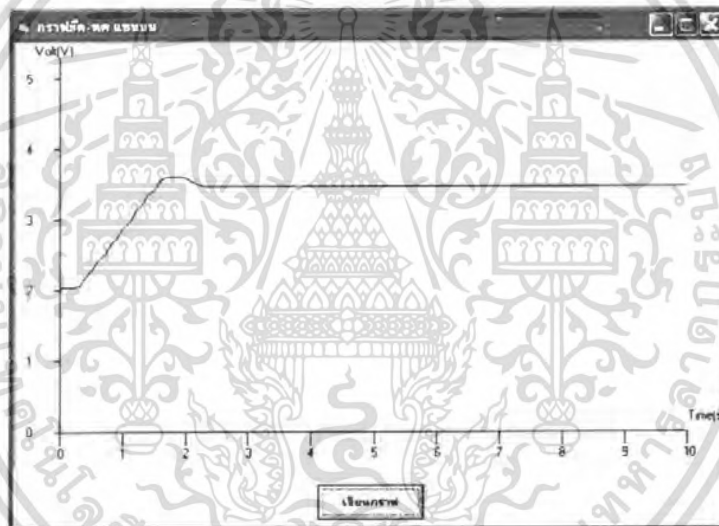
โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ในโรงงานนี้เขียนขึ้นด้วยภาษาเบสิก โดยใช้ Visual Basic6 เป็นตัวแปลภาษา ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนหน้าต่างโปรแกรมที่ใช้เชื่อมต่อกับผู้ควบคุม และในส่วนของโค้ด (Code) โปรแกรม โดยในส่วนหน้าต่างโปรแกรม จะมีด้วยกัน 2 หน้าต่าง คือ หน้าต่างโปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ใช้สำหรับให้ผู้ควบคุมป้อนข้อมูลค่าแห่งเป้าหมาย ข้อมูลอัตราขยายต่างๆ ของตัวควบคุม ดังรูปที่ ข.1 ข.2 และ ข.3 และอีกหน้าต่างเป็น โปรแกรมคีม้องวง ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ ข.2 หน้าต่างรองของ โปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ ข.3 หน้าต่างรองของ โปรแกรมตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในส่วนของโปรแกรม มีรายละเอียด ดังนี้

Option Explicit

Dim b As String

Dim fb, fb2, fb3, fb4 As Double

Dim Ts, Ts3 As Double

Dim er, er2, er3, er4 As Double

Dim er0, er02, er03, er04 As Double

Dim Vm, Vm2, Vm3, Vm4 As Double

Dim Vms, Vms2, Vms3, Vms4 As String

Dim Vsp, Vsp2, Vsp3, Vsp4 As Double

Dim Vkp, Vkp2, Vkp3, Vkp4 As Double

Dim Vki, Vki2, Vki3, Vki4 As Double

Dim Vkd, Vkd2, Vkd3, Vkd4 As Double

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim cn, cn2, cn3, cn4, cn5, cn6 As Integer
Dim P, P2, P3, P4 As Double
Dim i, i2, i3, i4 As Double
Dim D, D2, D3, D4 As Double
Dim j As Integer
Dim rc, rc2 As String
Dim vmi, vmi2, vmi3, vmi4 As Integer
Private Declare Sub Sleep Lib "kernel32" (ByVal dwMilliseconds As Long)

```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```

    Vkp = Val(Text4.Text)
    Vki = Val(Text5.Text)
    Vkd = Val(Text6.Text)
    Vsp = Val(Text3.Text)
    Vkp2 = Val(Text8.Text)
    Vki2 = Val(Text9.Text)
    Vkd2 = Val(Text10.Text)
    Vsp2 = Val(Text7.Text)
    Vkp3 = Val(Text14.Text)
    Vki3 = Val(Text15.Text)
    Vkd3 = Val(Text16.Text)
    Vsp3 = Val(Text13.Text)
    Vkp4 = Val(Text18.Text)
    Vki4 = Val(Text19.Text)
    Vkd4 = Val(Text20.Text)
    Vsp4 = Val(Text17.Text)
    mscmax.CommPort = 1
    mscmax.Settings = "19200,n,8,1"

```

```

If mscmax.PortOpen = False Then
    mscmax.PortOpen = True
End If

```

```

    er0 = 0
    er02 = 0
    er03 = 0
    er04 = 0
    k = 0
    Ts = 0.09
    Ts3 = 0.155
    cn3 = 1
    cn6 = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

i2 = 0

i3 = 0

i4 = 0

If Option1.Value = True Then

Timer1.Enabled = True

Timer1.Interval = 80

mscmax.Output = "s127a"

Sleep (1)

Text21.Text = ""

Text22.Text = ""

Elseif Option2.Value = True Then

Timer2.Enabled = True

Timer2.Interval = 80

mscmax.Output = "s127e"

Sleep (1)

Text1.Text = ""

Text2.Text = ""

Elseif Option3.Value = True Then

Timer3.Enabled = True

Timer3.Interval = 1

mscmax.Output = "s127a"

Sleep (100)

mscmax.InputLen = 0

Sleep (1)

b = mscmax.Input

rc = Mid(b, 2, 6)

fb = Val(Format(rc, "0.00"))

fb = fb + 0.34

Text1.Text = fb

rc2 = Mid(b, 14, 6)

fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))

Text2.Text = fb2

mscmax.Output = "s127e"

Sleep (100)

mscmax.InputLen = 0

Sleep (1)

b = mscmax.Input

rc = Mid(b, 2, 6)

fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))

Text21.Text = fb3

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนพระองค์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
Text22.Text = fb4
End If
End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()
If Timer1.Enabled = True Then
mscmax.Output = "sk"
Sleep (1)
Timer1.Enabled = False
mscmax.PortOpen = False
ElseIf Timer2.Enabled = True Then
mscmax.Output = "sk"
Sleep (1)
Timer2.Enabled = False
mscmax.PortOpen = False
ElseIf Timer3.Enabled = True Then
mscmax.Output = "sk"
Sleep (1)
Timer3.Enabled = False
mscmax.PortOpen = False
End If
End Sub

```

```

Private Sub Command3_Click()
If Option1.Value = True Then
Form2.Show
Form4.Show
ElseIf Option2.Value = True Then
Form3.Show
Form5.Show
ElseIf Option3.Value = True Then
Form2.Show
Form3.Show
Form4.Show
Form5.Show
End If
End Sub

```

```

Public Sub Timer1_Timer()

```

```

mscmax.InputLen = 0

```

```

Sleep (1)

```

เอกสาร Sleep (1) สสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

b = mscmax.Input
rc = Mid(b, 2, 6)
fb = Val(Format(rc, "0.00"))
fb = fb + 0.34
Text1.Text = fb
mem1(k) = fb
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
Text2.Text = fb2
mem3(k) = fb2
er = Vsp - fb
er = Round(er, 1)
P = Vkp * er
i = i + Vki * ((Ts / 2) * (er + er0))
D = Vkd * ((er - er0) / Ts)
Vm = P + i + D
  If (Vm > 5#) Then
    Vm = 5#
  ElseIf (Vm < -5#) Then
    Vm = -5#
  End If
er0 = er
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
Vms = Format(vmi, "000")
  mscmax.Output = "s"
  mscmax.Output = Vms
  mscmax.Output = "a"
er2 = Vsp2 - fb2
er2 = Round(er2, 1)
P2 = Vkp2 * er2
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts / 2) * (er2 + er02))
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts)
Vm2 = P2 + i2 + D2
  If (Vm2 > 5#) Then
    Vm2 = 5#
  ElseIf (Vm2 < -5#) Then
    Vm2 = -5#
  End If
er02 = er2

vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
Vms2 = Format(vmi2, "000")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If er2 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms2
    mscmax.Output = "b"
End If
k = k + 1
Text11.Text = k
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127b"
End If
If er = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
If er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "sk"
    Sleep (50)
    mscmax.Output = "sj"
    Sleep (50)
    Timer1.Enabled = False
    mscmax.PortOpen = False
    cn = 0
    cn2 = 0
    MsgBox "Your work has already done"
End If
End Sub

```

```
Public Sub Timer2_Timer()
```

```
    mscmax.InputLen = 0
```

```
    Sleep (1)
```

```
    b = mscmax.Input
```

```
    rc = Mid(b, 2, 6)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Text21.Text = fb3
mem2(k) = fb3
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
Text22.Text = fb4
mem4(k) = fb4
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Round(er3, 1)
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
    Vm3 = 5#
ElseIf (Vm3 < -5#) Then
    Vm3 = -5#
End If
er03 = er3
vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms3
mscmax.Output = "e"
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Round(er4, 1)
P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
    Vm4 = 5#
ElseIf (Vm4 < -5#) Then
    Vm4 = -5#
End If
er04 = er4
vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")
If er4 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms4
    mscmax.Output = "t"
End If
k = k + 1
Text11.Text = k
If er4 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127f"
End If
If er3 = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
If er3 = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "sk"
    Sleep (50)
    mscmax.Output = "sl"
    Sleep (50)
    Timer2.Enabled = False
    mscmax.PortOpen = False
    cn = 0
    cn2 = 0
    MsgBox "Your work has already done"
End If
End Sub

```

```

Public Sub Timer3_Timer()
    er = Vsp - fb
    er = Round(er, 1)
    P = Vkp * er
    i = i + Vki * ((Ts3 / 2) * (er + er0))
    D = Vkd * ((er - er0) / Ts3)
    Vm = P + i + D
    If (Vm > 5#) Then
        Vm = 5#
    ElseIf (Vm < -5#) Then
        Vm = -5#
    End If
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

er0 = er
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
Vms = Format(vmi, "000")
er2 = Vsp2 - fb2
er2 = Round(er2, 1)
P2 = Vkp2 * er2
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts3 / 2) * (er2 + er02))
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts3)
Vm2 = P2 + i2 + D2
  If (Vm2 > 5#) Then
    Vm2 = 5#
  ElseIf (Vm2 < -5#) Then
    Vm2 = -5#
  End If
er02 = er2
vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
Vms2 = Format(vmi2, "000")
If er2 = 0 Then
  cn2 = cn2 + 1
  cn3 = 0
Else
  cn2 = 0
  cn3 = 1
End If
Sleep (60)

  If k > 0 Then
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
    Text21.Text = fb3
    mem2(k) = fb3
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
    Text22.Text = fb4
    mem4(k) = fb4
  End If
  mscmax.Output = "s"
  mscmax.Output = Vms
  mscmax.Output = "a"

```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms2
mscmax.Output = "b"
End If
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127b"
End If
If er = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Round(er3, 1)
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts3 / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts3)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
    Vm3 = 5#
ElseIf (Vm3 < -5#) Then
    Vm3 = -5#
End If
er03 = er3
vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Round(er4, 1)
P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts3 / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts3)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
    Vm4 = 5#
ElseIf (Vm4 < -5#) Then
    Vm4 = -5#
End If
er04 = er4
vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")
If er4 = 0 Then

```

เอกสารนี้เช่นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cn6 = 0
Else
  cn5 = 0
  cn6 = 1
End If
Sleep (60)
If k > 0 Then
  mscmax.InputLen = 0
  Sleep (1)
  b = mscmax.Input
  rc = Mid(b, 2, 6)
  fb = Val(Format(rc, "0.00"))
  fb = fb + 0.34
  Text1.Text = fb
  mem1(k) = fb
  rc2 = Mid(b, 14, 6)
  fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
  Text2.Text = fb2
  mem3(k) = fb2
End If
  mscmax.Output = "s"
  mscmax.Output = Vms3
  mscmax.Output = "e"
If cn6 > 0 Then
  mscmax.Output = "s"
  mscmax.Output = Vms4
  mscmax.Output = "f"
End If
k = k + 1
Text11.Text = k
If er4 = 0 And cn5 = 1 Then
  Sleep (1)
  mscmax.Output = "s127f"
End If
If er3 = 0 Then
  cn4 = cn4 + 1
Else
  cn4 = 0
End If
  If er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1 And er3 = 0 And cn4 >= 3 And cn5 >= 1 Then
  Sleep (1)
  mscmax.Output = "sk"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mscmax.Output = "sjl"
Sleep (50)
Timer3.Enabled = False
mscmax.PortOpen = False
cn = 0
cn2 = 0
cn4 = 0
cn5 = 0
MsgBox "Your work has already done"
End If
End Sub

```

ในส่วนโค้ดของโปรแกรมเขียนกราฟ มีรายละเอียด ดังนี้

```

Option Explicit
Dim x As Double
Dim y As Double
Dim i As Integer
Private Sub Command1_Click()
Picture1.Scale (-0.7, -5.5)-(10.62, 0.5)
Picture1.BackColor = vbWhite
Picture1.ForeColor = vbBlack
Picture1.Line (0, 0)-(10, 0)
Picture1.Line (0, -5)-(0, 0)

For x = 0 To 10 Step 1
Picture1.Line (x, 0)-(x, 0.2)
Picture1.CurrentX = x - 0.1
Picture1.Print x
Next x

For y = 0 To -5 Step -1
Picture1.Line (-0.1, y)-(0, y)
Picture1.CurrentX = -0.6
Picture1.CurrentY = y - 0.1
Picture1.Print y * -1
Next y

Picture1.CurrentX = 10.01
Picture1.CurrentY = -0.3
Picture1.Print "Time(s)"
Picture1.CurrentX = -0.4
Picture1.CurrentY = -5.5
Picture1.Print "Volt(V)"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If k > 1 Then
x = 0
y = -mem1(0)
i = 0
End If
If k < 100 Then
For i = 0 To k - 1
    Picture1.Line -(x, y)
    y = -(mem1(i))
    x = x + 0.1
Next i
For i = (k - 1) To 99
    Picture1.Line -(x, y)
    y = -(mem1(k - 1))
    x = x + 0.1
Next i
Elseif k >= 100 Then
For i = 0 To 99
    Picture1.Line -(x, y)
    y = -(mem1(i))
    x = x + 0.1
Next i
End If
End Sub

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแซนกลติฆ้องวง หน้าต่างของโปรแกรมจะเป็นดังรูป ข.4 โดยจะมีช่องให้เติมลงไปว่าจะเล่นโน้ตตัวไหน และ ใช้แขนไหนในการตี ซึ่งสามารถเลือกใส่โน้ตได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถใส่โน้ตได้ 10 โน้ตและในหน้าต่างจะบอกค่าต่างๆคือ องศาของแขนบน แขนล่าง ค่าสัญญาณป้อนกลับของแขนบนและล่าง รอบการทำงานของส่วนควบคุม การหน่วงเวลา ในส่วนให้โปรแกรมทำงานจะมี “เล่นเพลง” เพื่อให้เล่นเพลงไปตามโน้ตที่ใส่ “หยุด” เพื่อหยุดขณะโปรแกรมกำลังเล่นเพลงอยู่ “ลบโน้ตเพลง” เพื่อลบค่าโน้ตที่ได้ทำการใส่ไว้ “เริ่มหาสัญญาณป้อนกลับใหม่” เพื่อนำไปปรับความต้านทานปรับค่าให้ได้ตำแหน่งของแขนตรงกับตำแหน่งของลูกฆ้อง โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมดังนี้



รูปที่ ข.4 หน้าต่างของโปรแกรมตีฆ้องวง

Option Explicit

Dim b As String

Dim fb, fb2, fb3, fb4, fb5, fb6, fb1 As Double

Dim Ts, Ts3 As Double

Dim er, er2, er3, er4 As Double

Dim er0, er02, er03, er04 As Double

Dim Vm, Vm2, Vm3, Vm4 As Double

Dim Vms, Vms2, Vms3, Vms4 As String

Dim Vsp, Vsp2, Vsp3, Vsp4, Vsp5, Vsp6 As Double

Dim Vkp, Vkp2, Vkp3, Vkp4 As Double

Dim Vki, Vki2, Vki3, Vki4 As Double

Dim Vkd, Vkd2, Vkd3, Vkd4 As Double

Dim cn, cn2, cn3, cn4, cn5, cn6, cn7, cn8, cn9, cn11, cr As Integer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim P, P2, P3, P4 As Double
Dim i, i2, i3, i4 As Double
Dim D, D2, D3, D4 As Double
Dim j As Integer
Dim rc, rc2 As String
Dim vmi, vmi2, vmi3, vmi4 As Integer
Dim k As Integer
Dim dif, dif3 As Double
Dim chk, chk2 As Double
Private Declare Sub Sleep Lib "kernel32" (ByVal dwMilliseconds As Long)

```

```

Private Sub Command1_Click()
    If mscmax.PortOpen = False Then
        mscmax.PortOpen = True
    End If
    cn7 = 0
    cn8 = 0
    cn9 = 10
    cn11 = 0
    Timer1.Enabled = True
    Timer1.Interval = 1
End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()
    If mscmax.PortOpen = True Then
        Sleep (1)
        mscmax.Output = "sk"
        Sleep (50)
        mscmax.PortOpen = False
    End If
    If Timer1.Enabled = True Then
        Timer1.Enabled = False
    End If
End Sub

```

```

Private Sub Command3_Click()
    For i = 0 To 19
        Text1(i).Text = ""
    Next
End Sub

```

```

Private Sub Command4_Click()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    mscmax.PortOpen = True
End If

er0 = 0
er02 = 0
er03 = 0
er04 = 0
k = 0
Ts = 0.09
Ts3 = 0.155
cn3 = 1
cn6 = 1
i = 0
i2 = 0
i3 = 0
i4 = 0

    mscmax.Output = "s127a"
    Sleep (100)
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb = Val(Format(rc, "0.00"))
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
    mscmax.Output = "s127e"
    Sleep (100)
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
    If 0.104 <= fb And fb <= 1.954 Then
        fb1 = fb + 0.44
        fb5 = (fb1 - 0.104) / 0.0233125
    ElseIf 1.955 <= fb And fb <= 3.648 Then
        fb1 = fb + 0.2
        fb5 = (fb1 - 0.25) / 0.019988
    ElseIf 3.649 <= fb And fb <= 5.4 Then
        fb1 = fb + 0.25
        fb5 = (fb1 + 0.12) / 0.02256
    End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fb6 = (fb3 - 0.1) / 0.0209348
fb5 = Val(FormatNumber(fb5, 2))
fb6 = Val(FormatNumber(fb6, 2))
Text4.Text = fb
Text5.Text = fb3
Text6.Text = fb5
Text7.Text = fb6
End Sub

```

```

Private Sub Form_Load()
mscmax.CommPort = 1
mscmax.Settings = "19200,n,8,1"
If mscmax.PortOpen = False Then
mscmax.PortOpen = True
End If
er0 = 0
er02 = 0
er03 = 0
er04 = 0
k = 0
Ts = 0.09
Ts3 = 0.155
cn3 = 1
cn6 = 1
i = 0
i2 = 0
i3 = 0
i4 = 0

```

```

mscmax.Output = "s127a"
Sleep (100)
mscmax.InputLen = 0
Sleep (1)
b = mscmax.Input
rc = Mid(b, 2, 6)
fb = Val(Format(rc, "0.00"))
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
mscmax.Output = "s127e"
Sleep (100)
mscmax.InputLen = 0
Sleep (1)

```

เอกสาร **b = mscmax.Input** ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rc = Mid(b, 2, 6)
fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
If 0.104 <= fb And fb <= 1.954 Then
fb1 = fb + 0.44
fb5 = (fb1 - 0.104) / 0.0233125
Elseif 1.955 <= fb And fb <= 3.648 Then
fb1 = fb + 0.2
fb5 = (fb1 - 0.25) / 0.019988
Elseif 3.649 <= fb And fb <= 5.4 Then
fb1 = fb + 0.25
fb5 = (fb1 + 0.12) / 0.02256
End If
fb6 = (fb3 - 0.1) / 0.0209348
fb5 = Val(FormatNumber(fb5, 2))
fb6 = Val(FormatNumber(fb6, 2))
Text4.Text = fb
Text5.Text = fb3
Text6.Text = fb5
Text7.Text = fb6
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
If cn7 > 0 Then
Timer1.Interval = 3000
If cn11 = 1 Then
mscmax.Output = "sj"
Elseif cn11 = 2 Then
mscmax.Output = "sl"
Elseif cn11 = 3 Then
mscmax.Output = "sjl"
End If
Sleep (2)
End If
cr = 0
er0 = 0
er02 = 0
er03 = 0
er04 = 0
k = 0
cn = 0
cn2 = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cn3 = 1
cn4 = 0
cn5 = 0
cn6 = 1
i = 0
i2 = 0
i3 = 0
i4 = 0

```

'แผนบงทำงานแจนเคียว

```
If Text1(cn8).Text <> "-" And Text1(cn9).Text = "-" Then
```

```
cn11 = 1
```

```
Select Case Text1(cn8).Text
```

```
Case "2"
```

```
Vsp = 0.2
```

```
Vsp2 = 4.7
```

```
Vsp5 = 22.99
```

```
Case "3"
```

```
Vsp = 0.68
```

```
Vsp2 = 4.7
```

```
Vsp5 = 43.58
```

```
Case "4"
```

```
Vsp = 1.11
```

```
Vsp2 = 4.7
```

```
Vsp5 = 62.03
```

```
Case "5"
```

```
Vsp = 1.53
```

```
Vsp2 = 4.2
```

```
Vsp5 = 80.04
```

```
Case "6"
```

```
Vsp = 1.9
```

```
Vsp2 = 3
```

```
Vsp5 = 95.91
```

```
Case "7"
```

```
Vsp = 2.31
```

```
Vsp2 = 3
```

```
Vsp5 = 113
```

```
Case "8"
```

```
Vsp = 2.64
```

```
Vsp2 = 2.5
```

```
Vsp5 = 129.5
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case "9"

$$V_{sp} = 3.02$$

$$V_{sp2} = 2.5$$

$$V_{sp5} = 142.12$$

Case "10"

$$V_{sp} = 3.28$$

$$V_{sp2} = 4.3$$

$$V_{sp5} = 161.6$$

Case "11"

$$V_{sp} = 3.7$$

$$V_{sp2} = 4.3$$

$$V_{sp5} = 180.4$$

Case "12"

$$V_{sp} = 4.02$$

$$V_{sp2} = 4.7$$

$$V_{sp5} = 194.5$$

Case "13"

$$V_{sp} = 4.3$$

$$V_{sp2} = 4.7$$

$$V_{sp5} = 209.2$$

Case "14"

$$V_{sp} = 4.65$$

$$V_{sp2} = 4.7$$

$$V_{sp5} = 224.7$$

Case "15"

$$V_{sp} = 4.85$$

$$V_{sp2} = 4.7$$

$$V_{sp5} = 234.9$$

Case "16"

$$V_{sp} = 4.99$$

$$V_{sp2} = 3.6$$

$$V_{sp5} = 238$$

End Select

$$dif = Abs(fb - V_{sp})$$

If dif = 0 Then

$$V_{kp} = 0$$

$$V_{ki} = 0$$

$$V_{kd} = 0$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

ElseIf 0.16 <= dif And dif <= 0.5 Then

$$V_{kp} = 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{ki} = 0.8$

$V_{kd} = 1$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $0.51 \leq dif$ And $dif \leq 0.85$ Then

$V_{kp} = 2.7$

$V_{ki} = 0.7$

$V_{kd} = 1$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $0.86 \leq dif$ And $dif \leq 1.2$ Then

$V_{kp} = 2.2$

$V_{ki} = 0.8$

$V_{kd} = 1$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $1.21 \leq dif$ And $dif \leq 1.55$ Then

$V_{kp} = 1.83$

$V_{ki} = 0.72$

$V_{kd} = 1$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $1.56 \leq dif$ And $dif \leq 1.9$ Then

$V_{kp} = 1.7$

$V_{ki} = 0.68$

$V_{kd} = 1$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $1.91 \leq dif$ And $dif \leq 2.25$ Then

$V_{kp} = 1.45$

$V_{ki} = 0.5$

$V_{kd} = 0.95$

$V_{kp2} = 20$

$V_{ki2} = 0$

$V_{kd2} = 0$

Elseif $2.26 \leq dif$ And $dif \leq 2.6$ Then

$V_{kp} = 1.1$

$V_{ki} = 0.3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vkd = 1
Vkp2 = 20
Vki2 = 0
Vkd2 = 0
Elseif 2.61 <= dif And dif <= 2.95 Then
  Vkp = 1.4
  Vki = 0.3
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0
Elseif 2.96 <= dif And dif <= 3.3 Then
  Vkp = 1.38
  Vki = 0.25
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0
Elseif 3.31 <= dif And dif <= 3.65 Then
  Vkp = 1.275
  Vki = 0.2
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0
Elseif 3.66 <= dif And dif <= 4 Then
  Vkp = 1.275
  Vki = 0.21
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0
Elseif 4.01 <= dif And dif <= 4.35 Then
  Vkp = 1.27
  Vki = 0.225
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0
Elseif 4.36 <= dif And dif <= 4.7 Then
  Vkp = 1.27
  Vki = 0.2
  Vkd = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vkp2 = 20
Vki2 = 0
Vkd2 = 0
ElseIf 4.71 <= dif And dif <= 5.05 Then
    Vkp = 1.27
    Vki = 0.2
    Vkd = 1
    Vkp2 = 20
    Vki2 = 0
    Vkd2 = 0
End If
chk = Abs(fb6 - Vsp5)
If chk <= 10 Then
    Vsp3 = Vsp-0.68
    Vsp3 = Vsp - 0.68
    dif3 = Abs(fb3 - Vsp3)
    If dif3 = 0 Then
        Vkp3 = 0
        Vki3 = 0
        Vkd3 = 0
        Vkp4 = 20
        Vki4 = 0
        Vkd4 = 0
    ElseIf 0.16 <= dif3 And dif3 <= 0.5 Then
        Vkp3 = 3
        Vki3 = 0.8
        Vkd3 = 1
        Vkp4 = 20
        Vki4 = 0
        Vkd4 = 0
    ElseIf 0.51 <= dif3 And dif3 <= 0.85 Then
        Vkp3 = 2.3
        Vki3 = 1.25
        Vkd3 = 1.2
        Vkp4 = 20
        Vki4 = 0
        Vkd4 = 0
    ElseIf 0.86 <= dif3 And dif3 <= 1.2 Then
        Vkp3 = 2
        Vki3 = 0.9
        Vkd3 = 1
        Vkp4 = 20
        Vki4 = 0

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vkd4 = 0

Elseif 1.21 <= dif3 And dif3 <= 1.55 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.56 <= dif3 And dif3 <= 1.9 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.91 <= dif3 And dif3 <= 2.25 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.26 <= dif3 And dif3 <= 2.6 Then

Vkp3 = 1.65

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.61 <= dif3 And dif3 <= 2.95 Then

Vkp3 = 1.55

Vki3 = 0.65

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.96 <= dif3 And dif3 <= 3.3 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elseif 3.31 <= dif3 And dif3 <= 3.65 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 3.66 <= dif3 And dif3 <= 4 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.01 <= dif3 And dif3 <= 4.35 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.36 <= dif3 And dif3 <= 4.7 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.71 <= dif3 And dif3 <= 5.05 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

End If

Do

If k > 0 Then

mscmax.InputLen = 0

Sleep (1)

b = mscmax.Input

rc = Mid(b, 2, 6)

fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
cr = cr + 1
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Val(FormatNumber(er3, 1))
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
    Vm3 = 5#
Elseif (Vm3 < -5#) Then
    Vm3 = -5#
End If
er03 = er3
vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
Sleep (1)
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms3
mscmax.Output = "e"
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Val(FormatNumber(er4, 1))
P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
    Vm4 = 5#
Elseif (Vm4 < -5#) Then
    Vm4 = -5#
End If
er04 = er4
vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")
If er4 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms4
    mscmax.Output = "i"
End If
k = k + 1
If er4 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127i"
End If
If er3 = 0 Then
    cn = cn - 1
Else
    cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er3 = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "sk"
    i3 = 0
    i4 = 0
    cn = 0
    cn2 = 0
    cn3 = 1
    k = 0
Do
If k > 0 Then
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb = Val(Format(rc, "0.00"))
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
    cr = cr + 1
    er = Vsp - fb
    er = Val(FormatNumber(er, 1))
    P = Vkp * er
    i = i + Vki * ((Ts / 2) * (er + er0))
    D = Vkd * ((er - er0) / Ts)
    Vm = P + i + D

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If (Vm > 5#) Then
    Vm = 5#
ElseIf (Vm < -5#) Then
    Vm = -5#
End If
er0 = er
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
Vms = Format(vmi, "000")
Sleep (1)
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms
    mscmax.Output = "a"
er2 = Vsp2 - fb2
er2 = Val(FormatNumber(er2, 1))
P2 = Vkp2 * er2
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts / 2) * (er2 + er02))
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts)
Vm2 = P2 + i2 + D2
    If (Vm2 > 5#) Then
        Vm2 = 5#
    ElseIf (Vm2 < -5#) Then
        Vm2 = -5#
    End If
er02 = er2
vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
Vms2 = Format(vmi2, "000")
If er2 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If
Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms2
    mscmax.Output = "b"
End If
k = k + 1
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
If er = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "sk"
    If cr <= 33 Then
        Timer1.Interval = 3000 - (cr * 90)
    Else
        Timer1.Interval = 1
    End If
    i = 0
    i2 = 0
    cn = 0
    cn2 = 0
    cn3 = 1
    k = 0
    Else
Do
If k > 0 Then
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb = Val(Format(rc, "0.00"))
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
cr = cr + 1
er = Vsp - fb
er = Val(FormatNumber(er, 1))
P = Vkp * er
i = i + Vki * ((Ts / 2) * (er + er0))
D = Vkd * ((er - er0) / Ts)
Vm = P + i + D
    If (Vm > 5#) Then
        Vm = 5#
    ElseIf (Vm < -5#) Then
        Vm = -5#

```

เอกสารนี้เป็นอีกสำเนาที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
er0 = er
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
Vms = Format(vmi, "000")
Sleep (1)
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms
mscmax.Output = "a"
er2 = Vsp2 - fb2
er2 = Val(FormatNumber(er2, 1))
P2 = Vkp2 * er2
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts / 2) * (er2 + er02))
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts)
Vm2 = P2 + i2 + D2
If (Vm2 > 5#) Then
    Vm2 = 5#
Elseif (Vm2 < -5#) Then
    Vm2 = -5#
End If
er02 = er2
vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
Vms2 = Format(vmi2, "000")
If er2 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If
Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms2
    mscmax.Output = "b"
End If
k = k + 1
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127b"
End If
If er = 0 Then
    cn = cn + 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "sk"
    If er <= 33 Then
        Timer1.Interval = 3000 - (cr * 90)
    Else
        Timer1.Interval = 1
    End If
    i = 0
    i2 = 0
    cn = 0
    cn2 = 0
    cn3 = 1
    k = 0
End If

```

.....

แขนล่างทำงานอย่างเดียว

```

ElseIf Text1(cn8).Text = "-" And Text1(cn9).Text <> "-" Then
.....

```

```

cn11 = 2

```

```

Select Case Text1(cn9).Text

```

```

    Case "1"

```

```

        Vsp3 = 0.2

```

```

        Vsp4 = 4

```

```

        Vsp6 = 5.73

```

```

    Case "2"

```

```

        Vsp3 = 0.6

```

```

        Vsp4 = 4.7

```

```

        Vsp6 = 23.88

```

```

    Case "3"

```

```

        Vsp3 = 0.98

```

```

        Vsp4 = 4.7

```

```

        Vsp6 = 42.04

```

```

    Case "4"

```

```

        Vsp3 = 1.43

```

```

        Vsp4 = 4.7

```

```

        Vsp6 = 63.53

```

```

    Case "5"

```

```

        Vsp3 = 1.79

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{sp6} = 80.73$$

Case "6"

$$V_{sp3} = 2.09$$

$$V_{sp4} = 3.5$$

$$V_{sp6} = 95.06$$

Case "7"

$$V_{sp3} = 2.45$$

$$V_{sp4} = 2$$

$$V_{sp6} = 112.72$$

Case "8"

$$V_{sp3} = 2.81$$

$$V_{sp4} = 2$$

$$V_{sp6} = 129.4$$

Case "9"

$$V_{sp3} = 3.13$$

$$V_{sp4} = 2$$

$$V_{sp6} = 147.12$$

Case "10"

$$V_{sp3} = 3.48$$

$$V_{sp4} = 4$$

$$V_{sp6} = 161.45$$

Case "11"

$$V_{sp3} = 3.81$$

$$V_{sp4} = 4$$

$$V_{sp6} = 178.1$$

Case "12"

$$V_{sp3} = 4.16$$

$$V_{sp4} = 4.5$$

$$V_{sp6} = 193.5$$

Case "13"

$$V_{sp3} = 4.46$$

$$V_{sp4} = 4.7$$

$$V_{sp6} = 208.2$$

Case "14"

$$V_{sp3} = 4.76$$

$$V_{sp4} = 4.7$$

$$V_{sp6} = 222.1$$

Case "15"

$$V_{sp3} = 4.97$$

$$V_{sp4} = 4.7$$

$$V_{sp6} = 231.6$$

End Select

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If dif3 = 0 Then

Vkp3 = 0

Vki3 = 0

Vkd3 = 0

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 0.16 <= dif3 And dif3 <= 0.5 Then

Vkp3 = 3

Vki3 = 0.8

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 0.51 <= dif3 And dif3 <= 0.85 Then

Vkp3 = 2.3

Vki3 = 1.25

Vkd3 = 1.2

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 0.86 <= dif3 And dif3 <= 1.2 Then

Vkp3 = 2

Vki3 = 0.9

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.21 <= dif3 And dif3 <= 1.55 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.56 <= dif3 And dif3 <= 1.9 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.91 <= dif3 And dif3 <= 2.25 Then

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.26 <= dif3 And dif3 <= 2.6 Then

Vkp3 = 1.65

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.61 <= dif3 And dif3 <= 2.95 Then

Vkp3 = 1.55

Vki3 = 0.65

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.96 <= dif3 And dif3 <= 3.3 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 3.31 <= dif3 And dif3 <= 3.65 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 3.66 <= dif3 And dif3 <= 4 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.01 <= dif3 And dif3 <= 4.35 Then

Vkp3 = 1.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vki3 = 0.3
Vkd3 = 0.8
Vkp4 = 20
Vki4 = 0
Vkd4 = 0
Elseif 4.36 <= dif3 And dif3 <= 4.7 Then
    Vkp3 = 1.15
    Vki3 = 0.3
    Vkd3 = 0.8
    Vkp4 = 20
    Vki4 = 0
    Vkd4 = 0
Elseif 4.71 <= dif3 And dif3 <= 5.05 Then
    Vkp3 = 1.15
    Vki3 = 0.3
    Vkd3 = 0.8
    Vkp4 = 20
    Vki4 = 0
    Vkd4 = 0
End If

chk2 = Abs(fb5 - Vsp6)
If chk2 <= 10 Then
    Vsp = Vsp3 + 0.68
    Vsp = Vsp3 + 0.68

dif = Abs(fb - Vsp)
If dif = 0 Then
    Vkp = 0
    Vki = 0
    Vkd = 0
    Vkp2 = 20
    Vki2 = 0
    Vkd2 = 0
Elseif 0.16 <= dif And dif <= 0.5 Then
    Vkp = 3
    Vki = 0.8
    Vkd = 1
    Vkp2 = 20
    Vki2 = 0
    Vkd2 = 0

```

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vkp = 2.7
 Vki = 0.7
 Vkd = 1
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 0.86 <= dif And dif <= 1.2 Then
 Vkp = 2.2
 Vki = 0.8
 Vkd = 1
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 1.21 <= dif And dif <= 1.55 Then
 Vkp = 1.83
 Vki = 0.72
 Vkd = 1
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 1.56 <= dif And dif <= 1.9 Then
 Vkp = 1.7
 Vki = 0.68
 Vkd = 1
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 1.91 <= dif And dif <= 2.25 Then
 Vkp = 1.45
 Vki = 0.5
 Vkd = 0.95
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 2.26 <= dif And dif <= 2.6 Then
 Vkp = 1.1
 Vki = 0.3
 Vkd = 1
 Vkp2 = 20
 Vki2 = 0
 Vkd2 = 0
 Elseif 2.61 <= dif And dif <= 2.95 Then

Vkp = 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{ki} = 0.3$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 2.96 <= dif And dif <= 3.3 Then

$$V_{kp} = 1.38$$

$$V_{ki} = 0.25$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 3.31 <= dif And dif <= 3.65 Then

$$V_{kp} = 1.275$$

$$V_{ki} = 0.2$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 3.66 <= dif And dif <= 4 Then

$$V_{kp} = 1.275$$

$$V_{ki} = 0.21$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 4.01 <= dif And dif <= 4.35 Then

$$V_{kp} = 1.27$$

$$V_{ki} = 0.225$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 4.36 <= dif And dif <= 4.7 Then

$$V_{kp} = 1.27$$

$$V_{ki} = 0.2$$

$$V_{kd} = 1$$

$$V_{kp2} = 20$$

$$V_{ki2} = 0$$

$$V_{kd2} = 0$$

Elseif 4.71 <= dif And dif <= 5.05 Then

$$V_{kp} = 1.27$$

$$V_{ki} = 0.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vkd = 1
Vkp2 = 20
Vki2 = 0
Vkd2 = 0
End If
Do
If k > 0 Then
mscmax.InputLen = 0
Sleep (1)
b = mscmax.Input
rc = Mid(b, 2, 6)
fb = Val(Format(rc, "0.00"))
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
cr = cr + 1
er = Vsp - fb
er = Val(FormatNumber(er, 1))
P = Vkp * er
i = i + Vki * ((Ts / 2) * (er + er0))
D = Vkd * ((er - er0) / Ts)
Vm = P + i + D
If (Vm > 5#) Then
Vm = 5#
Elseif (Vm < -5#) Then
Vm = -5#
End If
er0 = er
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
Vms = Format(vmi, "000")
Sleep (1)
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms
mscmax.Output = "a"
er2 = Vsp2 - fb2
er2 = Val(FormatNumber(er2, 1))
P2 = Vkp2 * er2
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts / 2) * (er2 + er02))
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts)
Vm2 = P2 + i2 + D2
If (Vm2 > 5#) Then
Vm2 = 5#

```

Elseif (Vm2 < -5#) Then

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vm2 = -5#
End If
er02 = er2
vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
Vms2 = Format(vmi2, "000")

If er2 = 0 Then
    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If
Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms2
    mscmax.Output = "b"
End If
k = k + 1
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127b"
End If
If er = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
Sleep (1)
mscmax.Output = "sk"
i = 0
i2 = 0
cn = 0
cn2 = 0
cn3 = 1
k = 0
Do
    If k > 0 Then
        mscmax.InputLen = 0
        Sleep (1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

b = mscmax.Input
rc = Mid(b, 2, 6)
fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
cr = cr + 1
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Val(FormatNumber(er3, 1))
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
    Vm3 = 5#
ElseIf (Vm3 < -5#) Then
    Vm3 = -5#
End If
er03 = er3

vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
Sleep (1)
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms3
mscmax.Output = "e"
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Val(FormatNumber(er4, 1))
P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
    Vm4 = 5#
ElseIf (Vm4 < -5#) Then
    Vm4 = -5#
End If
er04 = er4

vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    cn2 = cn2 + 1
    cn3 = 0
Else
    cn2 = 0
    cn3 = 1
End If
Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms4
    mscmax.Output = "f"
End If
k = k + 1
If er4 = 0 And cn2 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127f"
End If
If er3 = 0 Then
    cn = cn + 1
Else
    cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er3 = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
Sleep (1)
mscmax.Output = "sk"
If cr <= 33 Then
    Timer1.Interval = 3000 - (cr * 90)
Else
    Timer1.Interval = 1
End If
i3 = 0
i4 = 0
cn = 0
cn2 = 0
cn3 = 1
k = 0
Else
Do
    If k > 0 Then
        mscmax.InputLen = 0
        Sleep (1)

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rc = Mid(b, 2, 6)
fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
rc2 = Mid(b, 14, 6)
fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
cr = cr + 1
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Val(FormatNumber(er3, 1))
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
    Vm3 = 5#
Elseif (Vm3 < -5#) Then
    Vm3 = -5#
End If
er03 = er3
vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
Sleep (1)
msecmax.Output = "s"
msecmax.Output = Vms3
msecmax.Output = "e"
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Val(FormatNumber(er4, 1))

P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
    Vm4 = 5#
Elseif (Vm4 < -5#) Then
    Vm4 = -5#
End If
er04 = er4

vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")

If er4 = 0 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cn3 = 0
Else
cn2 = 0
cn3 = 1
End If
Sleep (1)
If cn3 > 0 Then
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms4
mscmax.Output = "f"
End If
k = k + 1
If er4 = 0 And cn2 = 1 Then
Sleep (1)
mscmax.Output = "s127f"
End If
If er3 = 0 Then
cn = cn + 1
Else
cn = 0
End If
Sleep (80)
Loop Until er3 = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1
Sleep (1)
mscmax.Output = "sk"
If cr <= 33 Then
Timer1.Interval = 3000 - (cr * 90)
Else
Timer1.Interval = 1
End If
i3 = 0
i4 = 0
cn = 0
cn2 = 0
cn3 = 1
k = 0
End If

```

.....

ไม่ทำงานทั้ง 2 แขน

```

ElseIf Text1(cn8).Text = "-" And Text1(cn9).Text = "-" Then
cn11 = 0

```

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cn11 = 3

Select Case Text1(cn8).Text

Case "2"

Vsp = 0.2

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 22.99

Case "3"

Vsp = 0.68

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 43.58

Case "4"

Vsp = 1.11

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 62.03

Case "5"

Vsp = 1.53

Vsp2 = 4.2

Vsp5 = 80.04

Case "6"

Vsp = 1.9

Vsp2 = 3

Vsp5 = 95.91

Case "7"

Vsp = 2.31

Vsp2 = 3

Vsp5 = 113

Case "8"

Vsp = 2.64

Vsp2 = 2.5

Vsp5 = 129.5

Case "9"

Vsp = 3.02

Vsp2 = 2.5

Vsp5 = 147.12

Case "10"

Vsp = 3.28

Vsp2 = 4.3

Vsp5 = 161.6

Case "11"

Vsp = 3.7

Vsp2 = 4.3

Vsp5 = 180.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case "12"

Vsp = 4.02

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 194.5

Case "13"

Vsp = 4.3

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 209.2

Case "14"

Vsp = 4.65

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 224.7

Case "15"

Vsp = 4.85

Vsp2 = 4.7

Vsp5 = 234.9

Case "16"

Vsp = 4.99

Vsp2 = 3.6

Vsp5 = 238

End Select

dif = Abs(fb - Vsp)

If dif = 0 Then

Vkp = 0

Vki = 0

Vkd = 0

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 0.16 <= dif And dif <= 0.5 Then

Vkp = 3

Vki = 0.8

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 0.51 <= dif And dif <= 0.85 Then

Vkp = 2.7

Vki = 0.7

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

เอกสารนี้เป็น **Vkd2 = 0** ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elseif 0.86 <= dif And dif <= 1.2 Then

Vkp = 2.2

Vki = 0.8

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 1.21 <= dif And dif <= 1.55 Then

Vkp = 1.83

Vki = 0.72

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 1.56 <= dif And dif <= 1.9 Then

Vkp = 1.7

Vki = 0.68

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 1.91 <= dif And dif <= 2.25 Then

Vkp = 1.45

Vki = 0.5

Vkd = 0.95

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 2.26 <= dif And dif <= 2.6 Then

Vkp = 1.1

Vki = 0.3

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

Elseif 2.61 <= dif And dif <= 2.95 Then

Vkp = 1.4

Vki = 0.3

Vkd = 1

Vkp2 = 20

Vki2 = 0

Vkd2 = 0

เอกสาร Elseif 2.96 <= dif And dif <= 3.3 Then การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vkp = 1.38
Vki = 0.25
Vkd = 1
Vkp2 = 20
Vki2 = 0
Vkd2 = 0

Elseif 3.31 <= dif And dif <= 3.65 Then
  Vkp = 1.275
  Vki = 0.2
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0

Elseif 3.66 <= dif And dif <= 4 Then
  Vkp = 1.275
  Vki = 0.21
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0

Elseif 4.01 <= dif And dif <= 4.35 Then
  Vkp = 1.27
  Vki = 0.225
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0

Elseif 4.36 <= dif And dif <= 4.7 Then
  Vkp = 1.27
  Vki = 0.2
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0

Elseif 4.71 <= dif And dif <= 5.05 Then
  Vkp = 1.27
  Vki = 0.2
  Vkd = 1
  Vkp2 = 20
  Vki2 = 0
  Vkd2 = 0

End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Select Case Text1(cn9).Text

Case "1"

Vsp3 = 0.2

Vsp4 = 4

Vsp6 = 5.73

Case "2"

Vsp3 = 0.6

Vsp4 = 4.7

Vsp6 = 23.88

Case "3"

Vsp3 = 0.98

Vsp4 = 4.7

Vsp6 = 42.04

Case "4"

Vsp3 = 1.43

Vsp4 = 4.7

Vsp6 = 63.53

Case "5"

Vsp3 = 1.79

Vsp4 = 4

Vsp6 = 80.73

Case "6"

Vsp3 = 2.09

Vsp4 = 3.5

Vsp6 = 95.06

Case "7"

Vsp3 = 2.45

Vsp4 = 2

Vsp6 = 112.72

Case "8"

Vsp3 = 2.81

Vsp4 = 2

Vsp6 = 129.4

Case "9"

Vsp3 = 3.13

Vsp4 = 2

Vsp6 = 147.12

Case "10"

Vsp3 = 3.48

Vsp4 = 4

Vsp6 = 161.45

Case "11"

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vsp4 = 4
Vsp6 = 178.1
Case "12"
  Vsp3 = 4.16
  Vsp4 = 4.5
  Vsp6 = 193.5
Case "13"
  Vsp3 = 4.46
  Vsp4 = 4.7
  Vsp6 = 208.2
Case "14"
  Vsp3 = 4.76
  Vsp4 = 4.7
  Vsp6 = 222.1
Case "15"
  Vsp3 = 4.97
  Vsp4 = 4.7
  Vsp6 = 231.6
End Select
dif3 = Abs(fb3 - Vsp3)
If dif3 = 0 Then
  Vkp3 = 0
  Vki3 = 0
  Vkd3 = 0
  Vkp4 = 20
  Vki4 = 0
  Vkd4 = 0
Elseif 0.16 <= dif3 And dif3 <= 0.5 Then
  Vkp3 = 3
  Vki3 = 0.8
  Vkd3 = 1
  Vkp4 = 20
  Vki4 = 0
  Vkd4 = 0
Elseif 0.51 <= dif3 And dif3 <= 0.85 Then
  Vkp3 = 2.3
  Vki3 = 1.25
  Vkd3 = 1.2
  Vkp4 = 20
  Vki4 = 0
  Vkd4 = 0
Elseif 0.86 <= dif3 And dif3 <= 1.2 Then

```

เอกสารนี้เป็น **Vkp3 = 2** ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vki3 = 0.9

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.21 <= dif3 And dif3 <= 1.55 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.56 <= dif3 And dif3 <= 1.9 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 1.91 <= dif3 And dif3 <= 2.25 Then

Vkp3 = 1.75

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.26 <= dif3 And dif3 <= 2.6 Then

Vkp3 = 1.65

Vki3 = 0.75

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.61 <= dif3 And dif3 <= 2.95 Then

Vkp3 = 1.55

Vki3 = 0.65

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 2.96 <= dif3 And dif3 <= 3.3 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vkd3 = 1

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 3.31 <= dif3 And dif3 <= 3.65 Then

Vkp3 = 1.35

Vki3 = 0.5

Vkd3 = 0.9

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 3.66 <= dif3 And dif3 <= 4 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.01 <= dif3 And dif3 <= 4.35 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.36 <= dif3 And dif3 <= 4.7 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

Elseif 4.71 <= dif3 And dif3 <= 5.05 Then

Vkp3 = 1.15

Vki3 = 0.3

Vkd3 = 0.8

Vkp4 = 20

Vki4 = 0

Vkd4 = 0

End If

Do

cr = cr + 1

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
er = Val(FormatNumber(er, 1))
```

```
P = Vkp * er
```

```
i = i + Vki * ((Ts3 / 2) * (er + er0))
```

```
D = Vkd * ((er - er0) / Ts3)
```

```
Vm = P + i + D
```

```
If (Vm > 5#) Then
```

```
    Vm = 5#
```

```
ElseIf (Vm < -5#) Then
```

```
    Vm = -5#
```

```
End If
```

```
er0 = er
```

```
vmi = 25.5 * (Vm - 5) + 255
```

```
Vms = Format(vmi, "000")
```

```
er2 = Vsp2 - fb2
```

```
er2 = Val(FormatNumber(er2, 1))
```

```
P2 = Vkp2 * er2
```

```
i2 = i2 + Vki2 * ((Ts3 / 2) * (er2 + er02))
```

```
D2 = Vkd2 * ((er2 - er02) / Ts3)
```

```
Vm2 = P2 + i2 + D2
```

```
If (Vm2 > 5#) Then
```

```
    Vm2 = 5#
```

```
ElseIf (Vm2 < -5#) Then
```

```
    Vm2 = -5#
```

```
End If
```

```
er02 = er2
```

```
vmi2 = 25.5 * (Vm2 - 5) + 255
```

```
Vms2 = Format(vmi2, "000")
```

```
If er2 = 0 Then
```

```
    cn2 = cn2 + 1
```

```
    cn3 = 0
```

```
Else
```

```
    cn2 = 0
```

```
    cn3 = 1
```

```
End If
```

```
Sleep (60)
```

```
If k > 0 Then
```

```
    mscmax.InputLen = 0
```

```
    Sleep (1)
```

```
    b = mscmax.Input
```

```
    rc = Mid(b, 2, 6)
```

```
    fb3 = Val(Format(rc, "0.00"))
```

```
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fb4 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
Sleep (1)
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms
mscmax.Output = "a"
If cn3 > 0 Then
mscmax.Output = "s"
mscmax.Output = Vms2
mscmax.Output = "b"
End If
If er2 = 0 And cn2 = 1 Then
Sleep (1)
mscmax.Output = "s127b"
End If
If er = 0 Then
cn = cn + 1
Else
cn = 0
End If
er3 = Vsp3 - fb3
er3 = Val(FormatNumber(er3, 1))
P3 = Vkp3 * er3
i3 = i3 + Vki3 * ((Ts3 / 2) * (er3 + er03))
D3 = Vkd3 * ((er3 - er03) / Ts3)
Vm3 = P3 + i3 + D3
If (Vm3 > 5#) Then
Vm3 = 5#
ElseIf (Vm3 < -5#) Then
Vm3 = -5#
End If
er03 = er3
vmi3 = 25.5 * -(Vm3 - 5)
Vms3 = Format(vmi3, "000")
er4 = Vsp4 - fb4
er4 = Val(FormatNumber(er4, 1))
P4 = Vkp4 * er4
i4 = i4 + Vki4 * ((Ts3 / 2) * (er4 + er04))
D4 = Vkd4 * ((er4 - er04) / Ts3)
Vm4 = P4 + i4 + D4
If (Vm4 > 5#) Then
Vm4 = 5#
ElseIf (Vm4 < -5#) Then
Vm4 = -5#

```

เอกสารนี้ **ElseIf (Vm4 < -5#) Then** ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Vm4 = -5#
End If
er04 = er4
vmi4 = 25.5 * (Vm4 - 5) + 255
Vms4 = Format(vmi4, "000")
If er4 = 0 Then
    cn5 = cn5 + 1
    cn6 = 0
Else
    cn5 = 0
    cn6 = 1
End If
Sleep (60)
If k > 0 Then
    mscmax.InputLen = 0
    Sleep (1)
    b = mscmax.Input
    rc = Mid(b, 2, 6)
    fb = Val(Format(rc, "0.00"))
    rc2 = Mid(b, 14, 6)
    fb2 = Val(Format(rc2, "0.00"))
End If
Sleep (1)
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms3
    mscmax.Output = "e"
If cn6 > 0 Then
    mscmax.Output = "s"
    mscmax.Output = Vms4
    mscmax.Output = "f"
End If
k = k + 1
If er4 = 0 And cn5 = 1 Then
    Sleep (1)
    mscmax.Output = "s127f"
End If
If er3 = 0 Then
    cn4 = cn4 + 1
Else
    cn4 = 0
End If
Loop Until er = 0 And cn >= 3 And cn2 >= 1 And er3 = 0 And cn4 >= 3 And cn5 >= 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mscmax.Output = "sk"

k = 0
i = 0
i2 = 0
i3 = 0
i4 = 0
cn = 0
cn2 = 0
cn3 = 1
cn4 = 0
cn5 = 0
cn6 = 1

If cr <= 19 Then
Timer1.Interval = 3000 - (cr * 155)
Else
Timer1.Interval = 1
End If
End If

cn7 = cn7 + 1
Text2.Text = Timer1.Interval
Text3.Text = cr
cn8 = cn8 + 1
cn9 = cn9 + 1

If 0.104 <= fb And fb <= 1.954 Then
fb1 = fb + 0.44
fb5 = (fb1 - 0.104) / 0.0233125
Elseif 1.955 <= fb And fb <= 3.648 Then
fb1 = fb + 0.2
fb5 = (fb1 - 0.25) / 0.019988
Elseif 3.649 <= fb And fb <= 5.4 Then
fb1 = fb + 0.25
fb5 = (fb1 + 0.12) / 0.02256
End If

fb6 = (fb3 - 0.1) / 0.0209348

fb5 = Val(FormatNumber(fb5, 2))
fb6 = Val(FormatNumber(fb6, 2))

Text4.Text = fb
Text5.Text = fb3
Text6.Text = fb5
Text7.Text = fb6

If cn7 = 9 Or Text1(cn8).Text = "e" Or Text1(cn9).Text = "e" Or Text1(cn8).Text = "" Or Text1(cn9).Text = "" Then

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 mscmax.Output = "sk" วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Timer1.Enabled = False
Sleep (Timer1.Interval)
Timer2.Enabled = True
End If
End Sub

```

```

Private Sub Timer2_Timer()
If cn11 = 1 Then
Sleep (1)
mscmax.Output = "sj"
ElseIf cn11 = 2 Then
Sleep (1)
mscmax.Output = "sl"
ElseIf cn11 = 3 Then
Sleep (1)
mscmax.Output = "sjl"
End If
Timer2.Enabled = False
mscmax.PortOpen = False
MsgBox "Your work has already done"
End Sub

```

ข.2 โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ในโครงงานนี้จะใช้โปรแกรมภาษาซีเป็นตัวโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมจะขอกว่าในส่วนที่สำคัญๆ ดังนี้

```

#include <16F877.h>
#fuses XT
#fuses NOPROTECT
#fuses NOLVP,NOVDT
#device ADC=10
#use delay(clock=4000000)
#use rs232(baud=19200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7)
#use fast_io(A)
#define Vbe 0.004887585532746823069403714560049
#include <stdlib.h>
int i;
int8 z;
int Vm[5];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float w;
int16 value;
float volt;
float y;
int x;
#INT_RDA
RDA_isr() {
    Vm[i]=getc();
    if (Vm[i] == 's'){
        i=0;}
    else if (Vm[i] == 'a')
    { z=1;
        Vm[i] = 0;}
    else if (Vm[i] == 'b')
    { z=2;
        Vm[i] = 0;}
    else if (Vm[i] == 'e'){
        i=0;}
    else if (Vm[i] == 'f'){
        i=0;}
    else if (Vm[i] == 'j'){
        z=5;}
    else if (Vm[i] == 'l'){
        i=0;}
    else if (Vm[i] == 'k')
    { z=7;}
    else {i++;}
}

void main(void) {
    setup_port_a(ALL_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(global);
    i=0;

    output_low(PIN_C1);
    output_High(PIN_D0);
    output_High(PIN_D1);
    output_High(PIN_D2);
    output_High(PIN_D3);
    output_High(PIN_D4);
    output_High(PIN_D5);
    output_High(PIN_D6);
    output_low(PIN_D7);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_High(PIN_B0);
output_High(PIN_B1);
output_High(PIN_B2);
output_High(PIN_B3);
output_High(PIN_B4);
output_High(PIN_B5);
output_High(PIN_B6);
output_low(PIN_B7);
do {
  if (z == 1){
    x = atoi(Vm);
    z=0;
    output_b(x);
    set_adc_channel(0);
    delay_us(10);
    value = Read_ADC();
    volt = Vbe * (float) value;
    putc('s');
    printf("\n\r%f", volt);
    putc('t');
    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
    value = Read_ADC();
    volt = Vbe * (float) value;
    putc('s');
    printf("\n\r%f", volt);
    putc('x'); }
  else if (z == 2){
    x = atoi(Vm);
    z=0;
    output_d(x); }
  else if (z == 5){
    output_high(PIN_C1);
    delay_ms(50);
    output_low(PIN_C1);
    z=0; }
  else if (z == 7){
    output_b(127);
    delay_us(10);
    output_d(127);
    z=0;
  }
}

```

เอกสารนี้เป็น **while (1);** ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คู่มือประกอบการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้

ในส่วนของภาคผนวก ก. จะอธิบายในรายละเอียด และข้อมูลที่สำคัญของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในวงจรต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้

ก.1 อุปกรณ์ในส่วนวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ ทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้กับทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ ทรานซิสเตอร์มีด้วยกัน 4 ตัว คือ TIP31C TIP32C MJ15015 และ MJ15016 ประกอบกันเป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 รายละเอียด และข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

ก.1.1 ทรานซิสเตอร์ TIP31C

ทรานซิสเตอร์ TIP31C เป็นชนิด NPN สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 5 แอมแปร์ จะเป็นตัวกระตุ้นให้กับทรานซิสเตอร์ MJ15015 ทำงาน โดยมีรายละเอียด และข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์นี้ ดังในรูปที่ ก.1

ก.1.2 ทรานซิสเตอร์ TIP32C

ทรานซิสเตอร์ TIP32C เป็นชนิด PNP สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 5 แอมแปร์ จะเป็นตัวกระตุ้นให้กับทรานซิสเตอร์ MJ15016 ทำงาน โดยมีรายละเอียด และข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์นี้ ดังในรูปที่ ก.1

ก.1.3 ทรานซิสเตอร์ MJ15015

ทรานซิสเตอร์ MJ15015 เป็นชนิด NPN สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 15 แอมแปร์ จะเป็นตัวช่วยจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ โดยมีรายละเอียด และข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์นี้ ดังในรูปที่ ก.2

ก.1.4 ทรานซิสเตอร์ MJ15016

ทรานซิสเตอร์ MJ15016 เป็นชนิด PNP สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 15 แอมแปร์ จะเป็นตัวช่วยจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ โดยมีรายละเอียด และข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์นี้ ดังในรูปที่ ก.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**TIP31A/31C
TIP32A/32B/32C**

**COMPLEMENTARY SILICON POWER
TRANSISTORS**

APPLICATION

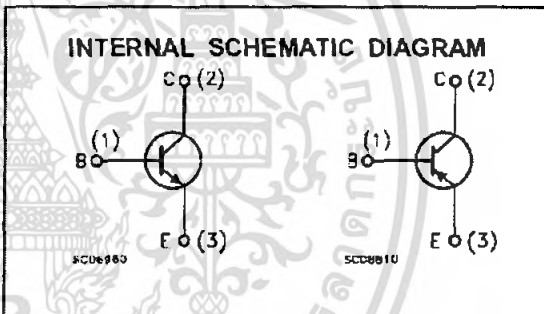
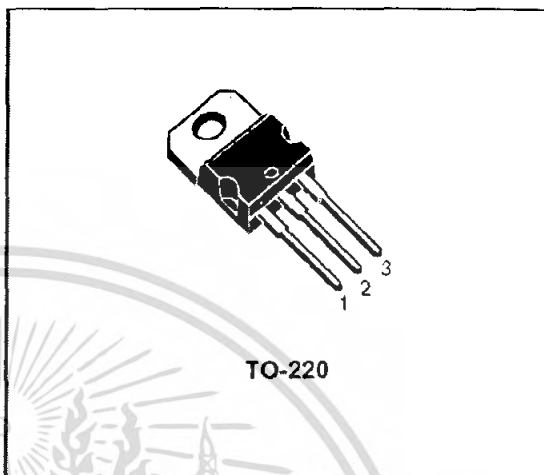
- LINEAR AND SWITCHING INDUSTRIAL EQUIPMENT

DESCRIPTION

The TIP31A and TIP31C are silicon Epitaxial-Base NPN transistors mounted in Jedec TO-220 plastic package. They are intended for use in medium power linear and switching applications.

The complementary PNP types are TIP32A and TIP32C respectively.

Also TIP32B is a PNP type.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value			Unit	
		NPN	TIP31A	TIP31C		
		PNP	TIP32A	TIP32B	TIP32C	
V _{CB0}	Collector-Base Voltage (I _E = 0)		60	80	100	V
V _{CE0}	Collector-Emitter Voltage (I _B = 0)		60	80	100	V
V _{EB0}	Emitter-Base Voltage (I _C = 0)			5		V
I _C	Collector Current			3		A
I _{CM}	Collector Peak Current			5		A
I _B	Base Current			1		A
P _{tot}	Total Dissipation at T _{case} ≤ 25 °C T _{amb} ≤ 25 °C			40		W
T _{stg}	Storage Temperature			-65 to 150		°C
T _j	Max. Operating Junction Temperature			150		°C

For PNP types voltage and current values are negative

รูปที่ ค.1 ทรานซิสเตอร์ TIP31C และ TIP32C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

 Order this document
 by 2N3055A/D

Complementary Silicon High-Power Transistors

... PowerBase complementary transistors designed for high power audio, stepping motor and other linear applications. These devices can also be used in power switching circuits such as relay or solenoid drivers, dc-to-dc converters, inverters, or for inductive loads requiring higher safe operating area than the 2N3055 and MJ2955.

- Current-Gain — Bandwidth-Product @ $I_C = 1.0$ Adc
 $f_T = 0.8$ MHz (Min) — NPN
 $= 2.2$ MHz (Min) — PNP
- Safe Operating Area — Rated to 60 V and 120 V, Respectively

*MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	2N3055A MJ2955A	MJ15015 MJ15016	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	120	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	100	200	Vdc
Collector-Emitter Voltage Base Reversed Biased	V_{CEV}	100	200	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB0}		7.0	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C		15	Adc
Base Current	I_B		7.0	Adc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	115 0.65	180 1.03	Watts W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200		°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.52	0.98	°C/W

* Indicates JEDEC Registered Data. (2N3055A)

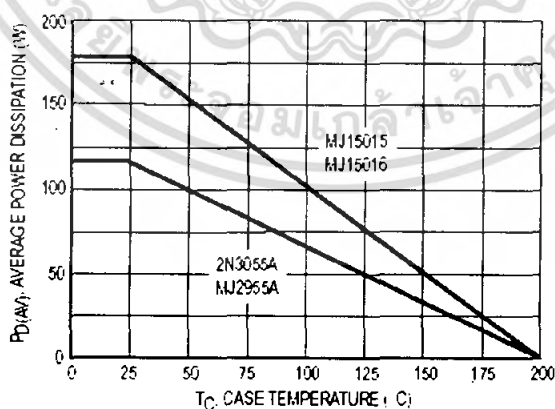


Figure 1. Power Derating

NPN
2N3055A
MJ15015*
MJ2955A
PNP
MJ15016*

*Motorola Preferred Device

15 AMPERE
COMPLEMENTARY
SILICON
POWER TRANSISTORS
60, 120 VOLTS
115, 180 WATTS



CASE 1-07
TO-204AA
(TO-3)

รูปที่ ค.2 ทรานซิสเตอร์ MJ15015 และ MJ15016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนโซลินอยด์

ได้ใช้ FET เบอร์ IRF540 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับโซลินอยด์ เป็นส่วนประกอบในวงจรขับเคลื่อนโซลินอยด์ ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งรายละเอียดของไอซีได้แสดงดังรูปที่ ค.3

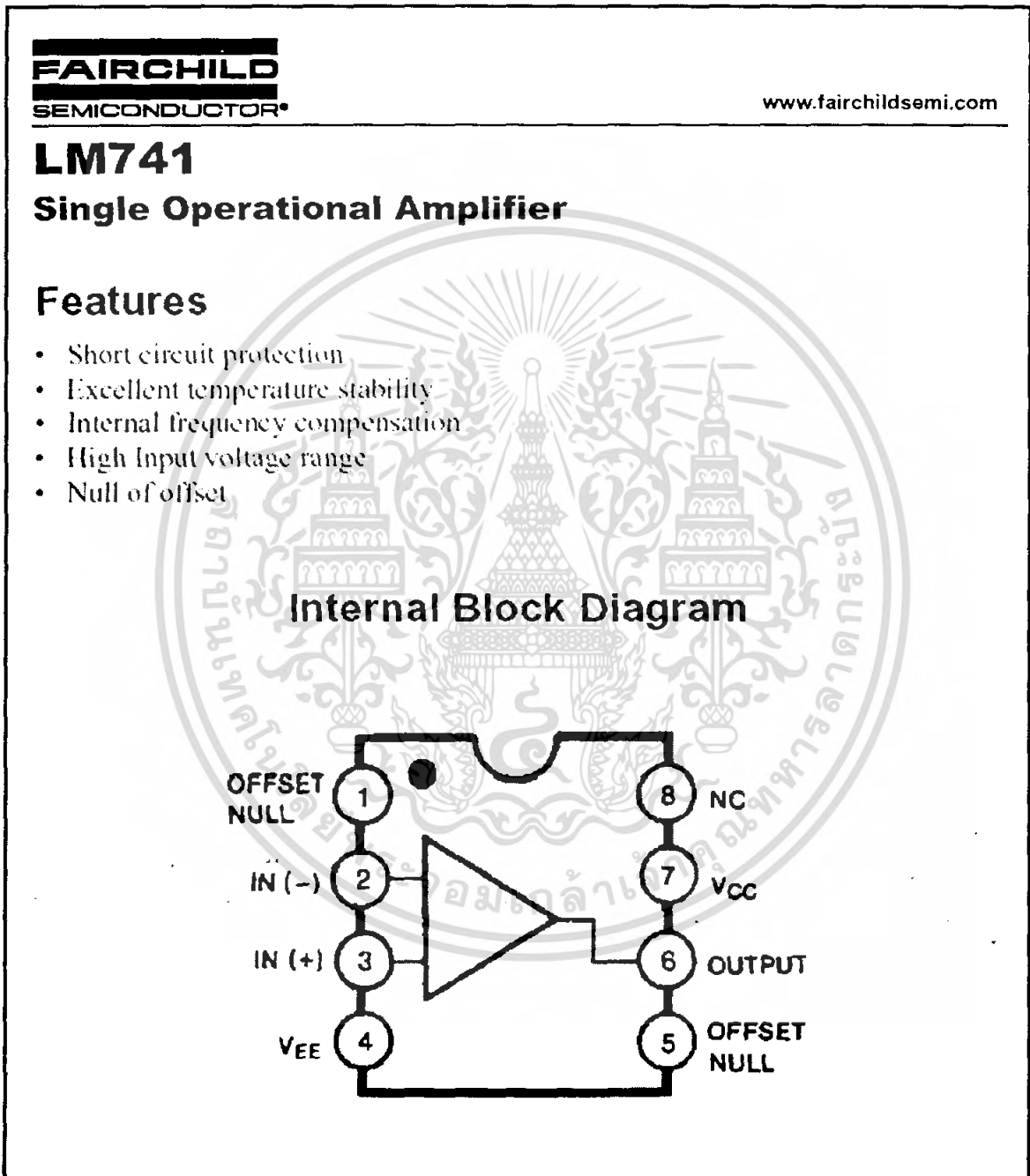
Philips Semiconductors		Product specification											
N-channel TrenchMOS™ transistor		IRF540, IRF540S											
FEATURES <ul style="list-style-type: none"> • 'Trench' technology • Low on-state resistance • Fast switching • Low thermal resistance 	SYMBOL 	QUICK REFERENCE DATA <p>$V_{DSS} = 100 \text{ V}$</p> <p>$I_D = 23 \text{ A}$</p> <p>$R_{DS(ON)} \leq 77 \text{ m}\Omega$</p>											
GENERAL DESCRIPTION N-channel enhancement mode field-effect power transistor in a plastic envelope using 'trench' technology.													
Applications:- <ul style="list-style-type: none"> • d.c. to d.c. converters • switched mode power supplies • T.V. and computer monitor power supplies 													
The IRF540 is supplied in the SOT78 (TO220AB) conventional leaded package. The IRF540S is supplied in the SOT404 (D ² PAK) surface mounting package.													
PINNING <table border="1"> <thead> <tr> <th>PIN</th> <th>DESCRIPTION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>gate</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>drain¹</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>source</td> </tr> <tr> <td>tab</td> <td>drain</td> </tr> </tbody> </table>		PIN	DESCRIPTION	1	gate	2	drain ¹	3	source	tab	drain	SOT78 (TO220AB) 	SOT404 (D²PAK)
PIN	DESCRIPTION												
1	gate												
2	drain ¹												
3	source												
tab	drain												
LIMITING VALUES Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134)													
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT								
V_{DSS}	Drain-source voltage	$T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $175 \text{ }^\circ\text{C}$	-	100	V								
V_{DGR}	Drain-gate voltage	$T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $175 \text{ }^\circ\text{C}$; $R_{GS} = 20 \text{ k}\Omega$	-	100	V								
V_{GS}	Gate-source voltage		-	± 20	V								
I_D	Continuous drain current	$T_{mb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $V_{GS} = 10 \text{ V}$	-	23	A								
		$T_{mb} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $V_{GS} = 10 \text{ V}$	-	16	A								
I_{DM}	Pulsed drain current	$T_{mb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	92	A								
P_D	Total power dissipation	$T_{mb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	100	W								
T_j, T_{stg}	Operating junction and storage temperature		-55	175	$^\circ\text{C}$								

รูปที่ ค.3 ทรานซิสเตอร์ IRF540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

ค.3 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณในโครงงานนี้ได้ใช้ไอซี LM741 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ได้ระดับที่ต้องการ ซึ่งประกอบอยู่ในวงจรขยายสัญญาณ และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ดังวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 ไอซี LM741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 อุปกรณ์ในส่วนของวงจรปรับปรุงแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ

เป็นอุปกรณ์ประเภทไอซี ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจากแรงดันอินพุตที่สูงกว่าทั้งทางซีกบวกและซีกลบ และจ่ายแรงดันเอาต์พุตคงที่ ซึ่งประกอบอยู่ในวงจรปรับปรุงแรงดันที่มีระดับแรงดันต่างๆ กัน ดังจะมีรายละเอียด และข้อมูลของไอซี ดังต่อไปนี้

ค.4.1 ไอซี LM317

ไอซี LM317 เป็นไอซีจ่ายแรงดันคงที่ทางด้านซีกบวก ซึ่งสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 1.2 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1.5 แอมแปร์ มีการใช้ไอซีเบอร์นี้ในวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 26 โวลต์ และวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 24 โวลต์ ดังวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.5

ค.4.2 ไอซี LM337

ไอซี LM337 เป็นไอซีวงจรจ่ายแรงดันคงที่ทางด้านซีกลบ ซึ่งสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ -1.2 โวลต์ ถึง -37 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1.5 แอมแปร์ มีการใช้ไอซีเบอร์นี้ในวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 26 โวลต์ และวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 24 โวลต์ ดังวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.6

ค.4.3 ไอซี LM78XX

ไอซี LM78XX เป็นไอซีวงจรจ่ายแรงดันคงที่ทางด้านซีกบวก สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1 แอมแปร์ มีการใช้ไอซีดังกล่าวเบอร์ LM7815 เป็นส่วนประกอบในวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 15 โวลต์ และเบอร์ LM7805 เป็นส่วนประกอบในวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 5 โวลต์ ดังวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.7

ค.4.4 ไอซี LM79XX

ไอซี LM79XX เป็นไอซีวงจรจ่ายแรงดันคงที่ทางด้านซีกลบ สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1 แอมแปร์ มีการใช้ไอซีดังกล่าวเบอร์ LM7915 เป็นส่วนประกอบในวงจรปรับปรุงแรงดัน ± 15 โวลต์ ดังวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 ซึ่งรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.8



LM117/217
LM317

1.2V TO 37V VOLTAGE REGULATOR

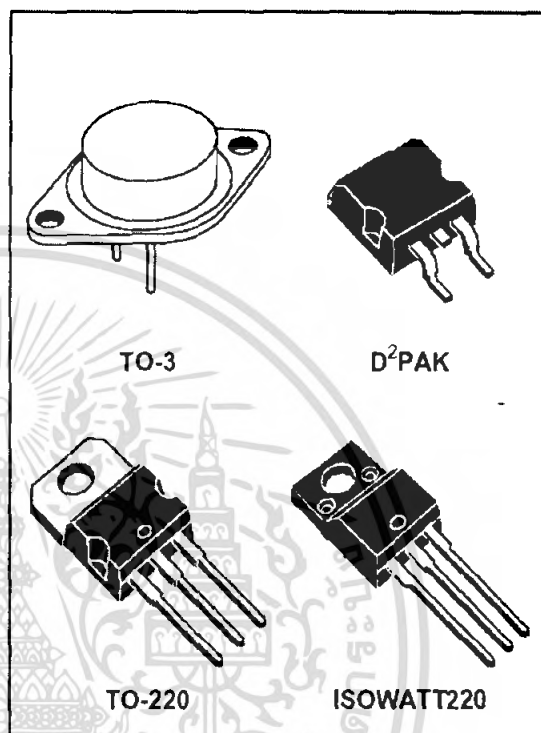
- OUTPUT VOLTAGE RANGE : 1.2 TO 37V
- OUTPUT CURRENT IN EXCESS OF 1.5A
- 0.1% LINE AND LOAD REGULATION
- FLOATING OPERATION FOR HIGH VOLTAGES
- COMPLETE SERIES OF PROTECTIONS : CURRENT LIMITING, THERMAL SHUTDOWN AND SOA CONTROL

DESCRIPTION

The LM117/LM217/LM317 are monolithic integrated circuit in TO-220, ISOWATT220, TO-3 and D²PAK packages intended for use as positive adjustable voltage regulators.

They are designed to supply more than 1.5A of load current with an output voltage adjustable over a 1.2 to 37V range.

The nominal output voltage is selected by means of only a resistive divider, making the device exceptionally easy to use and eliminating the stocking of many fixed regulators.



ABSOLUTE MAXIMUM RATING

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{i-o}	Input-output Differential Voltage	40	V
I_o	Output Current	Internally Limited	
T_{op}	Operating Junction Temperature for: LM117 LM217 LM317	-55 to 150 -25 to 150 0 to 125	°C °C °C
P_{tot}	Power Dissipation	Internally Limited	
T_{stg}	Storage Temperature	- 65 to 150	°C

THERMAL DATA

Symbol	Parameter		TO-3	TO-220	ISOWATT220	D ² PAK	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max	4	3	4	3	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max	35	50	60	62.5	°C/W

รูปที่ ค.5 ไอซี LM317

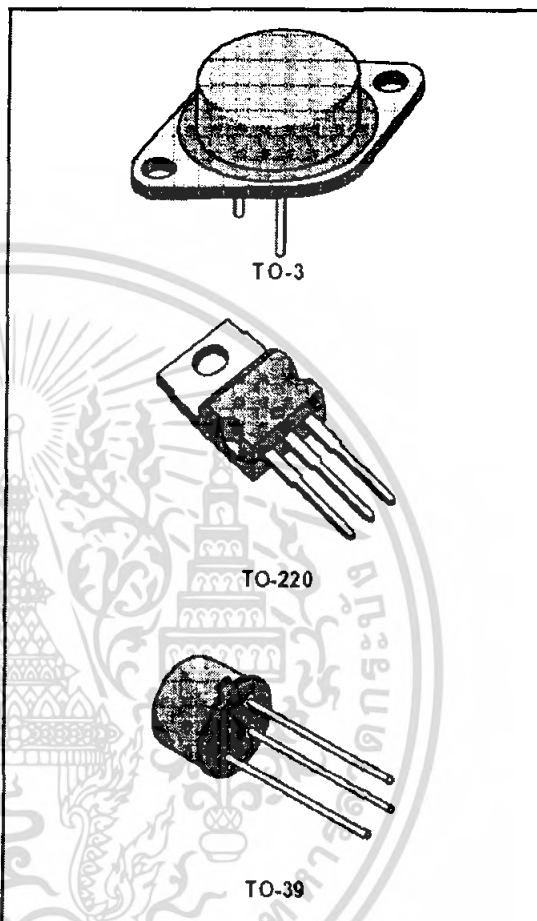
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THREE-TERMINAL ADJUSTABLE
NEGATIVE VOLTAGE REGULATORS**

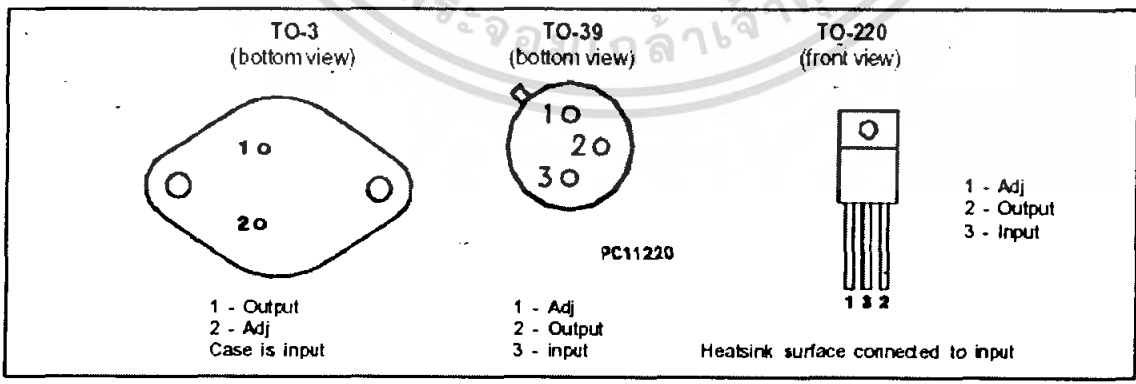
- OUTPUT VOLTAGE ADJUSTABLE DOWN TO V_{ref}
- 1.5A GUARANTEED OUTPUT CURRENT
- 0.3%/V TYPICAL LOAD REGULATION
- 0.01%/V TYPICAL LINE REGULATION
- CURRENT LIMIT CONSTANT WITH TEMPERATURE
- RIPPLE REJECTION: 77dB
- STANDARD 3-LEAD TRANSISTOR PACKAGES
- EXCELLENT THERMAL REGULATION: 0.002%/V
- 50ppm/°C TEMPERATURE COEFFICIENT

DESCRIPTION

The LM137 series are adjustable 3-terminal negative voltage regulators capable of supplying in excess -1.5A over a -1.2 to -37V output voltage range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, LM137 regulators are supplied in standard transistor packages which are easily mounted and handled. In addition to higher performance than fixed regulators, the LM137 series offer full overload protection available only in integrated circuits. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.



PIN CONNECTIONS



รูปที่ ก.6 ไอซี LM337

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

LM78XX

Series Voltage Regulators

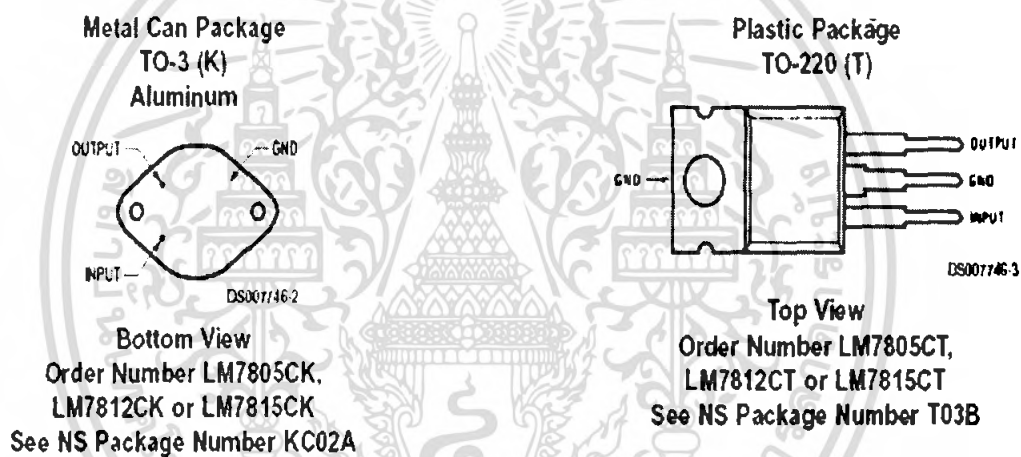
Features

- Output current in excess of 1A
- Internal thermal overload protection
- No external components required
- Output transistor safe area protection
- Internal short circuit current limit
- Available in the aluminum TO-3 package

Voltage Range

LM7805C	5V
LM7812C	12V
LM7815C	15V

Connection Diagrams



รูปที่ ก.7 ไอซี LM78XX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

General Description

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of -5V, -12V, and -15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a

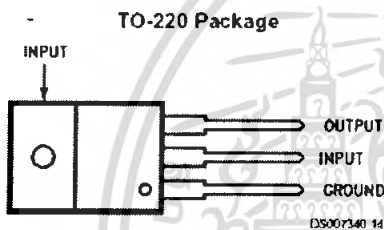
resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For applications requiring other voltages, see LM137 datasheet.

Features

- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 1.5A output current
- 4% tolerance on preset output voltage

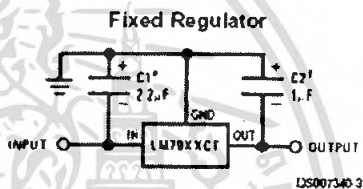
Connection Diagrams



Front View

Order Number LM7905CT, LM7912CT or LM7915CT
See NS Package Number TO3B

Typical Applications



*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted.


†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

รูปที่ ก.8 ไอซี LM79XX

ค.5 อุปกรณ์ตัวควบคุม

ได้ใช้ไอซี PIC16F877 เป็นตัวควบคุมแขนกลตีฆ้องวงใหญ่ในโครงการนี้ ซึ่งรายละเอียดของไอซีนี้ได้แสดงดังรูปที่ ค.9



PIC16F87X

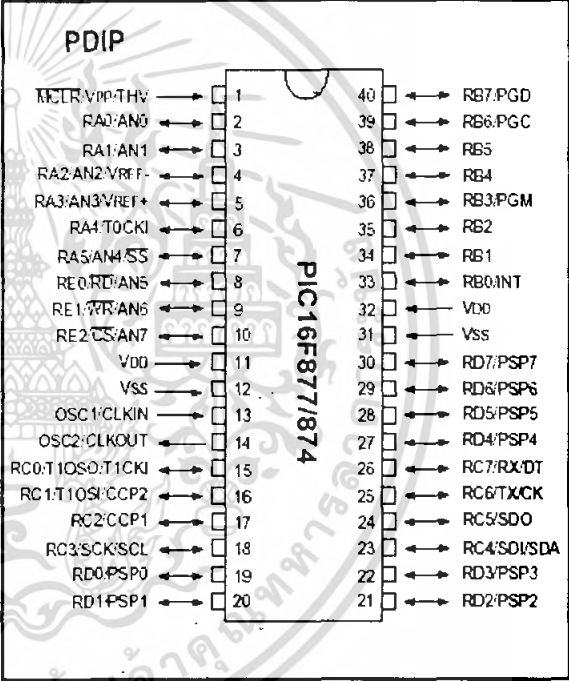
28/40-pin 8-Bit CMOS EEPROM/Flash Microcontrollers

Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
- Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns. Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns, PWM max. resolution is 10-bit
- ★ • 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- ★ • Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master Mode) and I²C™ (Master/Slave)
- ★ • Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address deflection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

Pin Diagram

PDIP



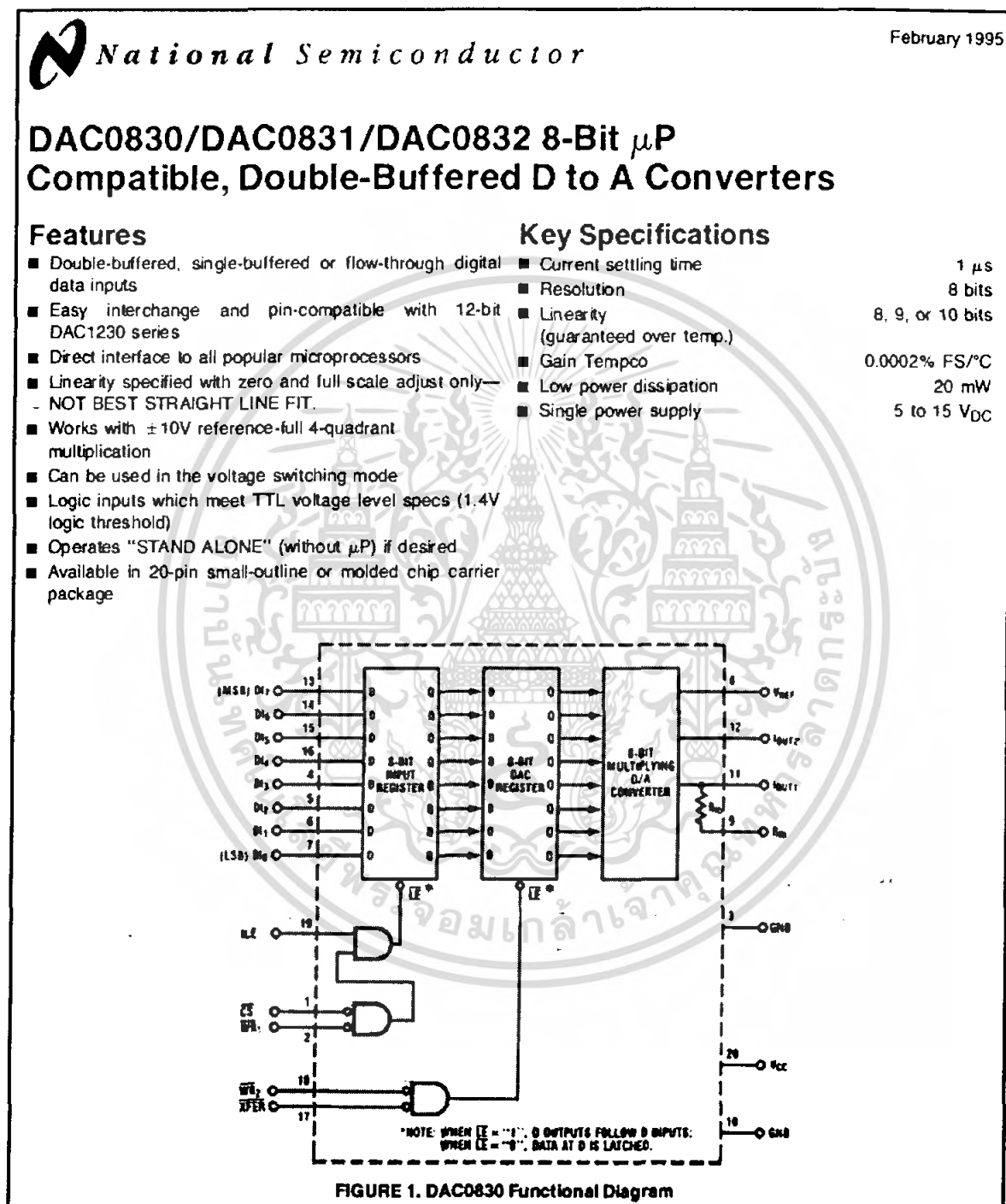
MCU/VPP/THV	1	40	RB7/PGD
RA0/AN0	2	39	RB6/PGC
RA1/AN1	3	38	RB5
RA2/AN2/VREF-	4	37	RB4
RA3/AN3/VREF+	5	36	RB3/PGM
RA4/T0CKI	6	35	RB2
RA5/AN4/SS	7	34	RB1
RE0/RD/AN5	8	33	RB0/INT
RE1/WR/AN6	9	32	VDD
RE2/CS/AN7	10	31	VSS
VDD	11	30	RD7/PSP7
VSS	12	29	RD6/PSP6
OSC1/CLKIN	13	28	RD5/PSP5
OSC2/CLKOUT	14	27	RD4/PSP4
RC0/T1OSO/T1CKI	15	26	RC7/RX/DT
RC1/T1OSI/CCP2	16	25	RC6/TX/CK
RC2/CCP1	17	24	RC5/SDO
RC3/SCK/SCL	18	23	RC4/SOI/SDA
RD0/PSP0	19	22	RD3/PSP3
RD1/PSP1	20	21	RD2/PSP2

รูปที่ ค.9 ไอซี 16F877

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

ในโครงการนี้ใช้ไอซี DAC0832 ขนาด 8 บิต เป็นส่วนประกอบในวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ซึ่งรายละเอียดของไอซีได้แสดงดังรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10 ไอซี DAC0832

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของลูกม้อ่ง

ในการควบคุมให้แขนกลสามารถตีลูกม้อ่งได้ถูกต้องนั้น ได้อาศัยอุปกรณ์วัดในการระบุตำแหน่งลูกม้อ่ง ในภาคผนวก ง. นี้ แสดงรายละเอียดของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของลูกม้อ่ง ซึ่งได้จากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับตำแหน่งลูกม้อ่งจริงซึ่งมีอยู่ทั้งสิ้น 16 ลูก ดังผลในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของลูกม้อ่ง

ลูกม้อ่งที่	ค่าแรงดันไฟฟ้าในส่วน หมุนแขน		ค่าแรงดันไฟฟ้าในส่วน ยึดและหดแขน	
	แขนบน	แขนล่าง	แขนบน	แขนล่าง
1	-	0.2	-	4
2	0.2	0.54	4.7	4.7
3	0.62	0.88	4.7	4.7
4	1.05	1.22	4.7	4.7
5	1.45	1.56	4.2	4
6	1.82	1.90	3	3.5
7	2.19	2.24	3	2
8	2.54	2.58	2.5	2
9	2.88	2.92	2.5	2
10	3.21	3.26	4.3	4
11	3.56	3.60	4.3	4
12	4.02	3.94	4.7	4.5
13	4.3	4.28	4.7	4.7
14	4.65	4.62	4.7	4.7
15	4.85	4.96	4.7	4.7
16	4.99	-	3.6	-

หมายเหตุ : ลูกม้อ่งสามารถเลื่อนตามรางลูกม้อ่งได้ในระดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้