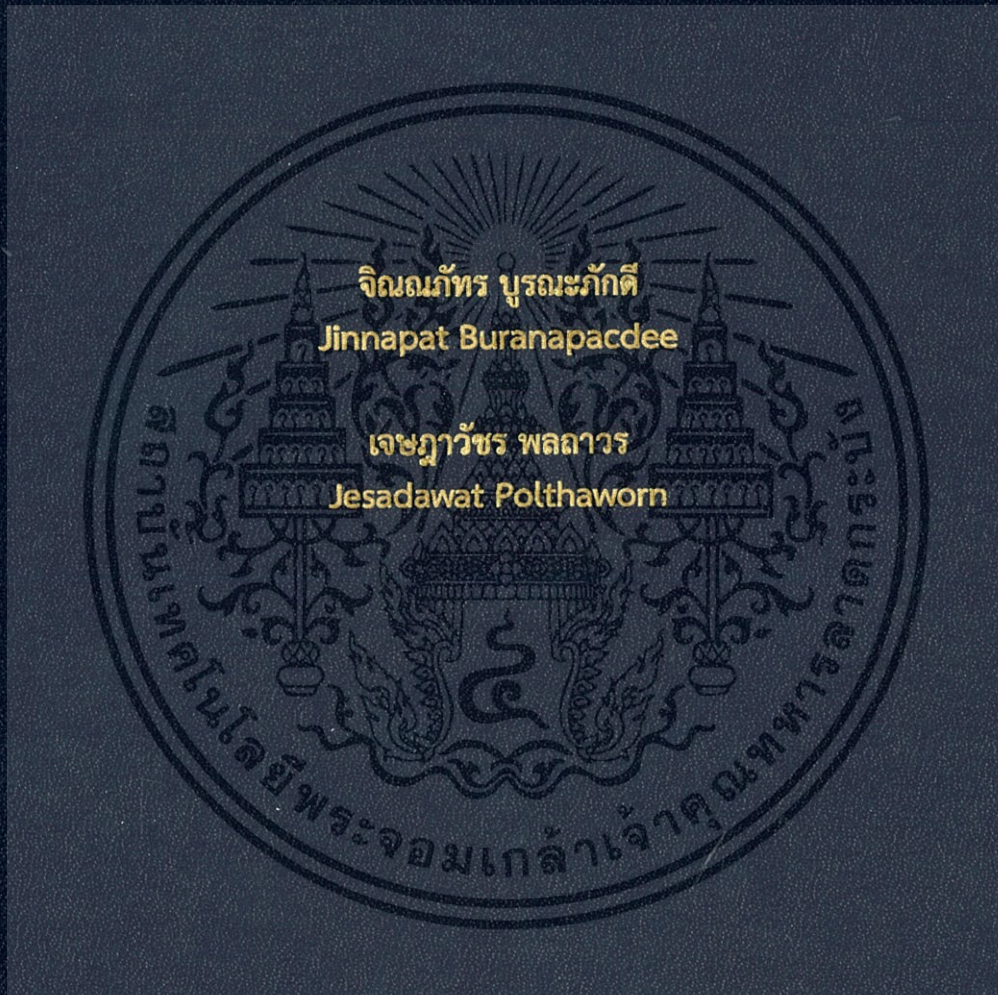


ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง
CRACK DETECT SYSTEM FOR FUEL TANK



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง

CRACK DETECT SYSTEM FOR FUEL TANK



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง

CRACK DETECT SYSTEM FOR FUEL TANK



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังก๊าซ

Crack detect system for fuel tank

ผู้จัดทำ นายจิณณภัทร บุรณะภักดี 56010172

นายเจษฎาวัชร พลถาวร 56010224

รายงานนี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง

นักศึกษา นาย จินณภัทร บุรณะภักดี รหัสประจำตัว 56010172
 นาย เจษฎาวัตร พลถาวร รหัสประจำตัว 56010224

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รศ. ขนิษฐา แซ่ตั้ง

บทคัดย่อ

ระบบขับเคลื่อนเพื่อตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง เป็นระบบที่ใช้ขับเคลื่อนหัวตรวจสอบคุณภาพของถังเชื้อเพลิงโดยใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการขับหมุนตัวถังเชื้อเพลิงเพื่อให้เซ็นเซอร์หัววัดกวาดรอบถังและใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ อีกตัวในการเลื่อนหัววัดสำหรับตรวจสอบเพื่อให้ตรวจสอบตัวถังทั้งหมด ในการตรวจสอบมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อะดุยโน เป็นตัวควบคุมการทำงานและส่งค่าไปยังวงจรถับมอเตอร์ และแสดงผลตำแหน่งรอยร้าวในคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crack detect system for fuel tank

Student	Mr.Jinnapat Buranapakdee	Student ID 56010172
	Mr.Jessadawat Polthaworn	Student ID 56010224
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Electronics Engineering	
Year	2016	
Project Advisor	Assoc. Khanittha Saetang	

ABSTRACT

This crack detect system is use for fuel or gas tank. We use step motor to move the crack detector sensor probe. To examine the tank we use the sensor probe and control its movement by using Arduino micro controller board. For examine the whole tank we use DC motor with encoder to move the tank turn around. Finally the C language will be used to display for the result about the cracking point and the tank that has a problem in computer.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
บทคัดย่อภาษาไทย.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการของระบบตรวจสอบรอยร้าว.....	2
2.1 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	2
2.2 สเต็ปป์มอเตอร์.....	3
2.2.1 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์.....	4
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	6
2.3.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	6
2.4 ตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์.....	8
2.5 วงจรขับมอเตอร์ ULN2003	9
2.6 วงจรขับมอเตอร์ L298	10
2.6.1 การจัดขาของวงจรขับมอเตอร์ L298	10
2.7 ตัวเข้ารหัสมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การแบ่งตัวเข้ารหัสตามโครงสร้างการใช้งาน.....	12
2.7.2 การแบ่งตามโครงสร้างของตัวเข้ารหัส.....	13
2.7.3 การแบ่งตามแกนหมุนตัวเข้ารหัสแบบพิเศษ.....	14
2.8 โปรแกรม Microsoft Visual Studio.....	14
2.9 โปรแกรม Microsoft Visual Blend.....	15
บทที่ 3 หลักการออกแบบ.....	16
3.1 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์.....	16
3.2 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor).....	17
3.3 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ (Stepper Motor).....	18
3.4 คำสั่งการควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	19
3.5 ส่วนการแสดงผล.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	22
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	26
เอกสารอ้างอิง.....	27
ภาคผนวก.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น แบบรางเดี่ยว.....	2
รูปที่ 2.2 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น แบบรางคู่.....	3
รูปที่ 2.3 Stepper motor.....	3
รูปที่ 2.4 การทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	4
รูปที่ 2.5 ขดลวดภายในสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์และยูนิโพลาร์.....	5
รูปที่ 2.6 ขดลวดภายในสเต็ปปีงมอเตอร์ยูนิโพลาร์แบบ 6 สาย.....	6
รูปที่ 2.7 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบอนุกรม.....	7
รูปที่ 2.8 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบขนาน.....	7
รูปที่ 2.9 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบผสม.....	8
รูปที่ 2.10 วงจร ULN2003.....	9
รูปที่ 2.11 วงจร L298.....	10
รูปที่ 2.12 การจัดขาของวงจร L298.....	10
รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของตัวเข้ารหัส.....	11
รูปที่ 2.14 สัญญาณพัลส์ที่เกิดจาก ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนที่ให้ค่าเพิ่มขึ้น.....	12
รูปที่ 2.15 สัญญาณเอ๊าท์พุทของตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์.....	13
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ Rotary Optical Encoder.....	13
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของตัวเข้ารหัสวงล้อแบบใช้สนามแม่เหล็ก.....	14
รูปที่ 3.1 การต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง.....	18
รูปที่ 3.2 การต่อวงจรขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	19
รูปที่ 3.3 อัลกอริทึมการทำงานของมอเตอร์.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 อินเตอร์เฟสของโปรแกรมในส่วนของการสั่งใช้งาน.....	21
รูปที่ 3. 5 อินเตอร์เฟสของโปรแกรมในส่วนของการแสดงผล.....	21
รูปที่ 4.1 Pulse เมื่อควบคุมความเร็ว 10 rpm.....	25
รูปที่ 4.2 Pulse เมื่อควบคุมความเร็ว 3.5 rpm.....	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที.....	22
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ.....	22
ตารางที่ 4.3 จำนวน pulse ที่นับได้ใน 1 รอบ.....	23
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที.....	23
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ.....	24
ตารางที่ 4.6 จำนวน pulse ที่นับได้ใน 1 รอบ.....	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในแหล่งอุตสาหกรรมที่สำคัญของภูมิภาคเอเชีย สิ่งหนึ่งที่ขาดไม่ได้ในโรงงานอุตสาหกรรมคือ เชื้อเพลิงที่ต้องนำไปใช้ในการขับเคลื่อนระบบการผลิต ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ มักไม่ได้อยู่ในรูปของแข็ง แต่มักอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซ การขนส่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ จึงต้องมีบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้คือ ถังเชื้อเพลิง โดยถังเชื้อเพลิงเหล่านี้ มักผลิตจากเหล็กเพื่อความแข็งแรงและทนทาน แต่ถ้าหากถังเหล่านี้ไม่ได้คุณภาพ เช่น มีรอยร้าวภายใน ก็อาจเกิดอุบัติเหตุในระหว่างกระบวนการขนถ่ายหรือ ขนส่งซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

ในปัจจุบัน นักประดิษฐ์ได้สามารถสร้างเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิงเหล่านี้ได้สำเร็จแล้ว แต่เครื่องมือเหล่านี้ มีราคาที่สูง และจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ผู้ทำโครงการ จึงมีความคิดที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งสามารถตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิงได้ โดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ทั่วไป เพื่อเป็นการลดต้นทุน และเพื่อให้สามารถนำโครงการนี้ไปต่อยอดเพื่อยกระดับคุณภาพให้สูงขึ้นไปอีกขั้น จนสามารถผลิตเครื่องมือเหล่านี้ใช้งานได้เองภายในประเทศ โดยไม่ต้องพึ่งการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งจะเป็นการลดเม็ดเงินที่รั่วไหลออกนอกประเทศ นอกจากนี้ยังเป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจภายในประเทศอีกด้วย

บทที่ 2

หลักการของระบบตรวจสอบรอยร้าวถึงเก็บเชื้อเพลิง

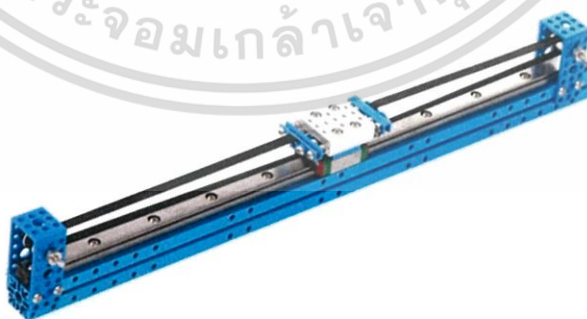
ในระบบที่ได้ออกแบบไว้จำเป็นต้องมีส่วนของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนได้รอบทิศและมอเตอร์ที่กวาดเซ็นเซอร์ได้ครบถ้วนจึงจำเป็นต้องมี มอเตอร์ทั้งหมดสองชุดเพื่อกวาดเซ็นเซอร์ในแนวตั้งและมอเตอร์หมุนตัวถัง และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ อะคูยโน้ เพื่อนำมาประมวลผลรวมถึงการควบคุมการหมุนของมอเตอร์และสุดท้ายคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แสดงผล

2.1 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion)

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมต่างๆ ได้หันมาใช้เครื่องจักรกลที่ทำงานแบบอัตโนมัติ เช่น อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน เครื่องประกอบชิ้นงาน โดยเครื่องจักรเหล่านี้ หากต้องการให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการผลิต จำเป็นต้องมีชุดควบคุมที่มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ และสามารถเชื่อถือได้

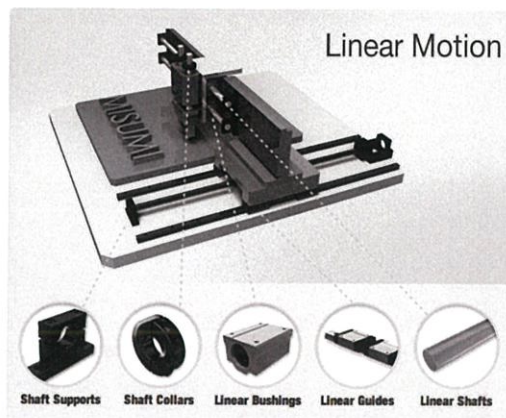
กล่าวคือ เครื่องจักรกลที่ทำงานอัตโนมัติเหล่านี้ จะต้องมีชุดควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง แม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งในอุปกรณ์สมัยใหม่เหล่านี้ จะมีอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย ระบบควบคุม และ ระบบกลไกการเคลื่อนที่ ใช้ในการเลื่อนชิ้นงาน หรือ เลื่อนแท่นวางชิ้นงาน โดยอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบกลไกการเคลื่อนที่นี้ เรียกว่า ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

ปัจจุบันทั้งผู้ผลิตเครื่องจักรและผู้ใช้งานเครื่องจักร นิยมใช้ การเคลื่อนที่เชิงเส้นมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ราคาของอุปกรณ์ที่ไม่แพง อีกทั้งประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าชนิดเดิม รวมถึงการหาอุปกรณ์เปลี่ยนได้ง่าย ซึ่งในโครงการนี้ ได้นำหลักการของการเคลื่อนที่เชิงเส้น มาใช้ในการควบคุมส่วนของมอเตอร์และสายพาน เพื่อให้การเลื่อนตำแหน่งของตัวหัววัด สามารถควบคุมได้ง่ายและมีความแม่นยำ



รูปที่ 2.1 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น แบบรางเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



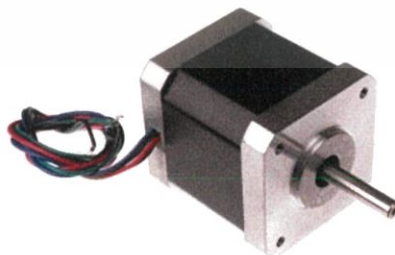
รูปที่ 2.2 ระบบเคลื่อนที่เชิงเส้น แบบรางคู่

2.2 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

สเต็ปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์หนึ่งซึ่งสามารถนำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ มาทำการควบคุมได้สะดวก และเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานควบคุมการหมุน ที่ต้องการตำแหน่ง และทิศทางที่แน่นอน การทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้นๆ ละ (Step) 0.9, 1.8, 5, 7.5, 15 หรือ 50 องศา ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแต่ละชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ตัวนั้นๆ สเต็ปป์มอเตอร์จะแตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป โดยการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะหมุนไปแบบต่อเนื่อง ไม่สามารถหมุนเป็นแบบสเต็ปๆ ได้ดังนั้นในการนำไปกำหนดตำแหน่งจึงควบคุมได้ยากกว่า แต่ในส่วนใหญ่เราจะใช้สเต็ปป์มอเตอร์มาทำการการควบคุมโดยใช้วิธีในระบบดิจิทัล เช่น เครื่องพิมพ์ (Printer) พล็อตเตอร์ (X-Y Plotter) ตัวขับแผ่นดิสก์ (Disk drive) ฯลฯ

ข้อดีของสเต็ปป์มอเตอร์เมื่อเปรียบกับมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)

1. การควบคุมไม่ต้องอาศัยตัวตรวจจับการหมุน
2. ไม่ต้องใช้แปรงถ่าน ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีส่วนที่จะต้องสึกหรอ และปัญหาของการสปาร์ค (ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของแหวนตัวนำแปรงถ่านในโรเตอร์) ที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน
3. การควบคุมโดยทางวงจรถิจิตอลหรือไมโครโพรเซสเซอร์ ทำได้ง่าย และสะดวก

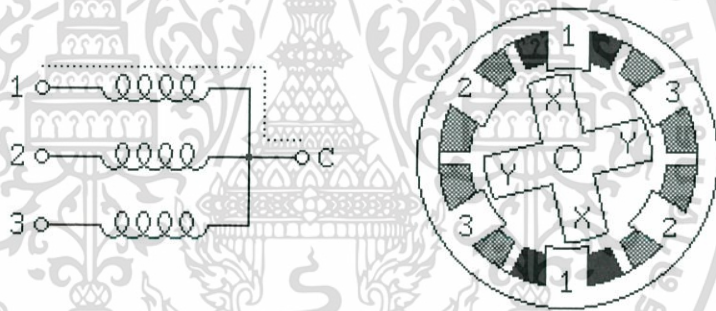


รูปที่ 2. 3 Stepper motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์

สตีปิ้งมอเตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนเช่นเดียวกับมอเตอร์ทั่วไป คือ 1. โรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ และ 2.คือ สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยที่ส่วนที่เป็นสเตเตอร์ของสตีปิ้งมอเตอร์นี้จะเป็นส่วนซึ่งมีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกนเหล็ก(หมายเลข 1,2,3 ที่เป็นส่วนนอกของสตีปิ้งมอเตอร์ คือ สเตเตอร์) เมื่อเราจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ที่ขด 1 ก่อน ก็จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่ง 1 นี้ และผลักให้โรเตอร์ (ส่วน x-y คือ โรเตอร์) เกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่นี้เรียกว่า การเคลื่อนที่ไป 1 สเต็ป ซึ่งการที่มอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับความสามารถของสตีปิ้งมอเตอร์ตัวนั้น ว่าสามารถที่จะหมุนได้สเต็ปละกี่องศา และต่อไปถ้าเราหยุดจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 1 และไปจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 2 แทนก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณ 2 บนสเตเตอร์ และจะทำให้สนามแม่เหล็กนี้ผลักโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ ถ้าหยุดจ่ายกระแสเข้าขดลวดที่ 2 และไปจ่ายเข้าขดลวดที่ 3 แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่บริเวณ 3 และผลักให้โรเตอร์เคลื่อนที่ต่อไปได้อีก จะเห็นว่าสตีปิ้งมอเตอร์นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จากหลักการของการจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดบนสเตเตอร์ในลักษณะที่จ่ายไฟให้เกิดแบบ ลำดับเฟสกันไป ซึ่งเป็นหลักการของการควบคุมสตีปิ้งมอเตอร์



รูปที่ 2. 4 การทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์

2.2.1 ชนิดของสตีปิ้งมอเตอร์

ในปัจจุบัน ได้มีการผลิตสตีปิ้งมอเตอร์ออกมาหลายชนิด โดยชนิดของสตีปิ้งที่มีในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ ดังนี้

1.แบบแม่เหล็กถาวร (PERMANENT MAGNET-PM)

สตีปิ้งมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร จะมีสเตเตอร์ที่พันขดลวดไว้หลายๆ โพล โดยมีโรเตอร์เป็นรูปทรงกระบอกฟันเลื่อย และโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร เพื่อป้อนไฟกระแสตรง ให้กับขดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ผลักต่อโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุน มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร จะเกิดแรงดูดยึดให้โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม้จะไม่ได้ป้อนไฟเข้าขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

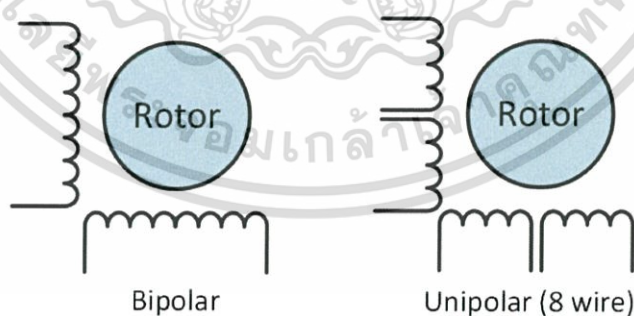
2. แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (VARIABLE RELUCTANCE-VR)

สเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ จะมีการหมุนโรเตอร์ได้อย่างอิสระ แม้จะไม่ได้จ่ายไฟให้ โดยโรเตอร์ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก กำลังอ่อน มีลักษณะเป็นฟันเลื่อยรูปทรงกระบอก โดยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะไปหมุนโรเตอร์ ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำที่สุด ตำแหน่งที่จะเกิดมีความแน่นอนและมีเสถียรภาพ แต่จะเกิดขึ้นได้หลายจุด ดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่างๆในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์หมุนไปตำแหน่งต่างๆกัน โรเตอร์ของสเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ จะมีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อยจึงมีความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

3. แบบผสม (HYBRID-H)

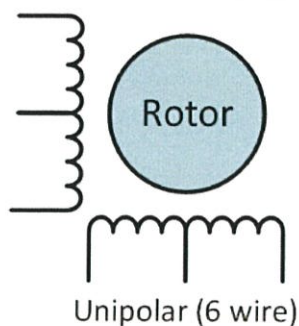
สเต็ปมอเตอร์แบบผสม เป็นการรวมกันของสเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์และแบบแม่เหล็กถาวร โดยจะมีสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ในสเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ โดยโรเตอร์จะมีหมวกหุ้ม ปลายซึ่งมีลักษณะของสารแม่เหล็กที่มีกำลังสูง โดยการควบคุมขนาดรูปร่างของหมวกแม่เหล็กอย่างดีทำให้ได้มุม การหมุน และครั้งน้อยและแม่นยำ ข้อดีก็คือ ให้แรงบิดสูงมีขนาดกระทัดรัด และให้แรงดูดยึดโรเตอร์นิ่งกับที่ตอนไม่จ่ายไฟ

นอกจากนี้สเต็ปมอเตอร์นั้น ยังสามารถแบ่งตามการต่อขดลวดภายในได้ 2 แบบ ได้แก่แบบ ไบโพลาร์ และยูนิโพลาร์ ซึ่งมีความแตกต่างกันคือ แบบไบโพลาร์ ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะไม่มีจุดร่วม ในขณะที่แบบยูนิโพลาร์ ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะมีจุดร่วม โดยสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ เป็นแบบ 6 wire Unipolar ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้ มีข้อดีคือสามารถใช้งานได้ค่อนข้างประสงค์ เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น สี่เฟสขั้วเดี่ยว (4-Phase Unipolar), สองเฟสขั้วคู่อนุกรม (2-Phase Series Bipolar), สองเฟสสองขั้วคู่ขนาน (2-Phase Parallel Bipolar)



รูปที่ 2. 5 ขดลวดภายในสเต็ปมอเตอร์แบบไบโพลาร์และยูนิโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ขดลวดภายในสเต็ปป์มอเตอร์ยูนิโพลาร์แบบ6สาย

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นมอเตอร์ที่ต้องใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Source) เป็นมอเตอร์แบบเบื่องตันที่ถูกผลิตมาใช้งาน และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เป็นมอเตอร์ที่ต้องใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Source) มอเตอร์ชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากมอเตอร์กระแสตรง เพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย แม่เหล็กถาวร 2 ขั้ววางอยู่ระหว่างขดลวดตัวนำ ขดลวดตัวนำจะได้รับแรงดันไฟตรงป้อนให้ในการทำงาน ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก 2 ขั้ว มีขั้วแม่เหล็กเหมือนกันวางใกล้กัน เกิดแรงผลักดันทำให้ขดลวดตัวนำหมุนเคลื่อนที่ได้

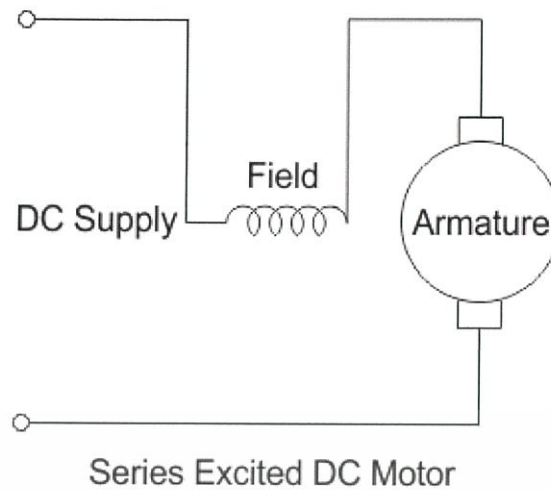
2.3.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำแนกตามโครงสร้างได้ 3 ชนิด ดังนี้

1. มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแส แบบอนุกรม หรือซีรี่ส์มอเตอร์ คือมอเตอร์ที่ต่อขดลวดฟิลด์อนุกรมกับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ เราเรียกขดลวดฟิลด์ชนิดนี้ว่า ซีรี่ส์ฟิลด์ (Series Field) ซึ่งซีรี่ส์ฟิลด์เป็นตัวสร้าง สนามแม่เหล็กขึ้นมาเพื่อทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยขดลวดฟิลด์ของ มอเตอร์แบบ อนุกรมจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ พันขั้วแม่เหล็กไว้ในจำนวนน้อยรอบ เนื่องจากการที่ขดลวดมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นในขณะเริ่มหมุน จะกินกระแสไฟฟ้ามากทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง และความเร็วยรอบของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับโหลดของมอเตอร์ ถ้าโหลดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงด้วย กล่าวคือมอเตอร์แบบอนุกรมจะหมุนรอบสูงถ้าโหลดของมอเตอร์ต่ำและจะหมุนรอบต่ำถ้าโหลดของมอเตอร์สูง

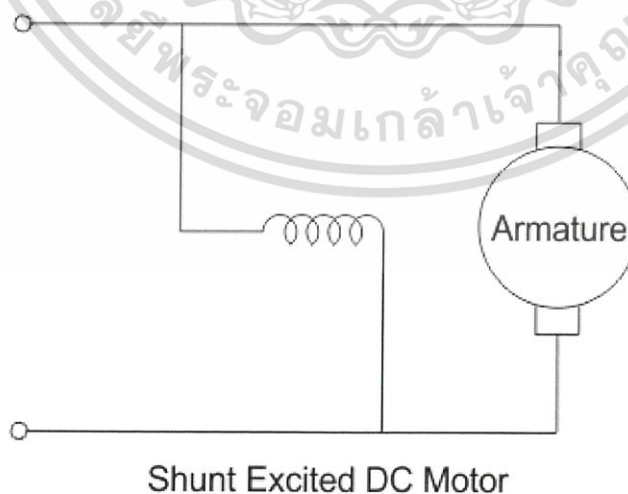
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบอนุกรม

2.มอเตอร์แบบขนานหรือชันท่อมอเตอร์ (Shunt Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน หรือเรียกว่าชันท่อมอเตอร์ คือมอเตอร์ที่มีขดลวดฟิลด์ (Field Coil) ต่อแบบขนานกับขดลวดอาร์เมเจอร์ ค่าความต้านทานของขดลวดฟิลด์มีค่าสูงมากและต่อคร่อมไว้โดยตรงกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์มีค่าคงที่โดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามรอบการหมุนของมอเตอร์เหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดฟิลด์ของมอเตอร์แบบอนุกรม ดังนั้นจะเห็นว่าแรงบิดของมอเตอร์มอเตอร์แบบขนานจะเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์เท่านั้น และแรงบิดขณะเริ่มหมุนจะมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์แบบอนุกรม รวมทั้งความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยขณะโหลดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง และเมื่อนำโหลดของมอเตอร์ออกทั้งหมด มอเตอร์จะมีความเร็วรอบสูงกว่าขณะมีโหลดเพียงเล็กน้อย

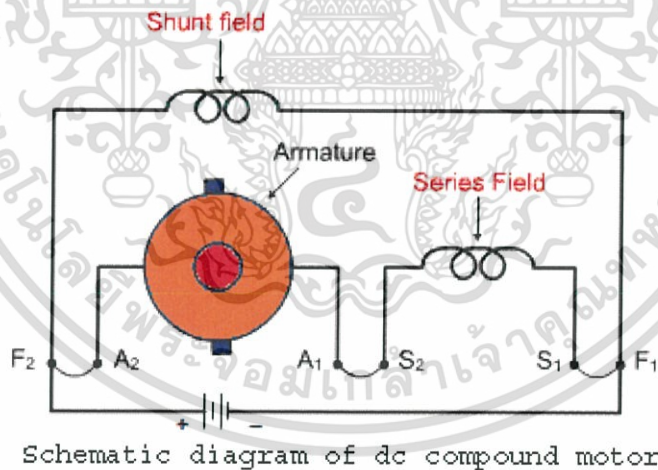


รูปที่ 2.8 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.มอเตอร์ไฟฟ้าแบบผสม (Compound Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม หรือเรียกว่าคอมพาวด์มอเตอร์ คือมอเตอร์ที่มีขดลวดฟิลด์ 2 ชุด โดยชุดหนึ่งจะต่ออนุกรม และอีกชุดหนึ่งต่อขนานกับชุดขดลวดอาร์เมเจอร์ ขดลวดฟิลด์ซึ่งต่อขนาน เป็นลวดตัวนำขนาดเล็กพันไว้จำนวนมากรอบ ส่วนขดลวดฟิลด์ที่ต่ออนุกรมอยู่จะเป็นลวดตัวนำขนาดใหญ่ พันไว้จำนวนน้อยรอบ แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์แบบผสมจะมีมากกว่ามอเตอร์แบบขนาน แต่น้อยกว่าของมอเตอร์อนุกรมและการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะมีโหลด จะมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์แบบอนุกรมแต่เปลี่ยนแปลงมากกว่ามอเตอร์แบบขนาน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมนี้ จะนำคุณลักษณะที่ดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบขนาน และแบบอนุกรมมารวมกัน มอเตอร์แบบผสมมีคุณลักษณะพิเศษคือมีแรงบิดสูง (High starting torque) แต่ความเร็วรอบคงที่ตั้งแต่ยังไม่มียุติโหลดกระทั่งมีโหลดเต็มที่ มอเตอร์แบบผสมมีวิธีการต่อขดลวดขนานหรือขดลวดชั้นที่อยู่ 2 วิธี วิธีหนึ่งใช้ต่อขดลวดแบบชั้นที่ขนานกับอาร์เมเจอร์เรียกว่า การต่อแบบขดลวดขนานสั้น หรือการต่อแบบช็อร์ตชั๊นท์คอมพาวด์มอเตอร์ (Short Shunt Compound Motor)การต่อวงจรในลักษณะนี้จะส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดในขณะเริ่มหมุน สูงกว่าการต่อแบบลวงชั้นที่คอมพาวด์มอเตอร์ ในขณะที่ความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง สาเหตุดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ขดลวดชั้นที่ได้รับกระแสที่ผ่านมาจากขดลวดซีรี่ส์ ดังนั้น หากโหลดของมอเตอร์มีมาก ขดลวดซีรี่ส์ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่า ขดลวดชั้นที่จติงกระแสมาก ทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดชั้นที่น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.9 แผนผังการต่อวงจรของมอเตอร์แบบผสม

2.4 ตัวตรวจจับแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (HALL EFFECT SENSOR)

ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่นิยมกันมาก เนื่องจากสามารถใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่ง ความเร็ว หรือ ทิศทางในการเคลื่อนที่ และยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ ออกแบบมาให้สามารถทนทานต่อการสั่นสะเทือน ฝุ่น และน้ำได้

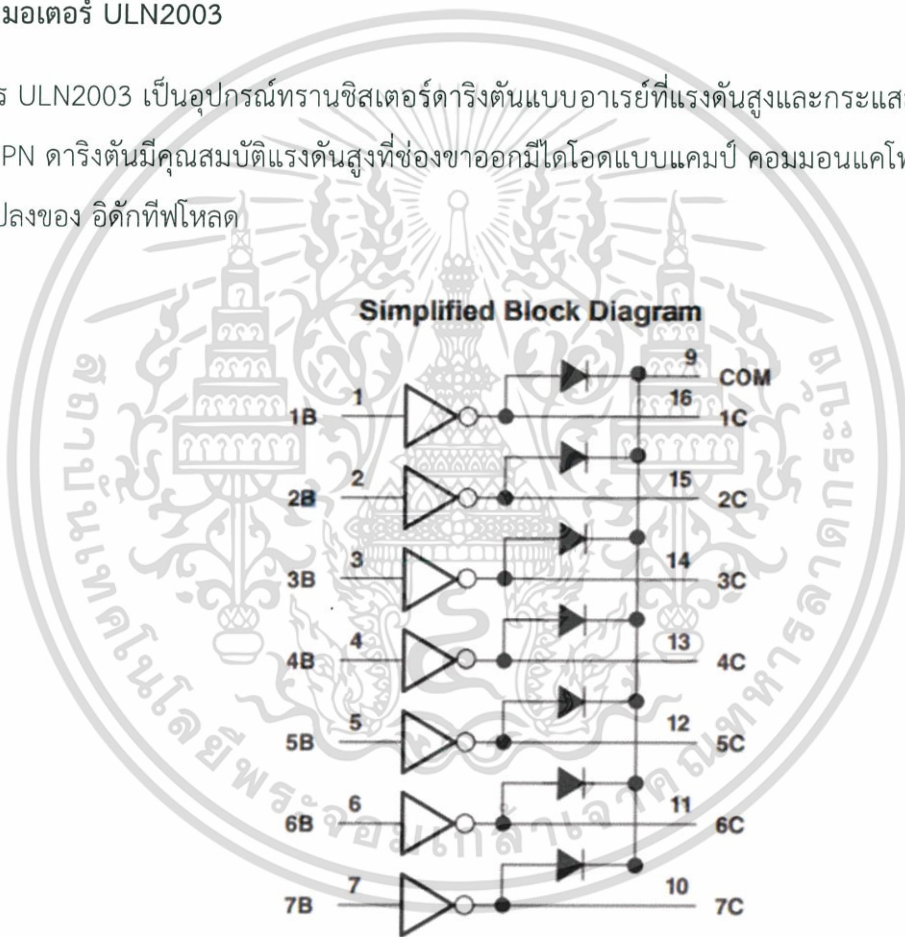
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ ก็คือเซ็นเซอร์แม่เหล็กอีกรูปแบบหนึ่งที่จะทำงานก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กอยู่ในบริเวณรอบๆตัวเซ็นเซอร์ โดยเราได้รู้ว่าแล้วว่าสนามแม่เหล็กมีคุณลักษณะที่สำคัญได้แก่ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) และขั้วแม่เหล็ก (เหนือ ใต้) ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์นั้นเป็นฟังก์ชันที่เกิดจากความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กรอบๆ ได้เกินค่าที่กำหนดไว้ จะเกิดแรงดันที่เอาต์พุต เรียกว่า "แรงดันฮอลล์ (HALL VOLTAGE) "

ในโครงการนี้ ได้ทำการนำหัววัด ตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ จากอีกผลงานหนึ่งมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวในเนื้อเหล็ก

2.5 วงจรขับมอเตอร์ ULN2003

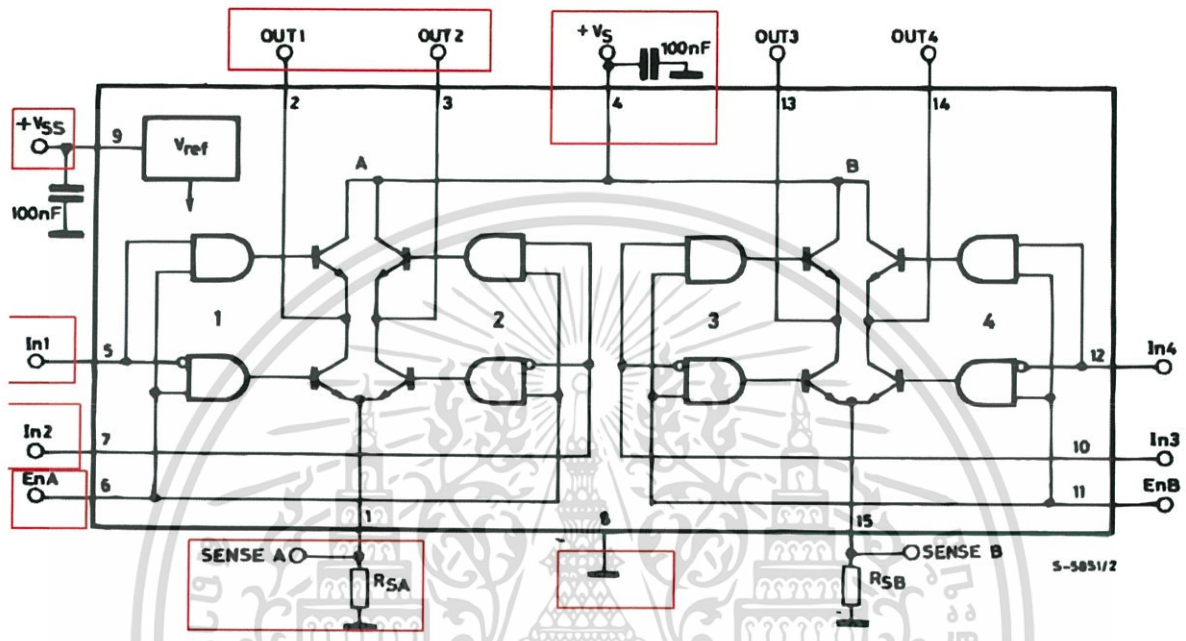
วงจรถูกออกแบบเป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ดาร์ริงตันแบบเอาเรย์ที่แรงดันสูงและกระแสสูง แต่ละคู่ของทั้ง 7 ช่องของ NPN ดาร์ริงตันมีคุณสมบัติแรงดันสูงที่ช่องขาออกมีไดโอดแบบแคมป์ คอมมอนแคโทด ในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของ อัดักทีฟโหลด



รูปที่ 2. 10 วงจร ULN2003

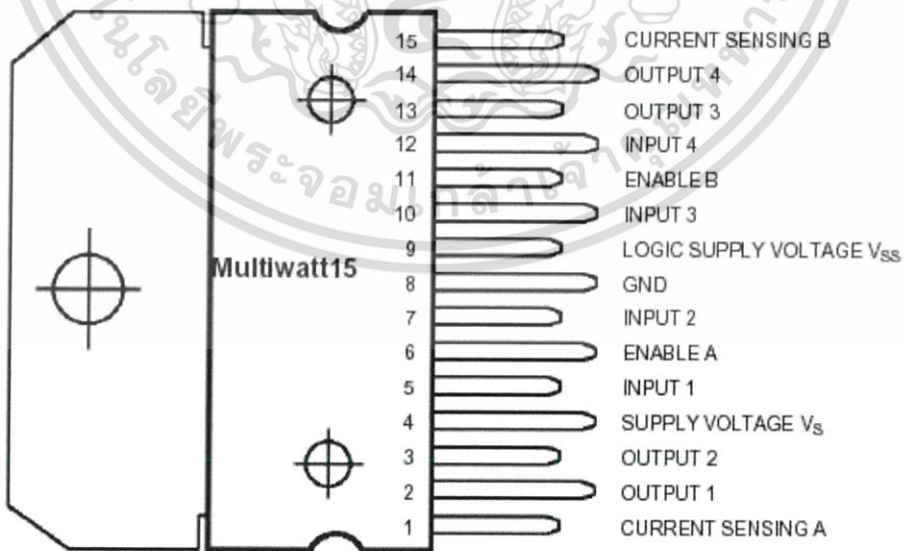
2.6 วงจรขับมอเตอร์ L298

วงจร L298 เป็นวงจรรวมแบบโมโนลิติกที่แรงดันสูง กระแสสูง มีตัวขับแบบคู่อัลฟูลบริดจ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับไอซี TTL (Transistor-Transistor Logic) และขับโหลดเหนี่ยวนำ เช่น รีเลย์ โซลินอยด์ DC หรือสเตปป์มอเตอร์ วงจร L298 มีขาอินพุต enable สองขา สำหรับควบคุมการทำงานโดยขึ้นกับสัญญาณขาเข้า



รูปที่ 2. 11 วงจร L298

2.6.1 การจัดขาของวงจรขับมอเตอร์ L298



รูปที่ 2. 12 การจัดขาของวงจร L298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current Sensing A,B : ระหว่างขานี้และกราวนด์จะต่อกับทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมกระแสของโหลด

Output 3,4 : ขาเอาต์พุตของบริดจ์ B

Input3,4 : อินพุต TTL ที่เข้ากันได้ของบริดจ์ B

Enable A,B : TTL ที่เข้ากันได้กับอินพุตเปิดใช้งาน

Vss : ไฟเลี้ยงโลจิก

GND : กราวนด์

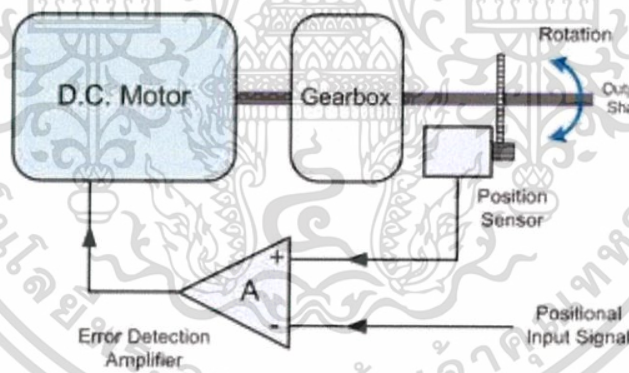
Input 1,2 : อินพุต TTL ที่เข้ากันได้ของบริดจ์ A

Vs : ไฟเลี้ยงสำหรับแรงดันเอาต์พุต

Output 1,2 : ขาเอาต์พุตของบริดจ์ A

2.7 ตัวเข้ารหัสมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor Encoder)

เพื่อที่จะควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างมีคุณภาพ ต้องมีระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับหรืออุปกรณ์ป้อนกลับ(Feedback Device) นั่นคือตัวเข้ารหัส โดยหน้าที่หลักของตัวเข้ารหัสคือ ตรวจวัดความเร็วรอบทิศทาง การหมุน ตำแหน่งหรือมุมของการหมุน และจำนวนรอบของการหมุน โดยค่าป้อนกลับที่ได้ จะนำไปทำการควบคุมมอเตอร์ให้หมุนในความเร็วรอบที่ต้องการ



รูปที่ 2. 13 หลักการทำงานของตัวเข้ารหัส

ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน จึงมีการผลิตตัวเข้ารหัสขึ้นมาหลากหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติและจุดเด่นที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดพื้นฐาน ดังนี้

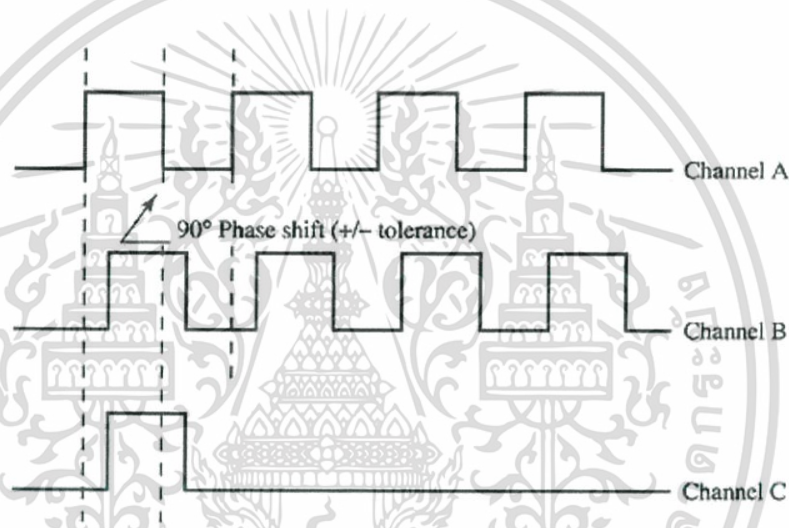
- 1.การแบ่งจากโครงสร้างการใช้งาน
- 2.การแบ่งตามโครงสร้างแกนหมุนของตัวเข้ารหัส
- 3.การแบ่งตามแกนหมุนตัวเข้ารหัสแบบพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การแบ่งตัวเข้ารหัสตามโครงสร้างการใช้งาน

ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนที่ให้ค่าเพิ่มขึ้น (Incremental Rotary Encoder)

เป็นตัวเข้ารหัสที่รูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาเป็นลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะไม่เหมือนกับไซน์เวฟ โดยจำนวนพัลส์ที่ออกมานั้น จะมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ ตำแหน่ง ระยะห่าง ความเร็ว และ ความเร่ง นอกจากนี้ยังสามารถระบุได้ถึงทิศทางการหมุนของตัวเข้ารหัสได้ว่าจะ หมุน ตามเข็มนาฬิกา หรือ ทวนเข็มนาฬิกา โดยอาศัยการตรวจจับทิศทางจากมุมเฟสของสัญญาณเอาต์พุต A กับ B ว่าสัญญาณใดเกิดก่อนกัน ซึ่งจะมีมุมเฟสที่ต่างกันอยู่ 90 องศา ตัวเข้ารหัสแบบนี้ มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถ จดจำตำแหน่งแกนหมุนของตัวเองได้ว่าอยู่ที่จุดใด ด้วยเหตุนี้การหมุนกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น (Homing Point) นั้นจะทำได้ยาก

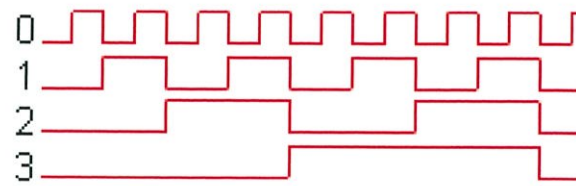


รูปที่ 2. 14 สัญญาณพัลส์ที่เกิดจาก ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนที่ให้ค่าเพิ่มขึ้น

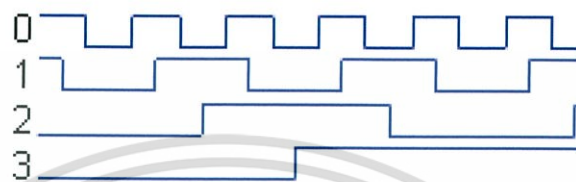
ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์ (Absolute rotary encoder)

เป็นตัวเข้ารหัสที่ออกแบบมาให้มีรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นลักษณะของการเข้ารหัส เพื่อต้องการ แก้ปัญหาของตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนที่ให้ค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของตัวเข้ารหัสแบบแรก ไม่สามารถระบุตำแหน่งพัลส์กับตำแหน่งองศาของแกนเอ็นโค้ดเดอร์ได้ เราจึงแก้ปัญหาเหล่านี้ได้โดยการใช้ ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์ ซึ่งจะใช้รหัสแทนสัญญาณพัลส์ โดยรหัสเหล่านี้ ก็จะมีหลากหลายรูปแบบ เช่น BCD, Binary, รหัสแบบเกรย์ (Gray Code) ซึ่งจะสามารถแทนค่าตำแหน่งองศาที่แกนของตัวเข้ารหัสหยุดอยู่ได้

Binary Code Output



Gray Code Output

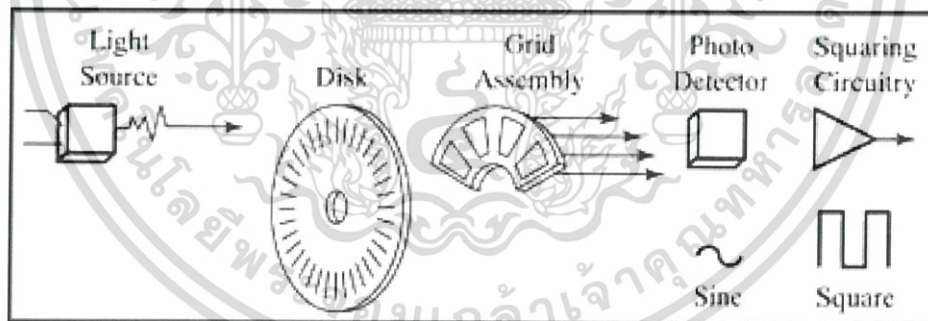


รูปที่ 2. 15 สัญญาณเอาต์พุตของตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์

2.7.2 การแบ่งตามโครงสร้างของตัวเข้ารหัส

ตัวเข้ารหัสวงล้อแบบใช้แสง

เป็นเซ็นเซอร์แบบพื้นฐานที่ถูกออกแบบมาใช้งานตั้งแต่เริ่มต้น โดยใช้หลักการตรวจจับด้วยแสงร่วมกับจานรหัส และใช้ตัวสแกนนิ่งเรติเคิลซึ่งจะเป็นตัวช่วยบังคับแสงให้ไปตรงที่ตัวรับแสงได้อย่างแม่นยำ



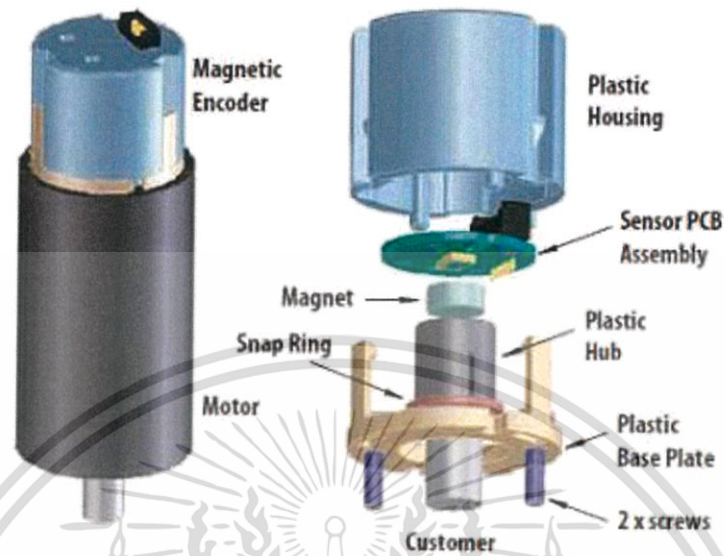
รูปที่ 2. 16 หลักการทำงานของ Rotary Optical Encoder

ตัวเข้ารหัสวงล้อแบบใช้สนามแม่เหล็ก

หลักการทำงานของตัวเข้ารหัสแบบใช้สนามแม่เหล็กนั้น จะใช้แม่เหล็กโค๊ดริง (Magnetic Code Ring) ที่เป็นตัวหมุน และ ใช้เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับโค๊ดจากสนามแม่เหล็ก โดยเซ็นเซอร์ที่ว่านี้มีอยู่ 2 แบบ คือ Magneto-Resistance (MR) และ IC Sensor โดยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 รูปแบบนี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน จะมีการแยกแยะระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Hall Effect จากปรากฏการณ์นี้จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นแบบคลื่นไซน์ออกมา ต่อจากนั้นจะมีการใช้กระบวนการแปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) เพื่อนำเอาสัญญาณดิจิทัลเหล่านี้ไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของตัวเข้ารหัสวงล้อแบบใช้สนามแม่เหล็ก

2.7.3 การแบ่งตามแกนหมุนตัวเข้ารหัสแบบพิเศษ

ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อที่สามารถโปรแกรมได้

เป็นตัวเข้ารหัสชนิดพิเศษที่สามารถตั้งค่าของจำนวนพัลส์ต่อรอบได้ ซึ่งในปัจจุบันมียี่ห้อ LIKA รุ่น IQ58, CKQ58 ที่สามารถโปรแกรมเพื่อกำหนดจำนวนพัลส์ที่ต้องการใช้งานได้ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการใช้งานและการทำรายการอะไหล่

ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนหลายรอบ

เป็นตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์ชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหา ตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนสมบูรณ์แบบหมุนรอบเดียว ที่ไม่สามารถจดจำในส่วนของจำนวนรอบที่หมุนได้ เนื่องจากตัวรหัสออกแบบมาให้ไม่ซ้ำกันได้แค่หนึ่งรอบเท่านั้น ทำให้มีขีดจำกัดในเรื่องของความละเอียด แต่สำหรับตัวเข้ารหัสแบบวงล้อหมุนหลายรอบ จะมีการเพิ่มวงจรรับจำนวนไว้ภายในตัว ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ได้ว่าตัวเข้ารหัสหมุนไปกี่รอบแล้ว นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความละเอียดในการใช้งานได้ด้วย

2.8 โปรแกรม Microsoft Visual Studio

ระบบพัฒนา Microsoft Visual Studio คือโปรแกรมชุดพัฒนาที่ออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักพัฒนา ทั้งมือใหม่ และมีอาชีพสามารถเผชิญกับความท้าทายที่ซับซ้อนของการสร้างโซลูชันสมัยใหม่ ด้วยการใช้ภาษาของคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ เช่น C++ , C# , Java, VB, VB.NET, PHP, PYTHON, GROOVY บทบาทหลัก ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Visual Studio ก็คือการปรับปรุงขั้นตอนการพัฒนาที่ช่วยให้การแก้ปัญหาเหล่านี้ทำให้ง่ายขึ้นอำนวยความสะดวกลดเวลา และเป็น ที่น่าพึงพอใจมากขึ้นกว่าเดิม

2.9 โปรแกรม Microsoft Visual Blend

Microsoft Visual Blend เป็นโปรแกรมสำหรับนักออกแบบโปรแกรมหรือเว็บไซต์ เช่นเดียวกับ Visual Studio แต่ Visual Blend จะมุ่งเน้นไปในด้านการออกแบบอินเตอร์เฟซของตัวโปรแกรมหรือเว็บไซต์เพื่อให้ความสวยงามหรือลดความยุ่งยากในการใช้งานลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบ

ในส่วนของการออกแบบนั้น ได้ออกแบบให้ตัวระบบ ประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วนที่แยกออกจากกันได้อย่างอิสระ คือ ส่วนที่เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งยึดหัววัดเอาไว้ และส่วนฐานรองตัวถังซึ่งจะมีมอเตอร์อยู่ด้านล่าง ในตอนแรก ได้ออกแบบให้ส่วนที่เคลื่อนที่มีเพียงส่วนเดียว คือส่วนที่ยึดหัววัด ซึ่งจะทำการหมุนรอบตัวถังเป็นวงกลม แต่เนื่องจากเกิดปัญหาในการวางระบบสายไฟ จึงได้ทำการออกแบบใหม่ คือ ส่วนที่เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นจะทำการเลื่อนหัววัดในแนวตั้ง และส่วนฐานรองตัวถังจะทำการหมุนตัวถังเป็นวงกลม

ในส่วนของตัวเลื่อนหัววัดนั้น ได้ออกแบบให้ใช้ระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นโดยใช้สายพาน เป็นส่วนสำคัญ เนื่องจากการใช้ระบบสายพานแบบนี้ จะเกิดการขบกันเหมือนฟันเฟือง จึงไม่เกิดการสั่นไถลขณะส่งกำลัง ซึ่งจะช่วยให้หัววัด เคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความคลาดเคลื่อนต่ำ ในการขับเคลื่อนระบบสายพานนั้น ได้ออกแบบให้ใช้สแต็ปมอเตอร์ เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งตัวมอเตอร์นี้ จะนำไปต่อกับส่วนที่เป็นแผงควบคุมเพื่อกำหนดการทำงานต่อไป ในขณะที่มอเตอร์ที่ใช้ควบคุมการหมุนของตัวถังคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมีกำลังในการหมุนตัวถัง นอกจากนี้ยังมีตัวเข้ารหัสภายในซึ่งคอยส่งค่ากลับมา ทำให้รู้ว่ามอเตอร์หมุนไปกี่รอบแล้ว และสามารถนำค่านี้ไปใช้กำหนดการเลื่อนขึ้น-ลงของตัวสแต็ปมอเตอร์ เพื่อให้การทำงานของมอเตอร์ทั้ง 2 ทำงานอย่างสอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ

ในส่วนสุดท้าย คือส่วนของซอฟต์แวร์ ได้ทำการเขียนคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Visual Studio และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโย เป็นตัวสั่งงานมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวและเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อนำค่าที่ได้มาแสดงผลบนโปรแกรม ซึ่งทำการสร้างอินเตอร์เฟซขึ้นมาด้วยโปรแกรม Visual Studio Blend เพื่อความสวยงามและความสะดวกในการใช้งาน

3.1 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์

เนื่องจากมอเตอร์หลักที่ใช้ เป็นมอเตอร์ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และต้องแบกรับน้ำหนักของถังก๊าซซึ่งค่อนข้างมาก จึงต้องทำการคำนวณแรงบิดหรือทอร์กที่ต้องใช้ โดยมีหลักการคำนวณดังนี้

$$P_{in} = IV$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังขาเข้า วัดในหน่วยวัตต์ (W)

I คือ กระแส มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

V คือ แรงดัน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_{out} = \tau \omega$ รูปที่ 3. 1 การต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

เมื่อ P_{out} คือ กำลังขาออก, วัดในหน่วยวัตต์ (W);

τ คือ ทอร์ก มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (N•m);

ω คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

$$\omega = rpm * 2\pi / 60$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

rpm คือ จำนวนรอบในการหมุนต่อนาที (round per minute)

π คือ ค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ มีค่าประมาณ(3.14)

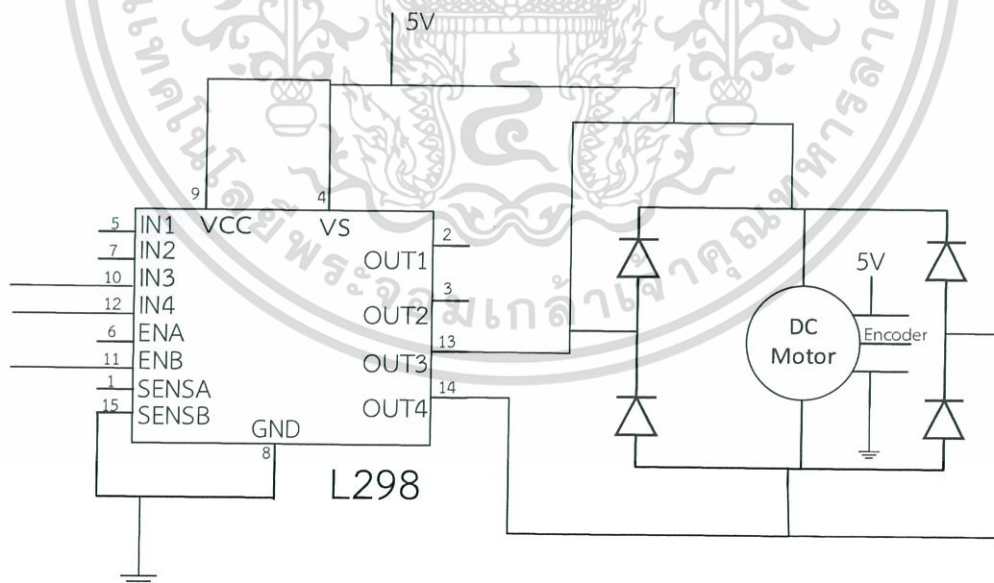
เมื่อทำการนำสมการข้างต้นมารวมกันเป็นสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\tau = (I \times V \times E * 60) / (rpm * 2\pi)$$

โดย E คือประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ P_{out} / P_{in}

3.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

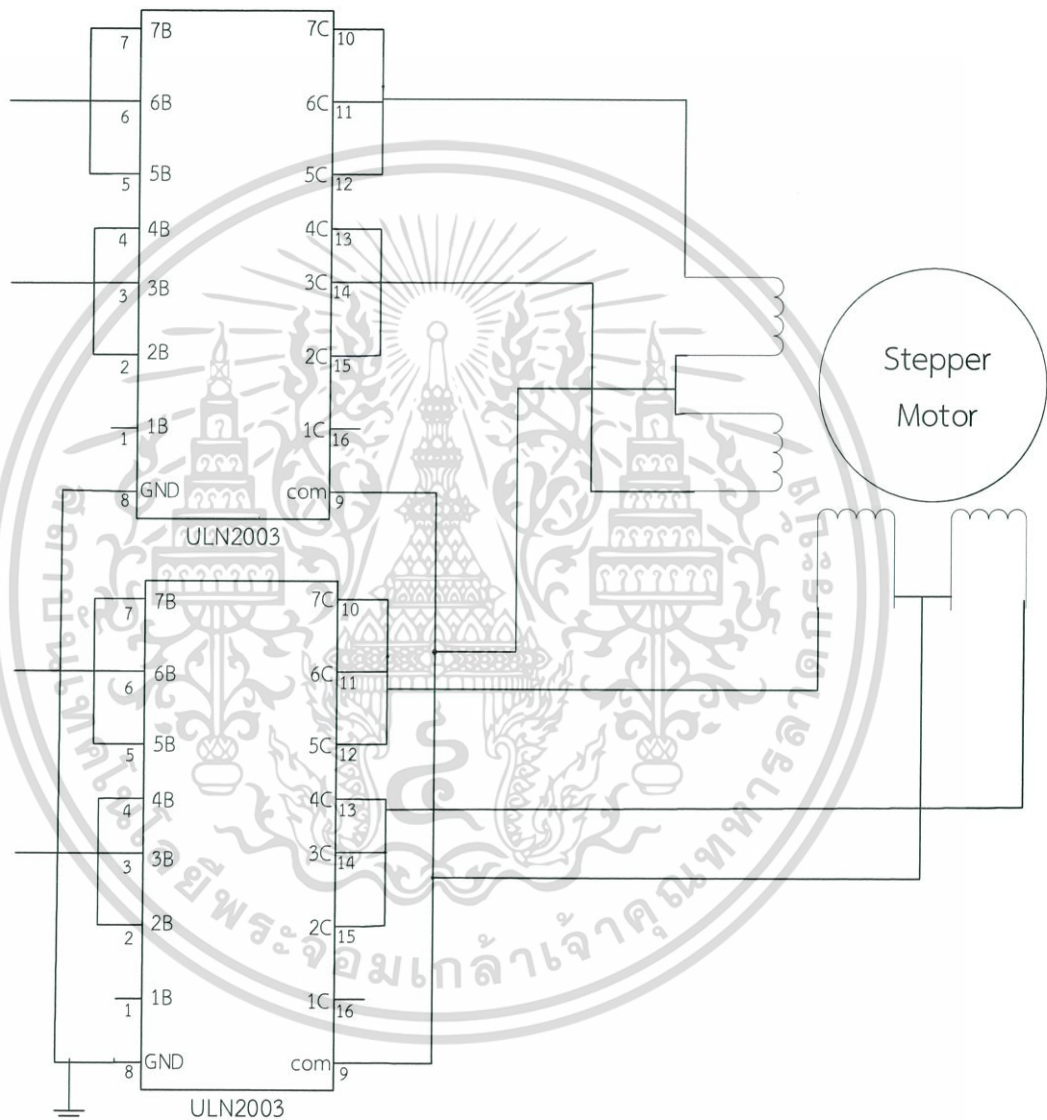
ในส่วนของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง ได้ทำการเลือกใช้วงจรรวม L298 เป็นวงจรตัวขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง เนื่องจากมีคุณสมบัติแรงดันสูง กระแสสูง และถูกออกแบบมาให้ใช้กับโหลดเหนี่ยวนำ เช่นมอเตอร์ เป็นต้น โดยได้นำวงจรรวม L298 มาต่อเป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 1 การต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

3.3 วงจรขับสแต็ปปีงมอเตอร์ (Stepper Motor)

ในส่วนของวงจรขับสแต็ปปีงมอเตอร์ ได้ทำการเลือกใช้วงจรรวม ULN2003 เนื่องจากมีคุณสมบัติการทำงานที่สามารถจ่ายสัญญาณควบคุมได้สูง และยังสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ทุกรูปแบบ ได้สามารถขับมอเตอร์ที่มีขนาดกระแสที่สูงมากๆได้ โดยนำมาต่อเป็นวงจรขับสแต็ปปีงมอเตอร์ดังรูปด้านล่าง

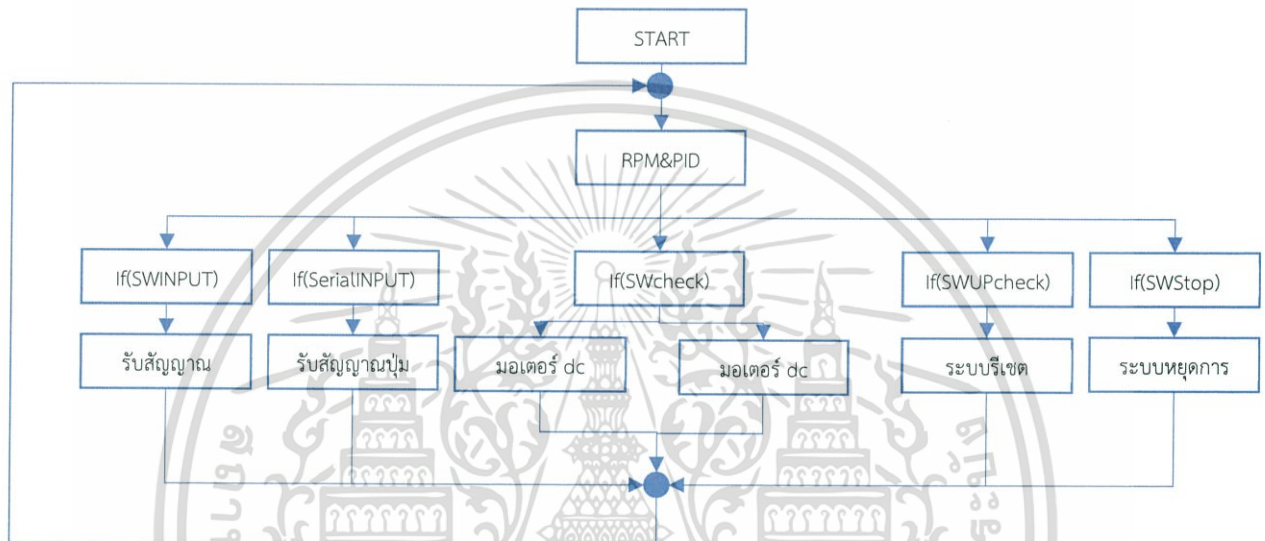


รูปที่ 3. 2 การต่อวงจรขับสแต็ปปีงมอเตอร์

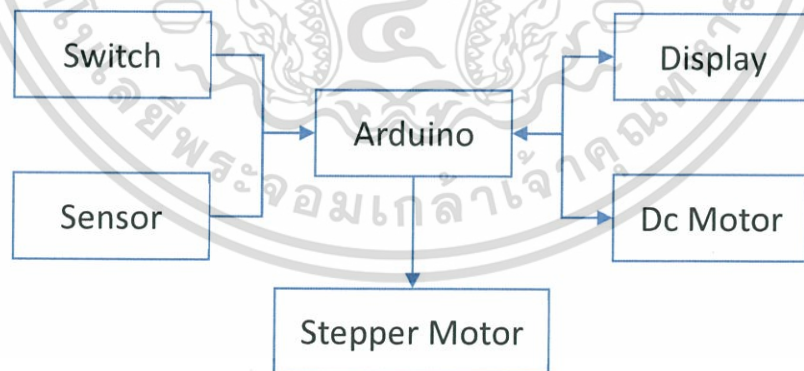
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 คำสั่งการควบคุมสตีปเปอร์มอเตอร์

ในการควบคุมสตีปเปอร์มอเตอร์ จำเป็นต้องมีชุดคำสั่ง เพื่อสั่งการให้ขดลวดภายในสตีปเปอร์มอเตอร์ทำงานอย่างเป็นจังหวะ โดยการทำงานอย่างเป็นจังหวะของสตีปเปอร์มอเตอร์ จะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์อะดุยโน เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นไปอย่างถูกต้อง โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมนี้ สามารถแสดงด้วยแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงาน ดังรูปด้านล่างต่อไปนี้



รูปที่ 3. 3 อัลกอริทึมการทำงานของมอเตอร์



รูปที่ 3.4 Block diagram ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ส่วนการแสดงผล

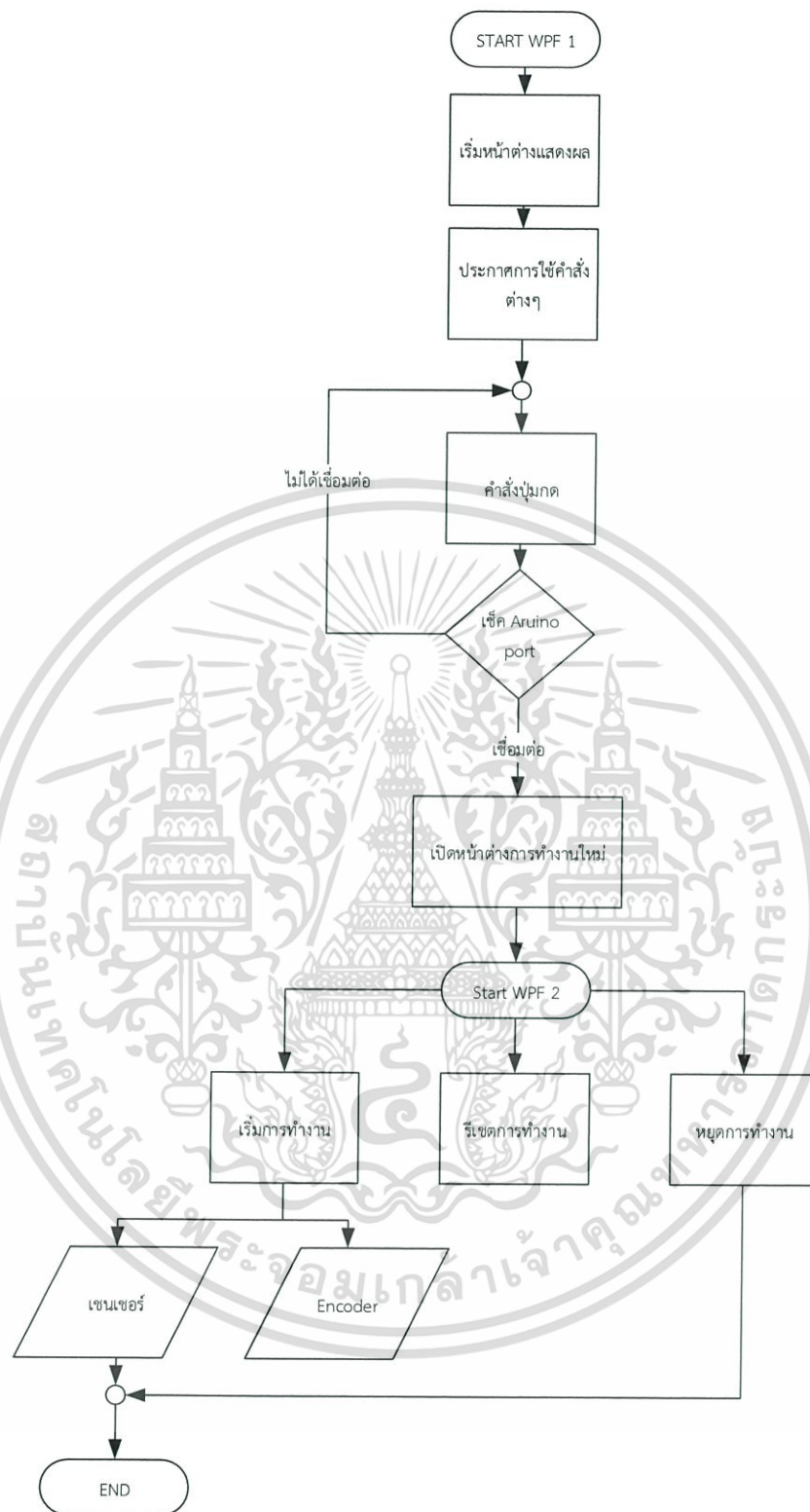
หลังจากการทำงานและประมวลผลของระบบแล้ว ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งก็คือ ส่วนของการแสดงผล เนื่องจากเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้มากที่สุด จึงต้องออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย และสามารถทำงานต่างๆตามที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ในโครงการนี้ จึงได้ทำการเลือกโปรแกรม Microsoft Visual Blend มาใช้งาน ด้วยเหตุผลในด้านความสะดวกในการใช้งาน และเป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนของอินเตอร์เฟซให้กับเว็บไซต์หรือตัวโปรแกรมโดยเฉพาะ ซึ่งตรงกับความต้องการของโครงการนี้อย่างดีเยี่ยม



รูปที่ 3. 4 อินเตอร์เฟซของโปรแกรมในส่วนของการสั่งใช้งาน

รูปที่ 3. 5 อินเตอร์เฟซของโปรแกรมในส่วนของการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3. 6 โฟลชาร์ตในส่วนของการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ตารางผลการทดลอง

ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที เมื่อไม่ใส่ถังเก็บเชื้อเพลิง เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V	RPM
5	11
5	11
5	11
5	11
5	11
5	11
5	11

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที
จำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาทีได้ 11 รอบ ต่อ นาที

ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ เมื่อไม่ใส่ถังเก็บเชื้อเพลิง เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V	วินาที / Sec
5	5:63
5	5:50
5	5:64
5	5:50
5	5:40
5	6:06
5	5:54

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ

จำนวนเวลาที่จับได้ในหนึ่งรอบ 5.56 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน พัลส์ ที่นับได้ใน 1 รอบ เมื่อไม่ใส่ถังเชื้อเพลิง วัดโดยการแสดงผลบนโปรแกรมอะดุยโน้ เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V รอบ	จำนวน พัลส์ ที่จับได้ใน 1 รอบ
5	872
5	966
5	1009
5	1007
5	961
5	1014
5	1008

ตารางที่ 4.3 จำนวน pulse ที่นับได้ใน 1 รอบ

จำนวนสัญญาณเฉลี่ยที่นับได้ใน 1 รอบ เมื่อไม่ใส่ถังเชื้อเพลิง 976 ลูก จากทฤษฎี สัญญาณจะมีความถี่ 1000 ลูกต่อการหมุน 1 รอบ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้ 2.4%

ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที เมื่อใส่โหลด ถังเก็บเชื้อเพลิง เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V	RPM
5	10.5
5	11
5	10.5
5	10
5	10.5
5	10.2
5	10

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที

จำนวนรอบที่นับได้ในหนึ่งนาที ได้ 10.3 รอบ ต่อ นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ เมื่อใส่ถังเชื้อเพลิง เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V	RPM
5	6:00
5	5:63
5	5:37
5	5:93
5	5:39
5	5:73
5	6:13

ตารางที่4.5 ผลการทดลองจำนวนเวลาในหนึ่งรอบ

จำนวนเวลาในหนึ่งรอบได้ 5.83 วินาทีต่อรอบ

จำนวนสัญญาณที่นับได้ใน 1 รอบ เมื่อใส่ถังเชื้อเพลิง วัดโดยค่าแสดงผลบนโปรแกรมอะคูยโน้ เมื่อทำการทดลอง 7 ครั้ง

แรงดัน V รอบ	จำนวนครั้งที่จับได้ใน 1 รอบ
5	1106
5	1297
5	1284
5	1048
5	1156
5	1087
5	1297

ตารางที่4.6 จำนวน สัญญาณ ที่นับได้ใน 1 รอบ

จำนวน สัญญาณ เฉลี่ย ที่นับได้ใน 1 รอบ เมื่อไม่ใส่ถังก๊าซได้ 1182 ลูก

จากทฤษฎี สัญญาณ จะมีความถี่ 1000 ลูกต่อการหมุน 1 รอบ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง คือ 18.2%

ผลการทดลองการสแต็ปปีง

ผลการทดลองระยะในการขับ ไตขึ้นในแต่ละรอบ คือ 0.5 เซนติเมตรต่อครั้ง ทั้งหมด 35 ครั้ง

ความสูงที่สามารถวัดได้ทั้งหมด 17.5 เซนติเมตร

เวลาต่อหนึ่งรอบที่ใช้ในการตรวจสอบถึงก๊าซ คือ 5:18 นาที ต่อ เที้ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

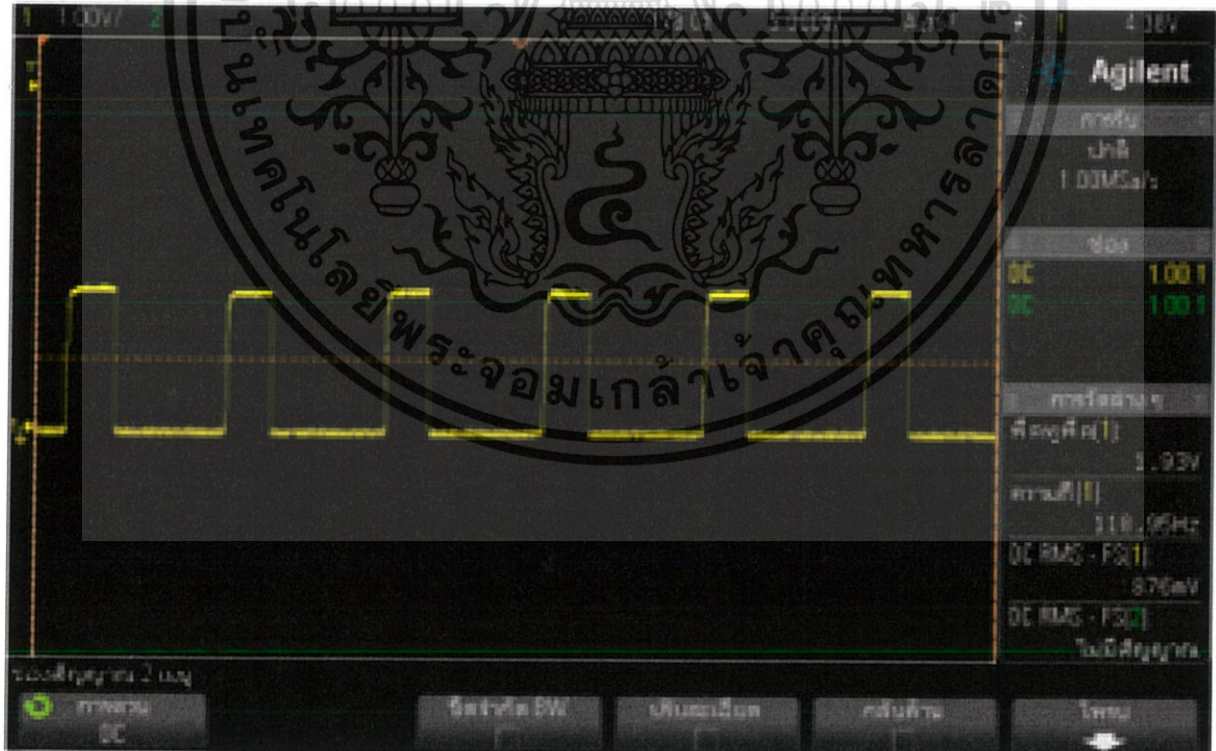
รูปที่ 4.1 พัลส์ เมื่อควบคุมความเร็ว 10 รอบต่อนาที

DSO-X 2002A, MY52166551: Thu Nov 03 07:28:08 2016



รูปที่ 4.2 พัลส์ เมื่อควบคุมความเร็ว 3.5 รอบต่อนาที

DSO-X 2002A, MY52166551: Thu Nov 03 07:29:57 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ระบบตรวจสอบรอยร้าวของถังเชื้อเพลิง เกิดจากการนำระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มารวมกัน โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ ได้นำหลักการของการเคลื่อนที่เชิงเส้น มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพาน แล้วจึงใช้สตีปเปอร์มอเตอร์เป็นตัวเลื่อนหัววัดที่อยู่บนระบบสายพาน และใช้มอเตอร์กระแสตรงในการหมุนตัวถัง นอกจากนี้ ได้ทำการนำตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ มาประยุกต์ใช้เป็นหัวตรวจจับรอยร้าว ในส่วนของซอฟต์แวร์ ได้ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio มาใช้ในการควบคุมระบบ โดยใช้ภาษา C# ในการเขียน และใช้โปรแกรม Visual Blend มาช่วยในการออกแบบอินเตอร์เฟซของโปรแกรมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

ในส่วนของการทดลองเพื่อทดสอบระบบ พบว่าในส่วนขับเคลื่อนตัวถังและหัววัด สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้ ได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถควบคุมการเริ่มทำงาน การหยุดทำงาน และการรีเซ็ตระบบ ผ่านทางหน้าต่างอินเตอร์เฟซของโปรแกรม อย่างไรก็ตาม ในส่วนของหัววัด พบว่าค่อนข้างมีข้อจำกัดในการตรวจสอบรอยร้าว และยังมีปัญหาอยู่เล็กน้อยในด้านความเสถียรของระบบโดยรวม ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อแนะนำได้ดังต่อไปนี้

1. ในส่วนของหัววัด ยังสามารถทำการวัดได้แคในแนวตั้งฉาก ทำให้ไม่สามารถวัดส่วนโค้งของตัวถังได้ ดังนั้นจึงควรออกแบบหัววัดใหม่เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ในทุกลักษณะพื้นผิว
2. ในส่วนของหัววัดรอยร้าว พบว่าการใช้ตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์มาเป็นตัวตรวจจับรอยร้าวยังค่อนข้างมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากในขณะนี้สามารถวัดได้เพียงความแตกต่างกันของระดับพื้นผิวเหล็กเท่านั้น นอกจากนี้ ตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ มีความไวค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ค่าที่ได้ ไม่เสถียรเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้ เพื่อให้สามารถตรวจวัดถึงความแตกต่างของเนื้อเหล็กได้ หรือทำการออกแบบหัววัดใหม่ โดยใช้เซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมกว่านี้
3. ในส่วนของการแสดงผลนั้น ยังมีความละเอียดไม่สูงนัก เนื่องจากตัวเข้ารหัสของมอเตอร์มีความแม่นยำไม่สูงมาก อาจส่งผลให้ค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนไปใช้มอเตอร์ที่มีความละเอียดในการควบคุมสูงกว่านี้
4. ในส่วนของระบบโดยรวม เนื่องจากชิ้นส่วนที่ใช้ส่วนใหญ่ เป็นเหล็กจึงมีน้ำหนักที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่บางส่วน เป็นไม้และอะคริลิก ส่งผลให้มีปัญหาเกี่ยวกับความเสถียรของระบบเล็กน้อย ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนส่วนต่างๆ ให้เป็นเหล็กทั้งหมด เพื่อความแข็งแรงและเพิ่มความเสถียรให้แก่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Bill Earl , All About Stepper Motors. [Online]. Available on : <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors>
- electrical4u , DC Motor or Direct Current Motor. [Online]. Available on : <https://www.electrical4u.com/dc-motor-or-direct-current-motor/>
- Texas Instruments, Inc 1994. ULN2003A Datasheet. USA:Texas Instruments, Inc.
- STMICROELECTRONICS, Inc 1994. L298 Datasheet. Switzerland:STMicroelectronics, Inc.
- Karl Johan Astrom, 2002. PID Control. “Control System Design”, pp.216-251



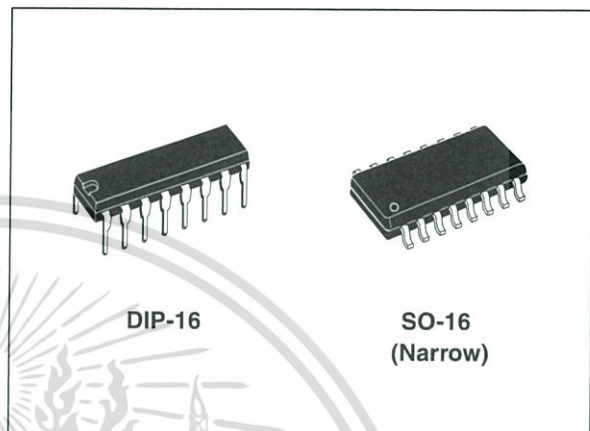
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- Seven Darlington pairs per package
- Output current 500 mA per driver (600 mA peak)
- Output voltage 50 V
- Integrated suppression diodes for inductive loads
- Outputs can be paralleled for higher current
- TTL/CMOS/PMOS/DTL compatible inputs
- Inputs pinned opposite outputs to simplify layout



Description

The ULN2001, ULN2002, ULN2003 and ULN2004 are high voltage, high current Darlington arrays each containing seven open collector Darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500 mA and can withstand peak currents of 600 mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

The versions interface to all common logic families:

- ULN2001 (general purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS)
- ULN2002 (14 - 25 V PMOS)
- ULN2003 (5 V TTL, CMOS)
- ULN2004 (6 - 15 V CMOS, PMOS)

These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal printheads and high power buffers.

The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D1/2002D1/2003D1/2004D1

Table 1. Device summary

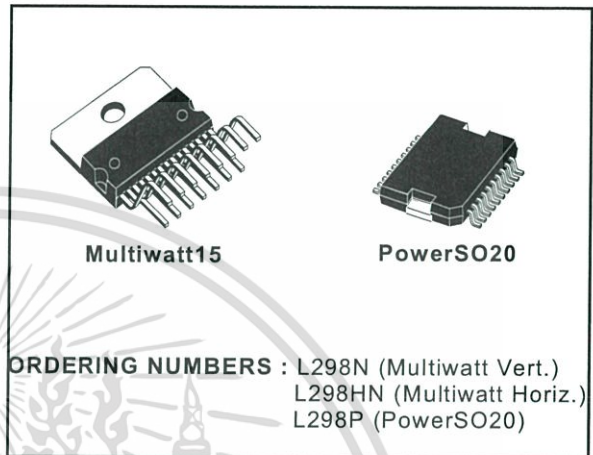
Order codes	
ULN2001A	ULN2001D1013TR
ULN2002A	ULN2002D1013TR
ULN2003A	ULN2003D1013TR
ULN2004A	ULN2004D1013TR

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

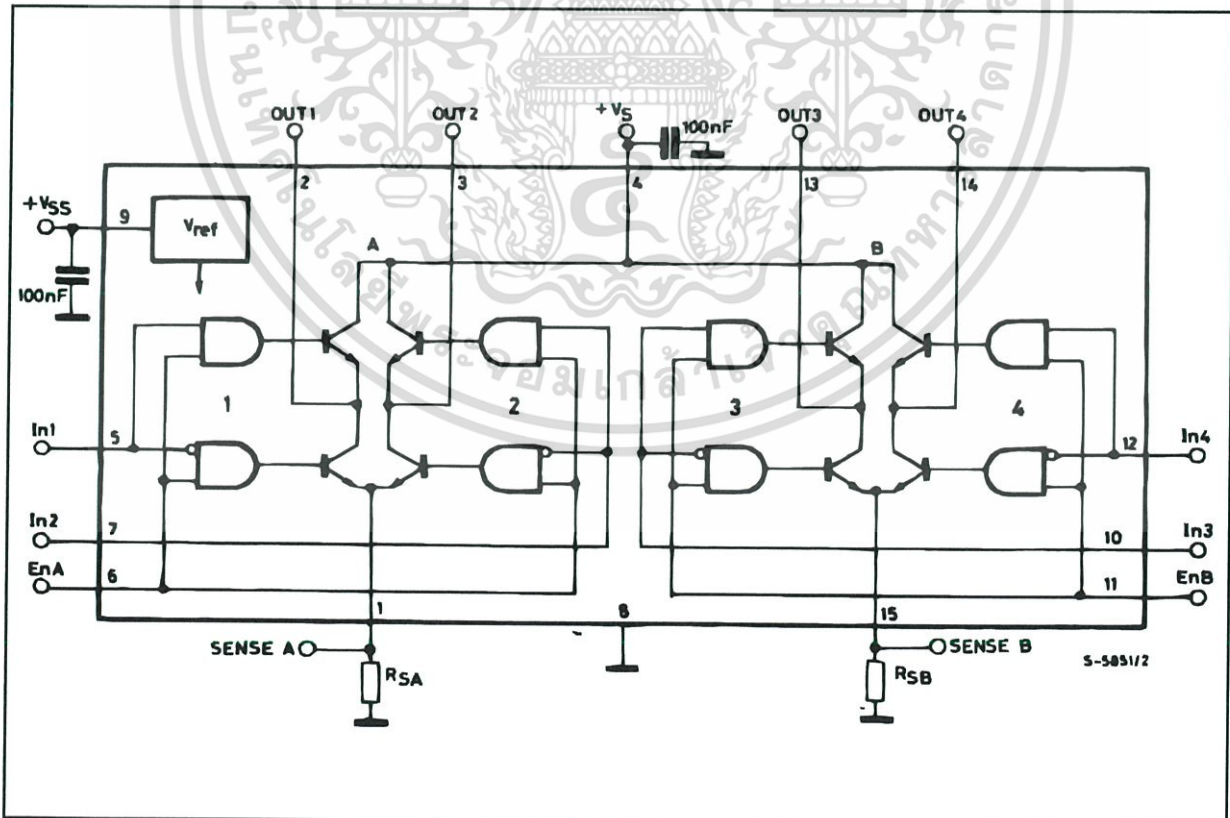
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

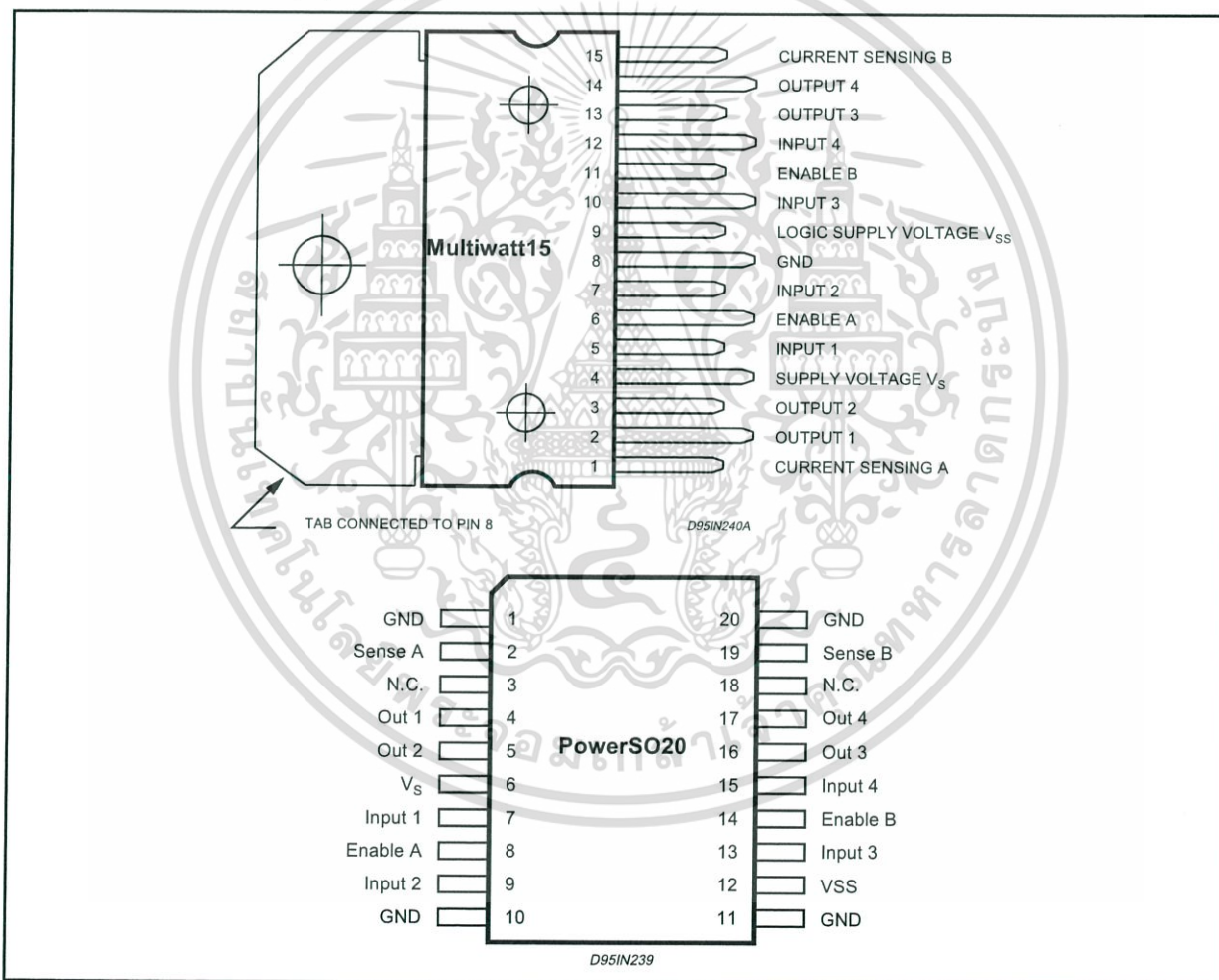
BLOCK DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _S	Power Supply	50	V
V _{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V _I , V _{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I _O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive (t = 100µs)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; t _{on} = 10ms)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V _{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P _{tot}	Total Power Dissipation (T _{case} = 75°C)	25	W
T _{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	°C
T _{stg} , T _j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	°C

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
R _{th j-case}	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	°C/W
R _{th j-amb}	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	°C/W

(*) Mounted on aluminum substrate



PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V _S	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V _{SS}	Supply Voltage for the Logic Blocks. A100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
–	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_S = 42V; V_{SS} = 5V, T_J = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _S	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V _{IH} +2.5		46	V
V _{SS}	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I _S	Quiescent Supply Current (pin 4)	V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H		13 50	22 70	mA mA
		V _{en} = L V _i = X			4	mA
I _{SS}	Quiescent Current from V _{SS} (pin 9)	V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H		24 7	36 12	mA mA
		V _{en} = L V _i = X			6	mA
V _{iL}	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V _{iH}	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V _{SS}	V
I _{iL}	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _i = L			-10	μA
I _{iH}	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _i = H ≤ V _{SS} -0.6V		30	100	μA
V _{en} = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V _{en} = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V _{SS}	V
I _{en} = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = L			-10	μA
I _{en} = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = H ≤ V _{SS} -0.6V		30	100	μA
V _{CEsat} (H)	Source Saturation Voltage	I _L = 1A I _L = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V _{CEsat} (L)	Sink Saturation Voltage	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V _{CEsat}	Total Drop	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V _{sens}	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
T ₁ (V _i)	Source Current Turn-off Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (2); (4)		1.5		μs
T ₂ (V _i)	Source Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (2); (4)		0.2		μs
T ₃ (V _i)	Source Current Turn-on Delay	0.5 V _i to 0.1 I _L (2); (4)		2		μs
T ₄ (V _i)	Source Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (2); (4)		0.7		μs
T ₅ (V _i)	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (3); (4)		0.7		μs
T ₆ (V _i)	Sink Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (3); (4)		0.25		μs
T ₇ (V _i)	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (3); (4)		1.6		μs
T ₈ (V _i)	Sink Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (3); (4)		0.2		μs
f _c (V _i)	Commutation Frequency	I _L = 2A		25	40	KHz
T ₁ (V _{en})	Source Current Turn-off Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (2); (4)		3		μs
T ₂ (V _{en})	Source Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (2); (4)		1		μs
T ₃ (V _{en})	Source Current Turn-on Delay	0.5 V _{en} to 0.1 I _L (2); (4)		0.3		μs
T ₄ (V _{en})	Source Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (2); (4)		0.4		μs
T ₅ (V _{en})	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (3); (4)		2.2		μs
T ₆ (V _{en})	Sink Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (3); (4)		0.35		μs
T ₇ (V _{en})	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (3); (4)		0.25		μs
T ₈ (V _{en})	Sink Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (3); (4)		0.1		μs

- 1) Sensing voltage can be -1 V for t ≤ 50 μsec; in steady state V_{sens} min ≥ -0.5 V.
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

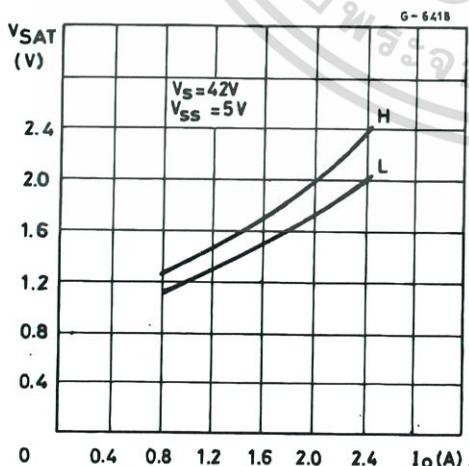
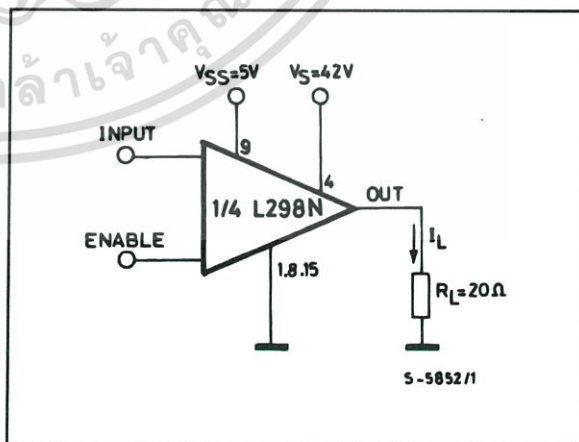


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = H

Figure 3 : Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.

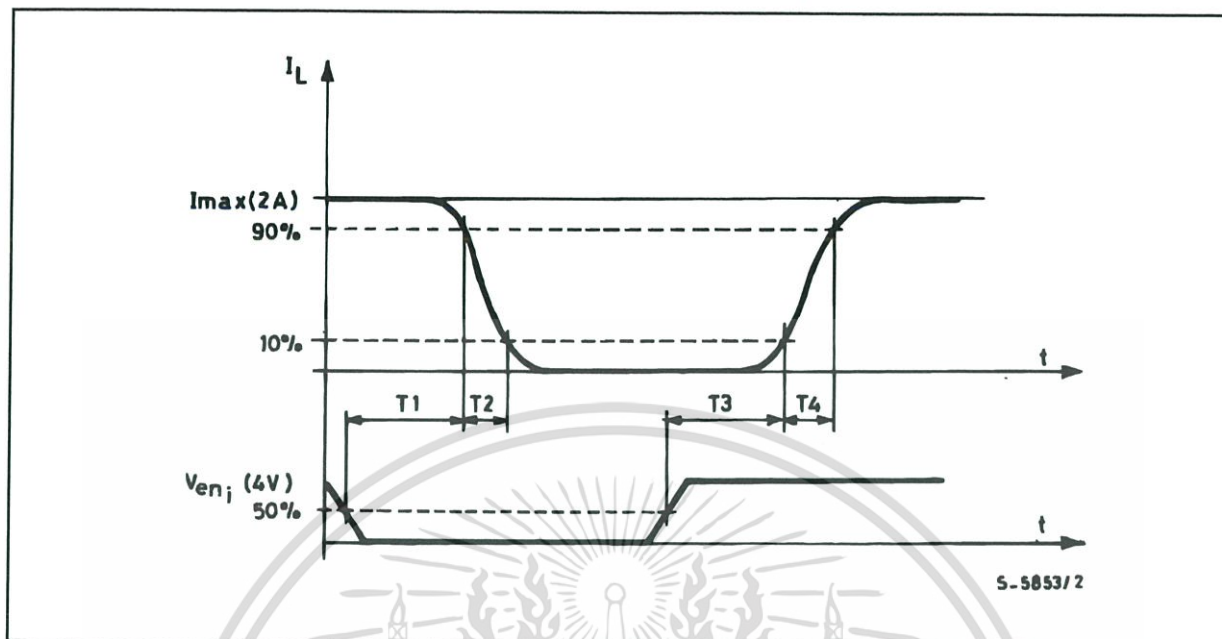
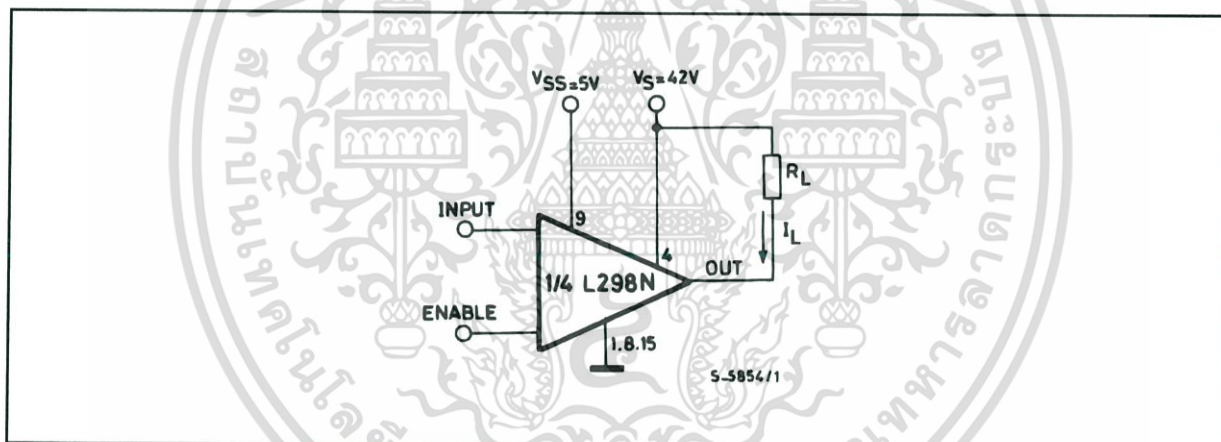


Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = L

Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

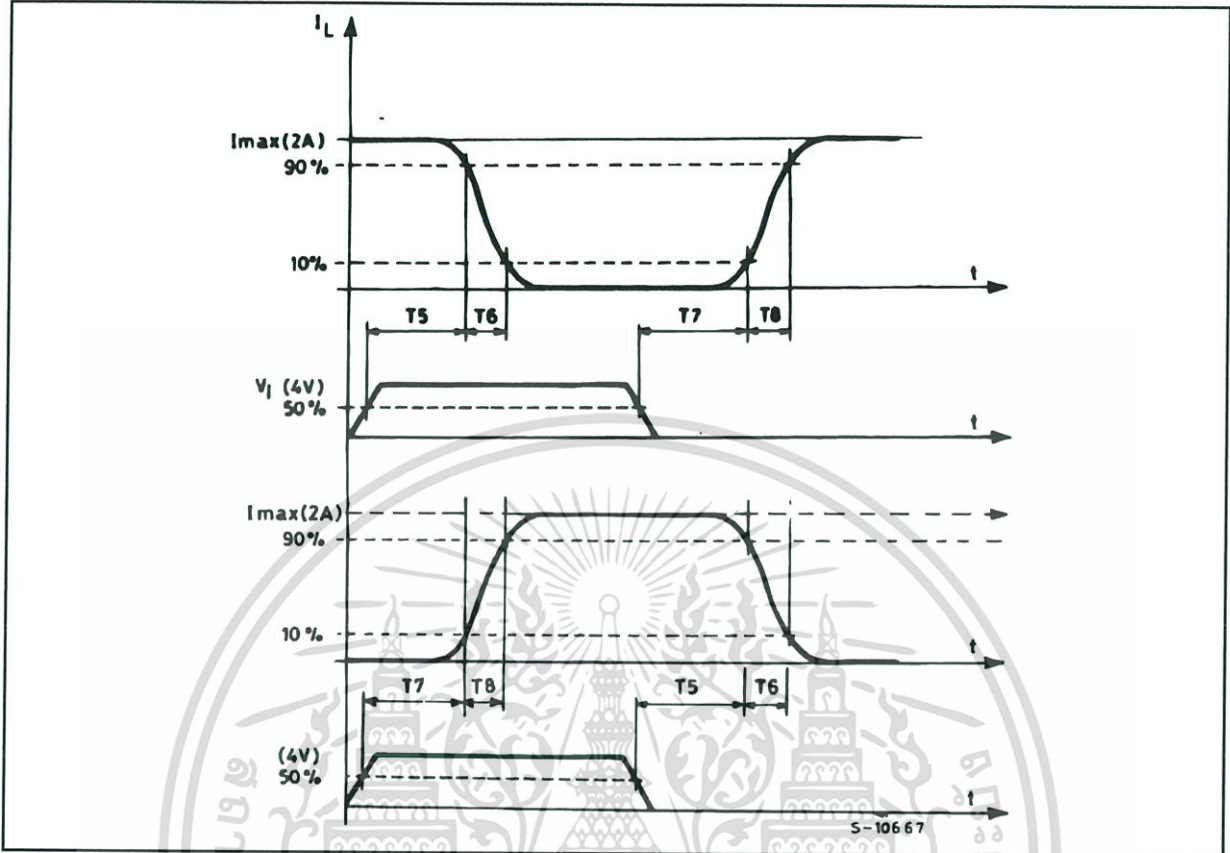


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.

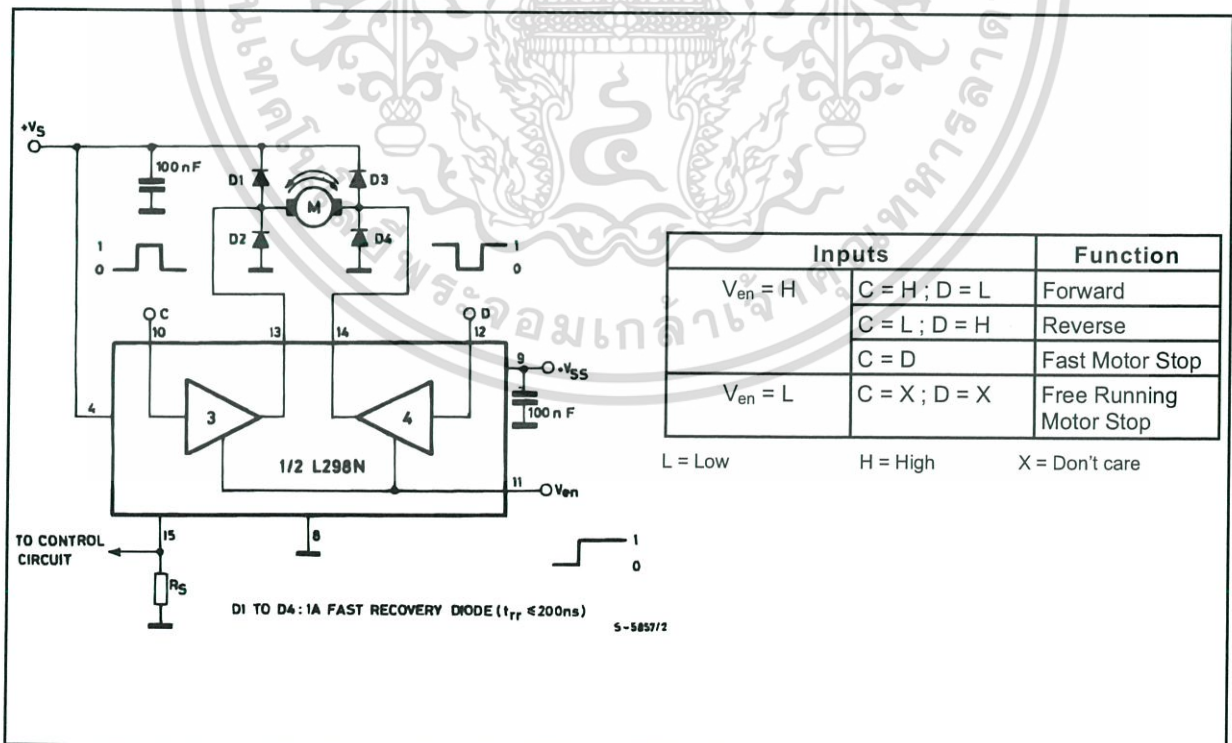
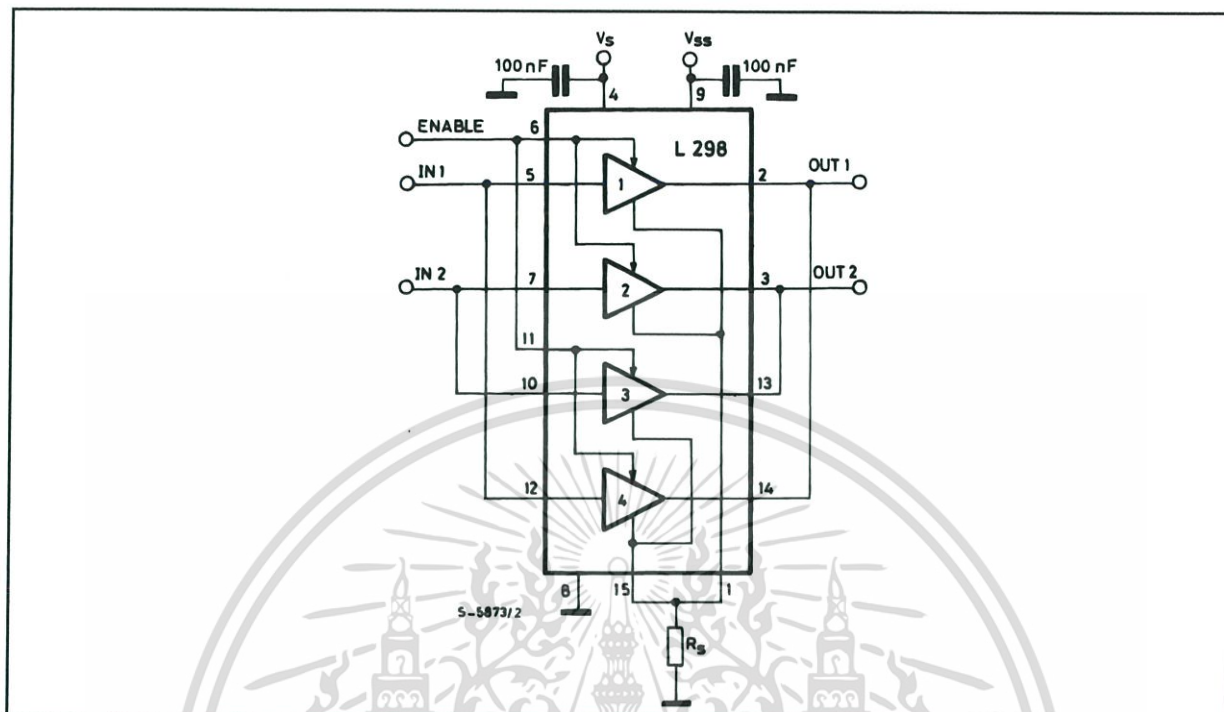


Figure 7 : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output : an external resistor (R_{SA} ; R_{SB} .) allows to detect the intensity of this current.

1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are In1 ; In2 ; EnA and In3 ; In4 ; EnB. The In inputs set the bridge state when The En input is high ; a low state of the En input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both Vs and Vss, to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of Vs that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off : Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ($t_{tr} \leq 200$ nsec) that must be chosen of a VF as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped ; Schottky diodes would be preferred.

This solution can drive until 3 Amps In DC operation and until 3.5 Amps of a repetitive peak current.

On Fig 8 it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor ; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated, in this example, from the IC L297.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

Figure 8 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.

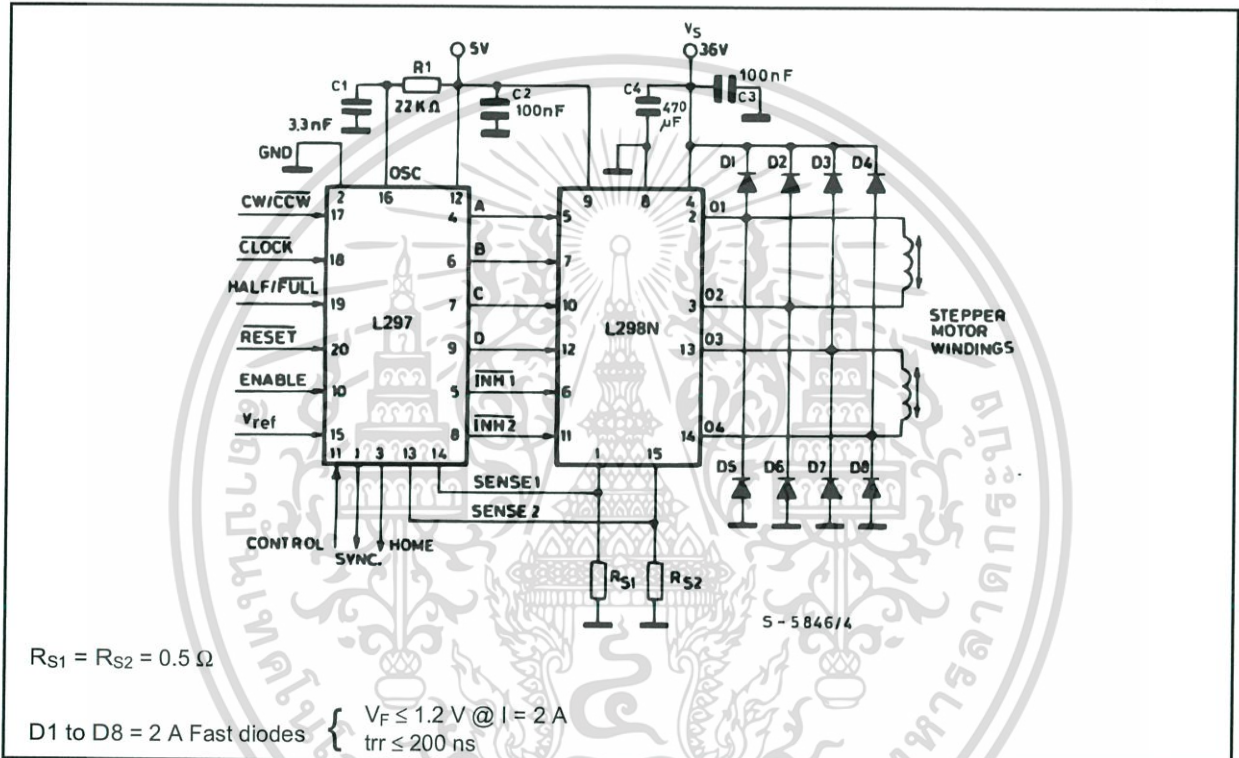


Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.

Figure 9 : Suggested Printed Circuit Board Layout for the Circuit of fig. 8 (1:1 scale).

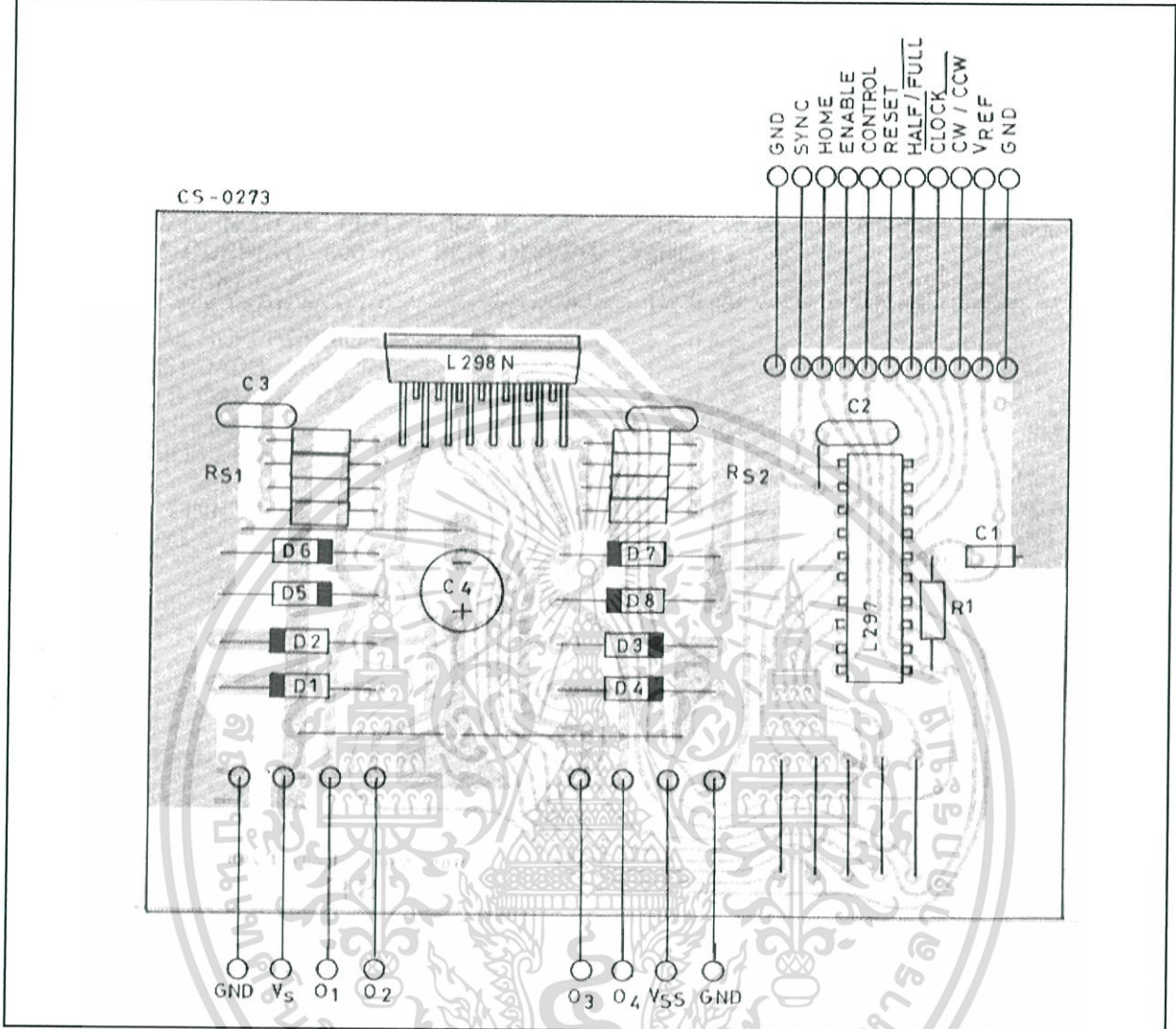
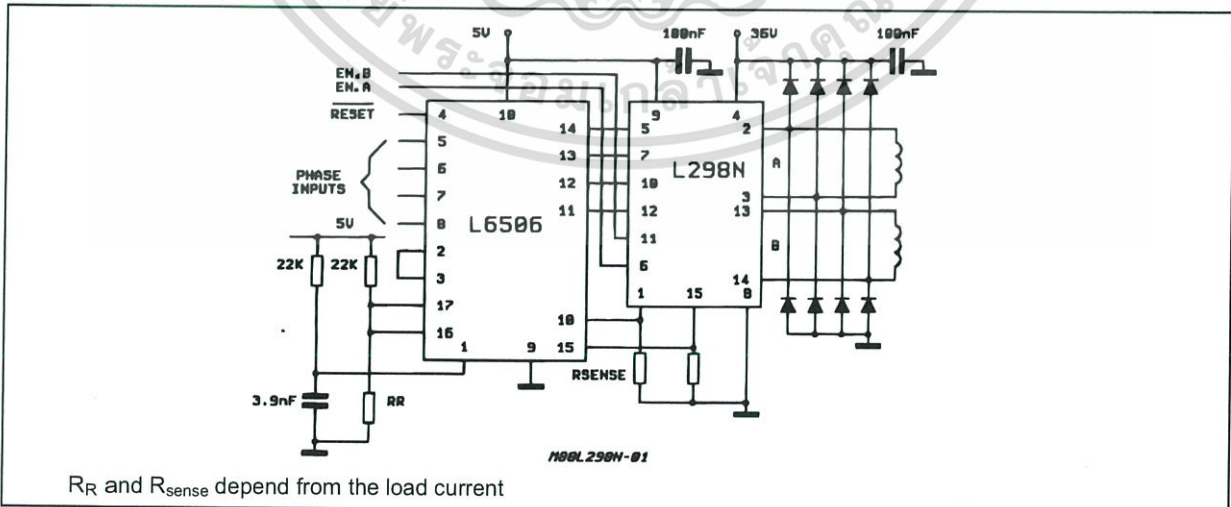
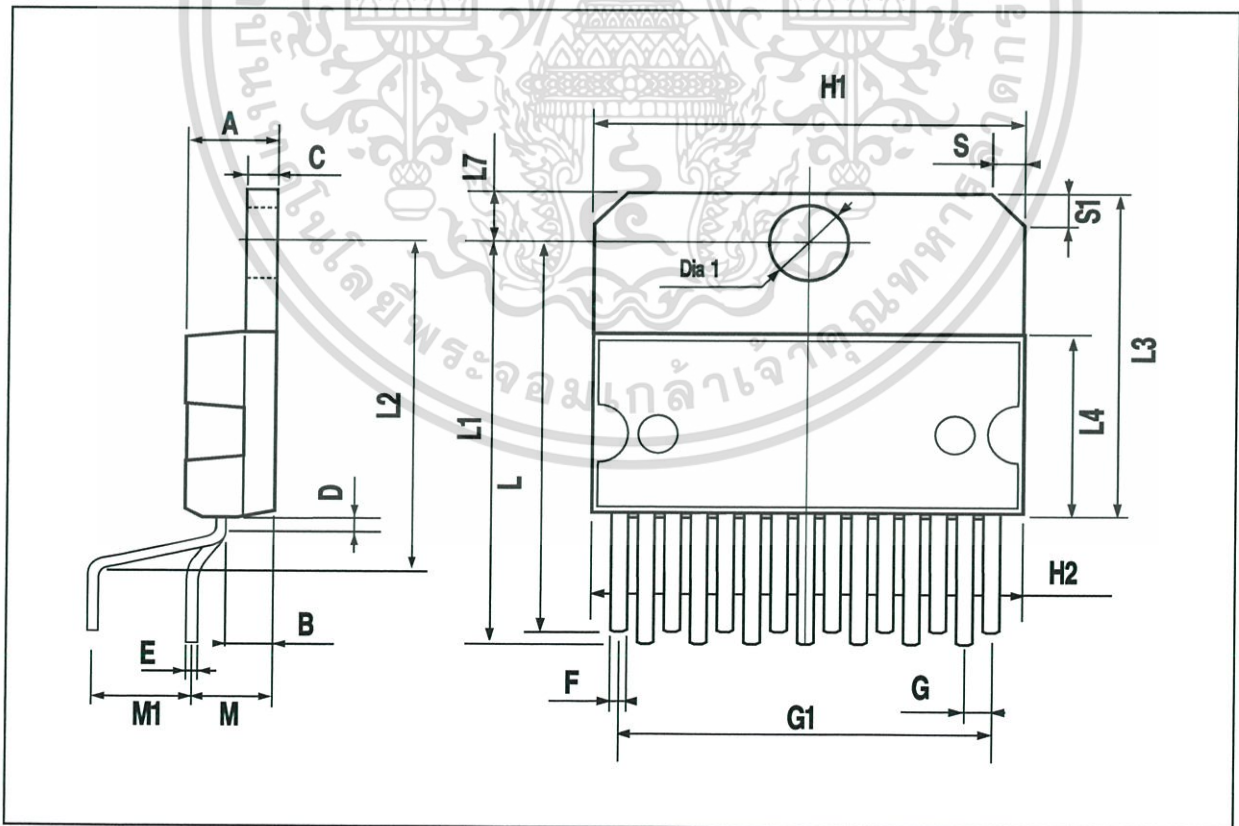
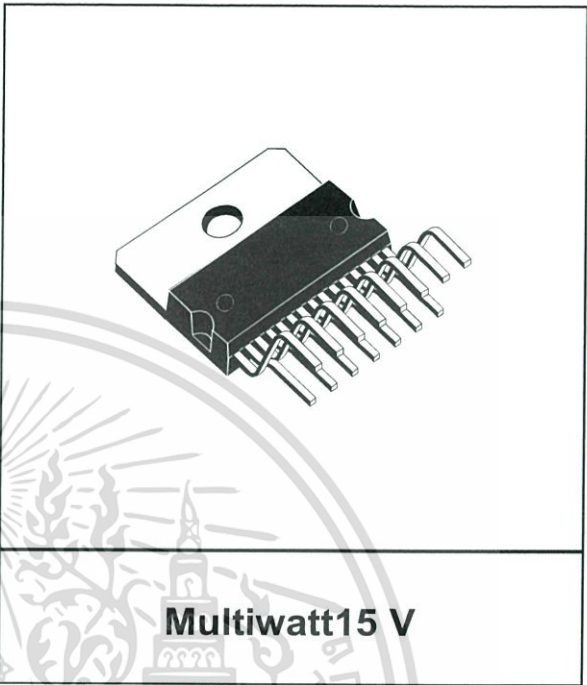


Figure 10 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Control Circuit by Using the Current Controller L6506.



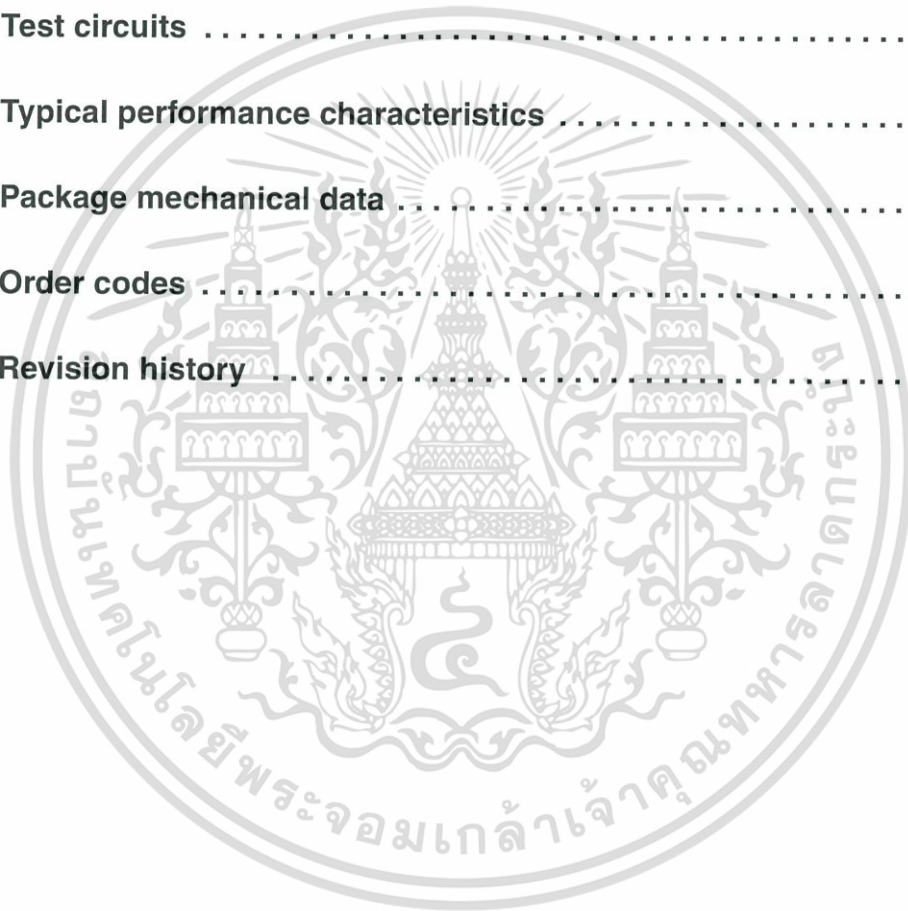
DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
D		1			0.039	
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.02	1.27	1.52	0.040	0.050	0.060
G1	17.53	17.78	18.03	0.690	0.700	0.710
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L	21.9	22.2	22.5	0.862	0.874	0.886
L1	21.7	22.1	22.5	0.854	0.870	0.886
L2	17.65		18.1	0.695		0.713
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
M	4.25	4.55	4.85	0.167	0.179	0.191
M1	4.63	5.08	5.53	0.182	0.200	0.218
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

OUTLINE AND MECHANICAL DATA



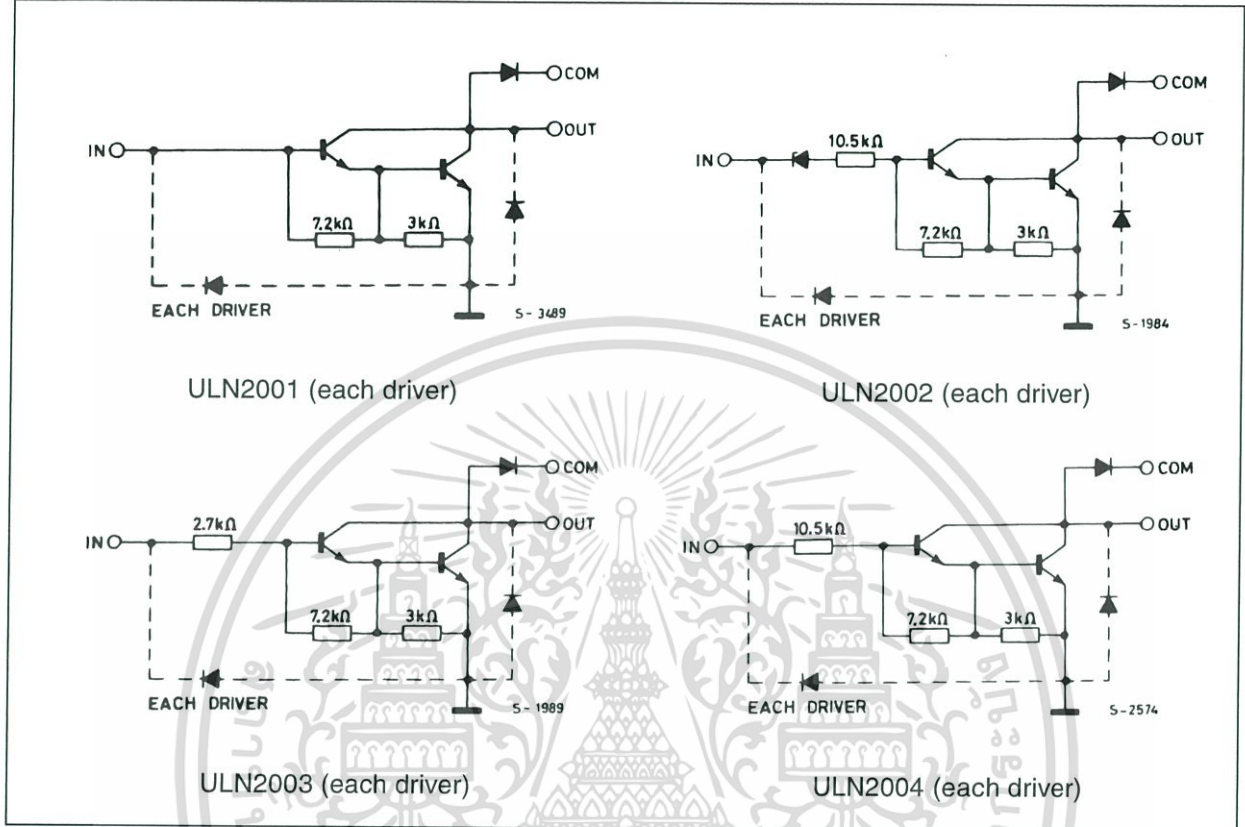
Contents

1	Diagram	3
2	Pin configuration	4
3	Maximum ratings	5
4	Electrical characteristics	6
5	Test circuits	7
6	Typical performance characteristics	9
7	Package mechanical data	11
8	Order codes	14
9	Revision history	15



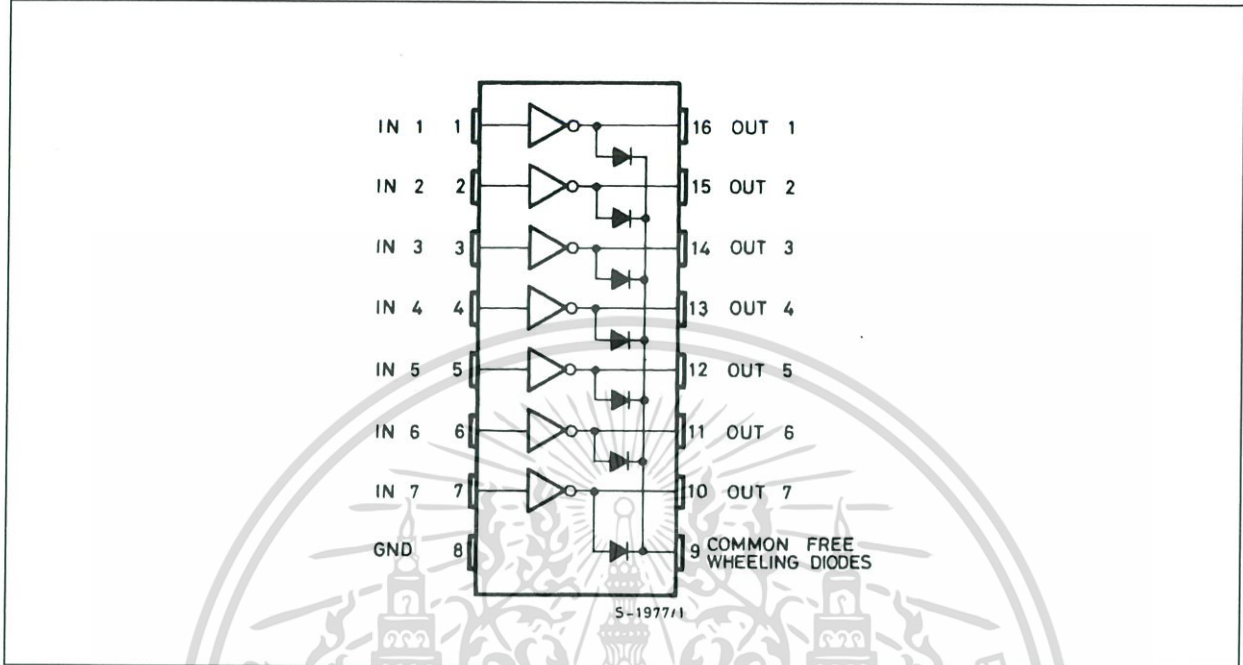
1 Diagram

Figure 1. Schematic diagram



2 Pin configuration

Figure 2. Pin connections (top view)



3 Maximum ratings

Table 2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_O	Output voltage	50	V
V_I	Input voltage (for ULN2002A/D - 2003A/D - 2004A/D)	30	V
I_C	Continuous collector current	500	mA
I_B	Continuous base current	25	mA
T_A	Operating ambient temperature range	- 40 to 85	°C
T_{STG}	Storage temperature range	- 55 to 150	°C
T_J	Junction temperature	150	°C

Table 3. Thermal data

Symbol	Parameter	DIP-16	SO-16	Unit
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient, Max.	70	120	°C/W

4 Electrical characteristics

$T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

Table 4. Electrical characteristics

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{CEX}	Output leakage current	$V_{CE} = 50\text{ V}$, (Figure 3.)			50	μA
		$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{CE} = 50\text{ V}$ (Figure 3.)			100	
		$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$ for ULN2002, $V_{CE} = 50\text{ V}$, $V_I = 6\text{ V}$ (Figure 4.)			500	
		$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$ for ULN2002, $V_{CE} = 50\text{ V}$, $V_I = 1\text{ V}$ (Figure 4.)			500	
$V_{CE(SAT)}$	Collector-emitter saturation voltage (Figure 5.)	$I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$		0.9	1.1	V
		$I_C = 200\text{ mA}$, $I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$		1.1	1.3	
		$I_C = 350\text{ mA}$, $I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$		1.3	1.6	
$I_{I(ON)}$	Input current (Figure 6.)	for ULN2002, $V_I = 17\text{ V}$		0.82	1.25	mA
		for ULN2003, $V_I = 3.85\text{ V}$		0.93	1.35	
		for ULN2004, $V_I = 5\text{ V}$		0.35	0.5	
		$V_I = 12\text{ V}$		1	1.45	
$I_{I(OFF)}$	Input current (Figure 7.)	$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$, $I_C = 500\text{ }\mu\text{A}$	50	65		μA
$V_{I(ON)}$	Input voltage (Figure 8.)	$V_{CE} = 2\text{ V}$, for ULN2002			13	V
		$I_C = 300\text{ mA}$			2.4	
		for ULN2003			2.7	
		$I_C = 200\text{ mA}$			3	
		$I_C = 250\text{ mA}$			5	
		$I_C = 300\text{ mA}$			6	
		for ULN2004			7	
$I_C = 125\text{ mA}$			8			
$I_C = 200\text{ mA}$						
$I_C = 275\text{ mA}$						
$I_C = 350\text{ mA}$						
h_{FE}	DC Forward current gain (Figure 5.)	for ULN2001, $V_{CE} = 2\text{ V}$, $I_C = 350\text{ mA}$	1000			
C_I	Input capacitance			15	25	pF
t_{PLH}	Turn-on delay time	$0.5\text{ }V_I$ to $0.5\text{ }V_O$		0.25	1	μs
t_{PHL}	Turn-off delay time	$0.5\text{ }V_I$ to $0.5\text{ }V_O$		0.25	1	μs
I_R	Clamp diode leakage current (Figure 9.)	$V_R = 50\text{ V}$			50	μA
		$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$, $V_R = 50\text{ V}$			100	
V_F	Clamp diode forward voltage (Figure 10.)	$I_F = 350\text{ mA}$		1.7	2	V

5 Test circuits

Figure 3. Output leakage current

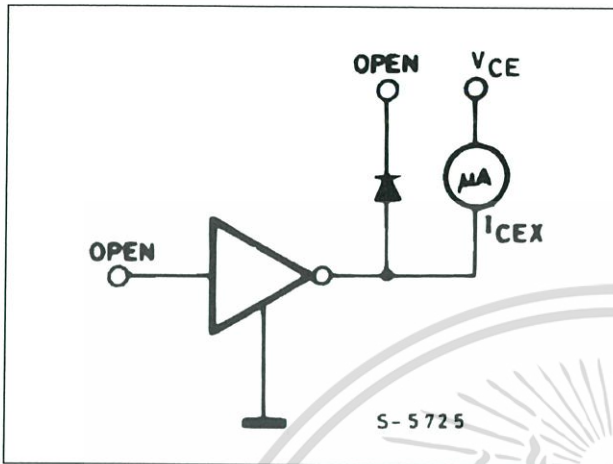


Figure 4. Output leakage current (for ULN2002 only)

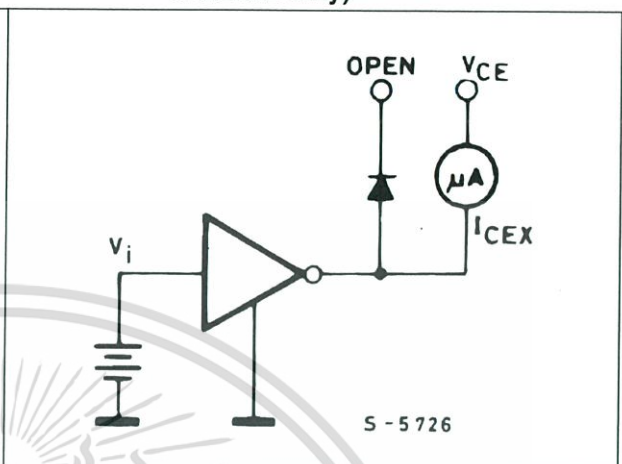


Figure 5. Collector-emitter saturation voltage

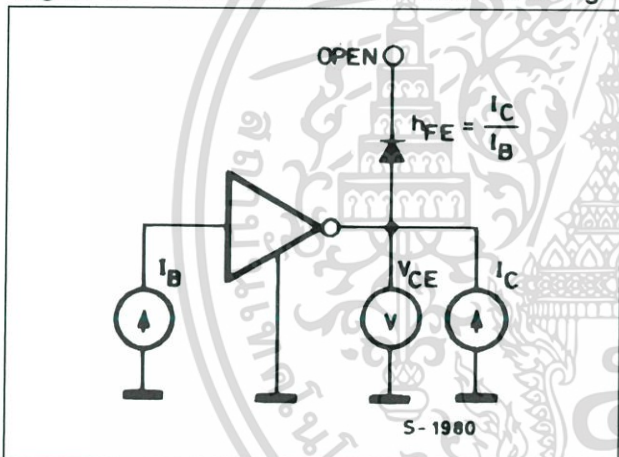


Figure 6. Input current (ON)

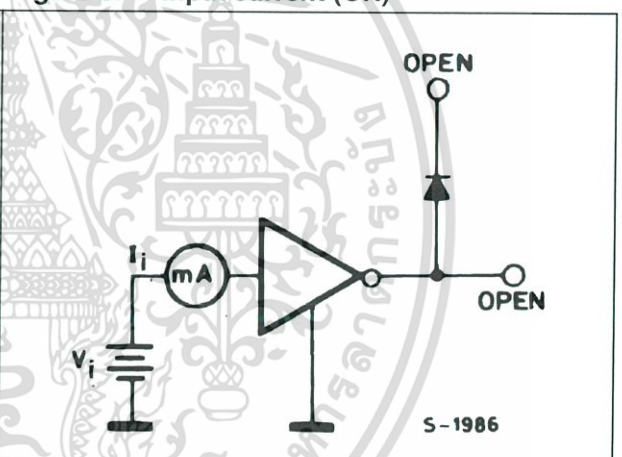


Figure 7. Input current (OFF)

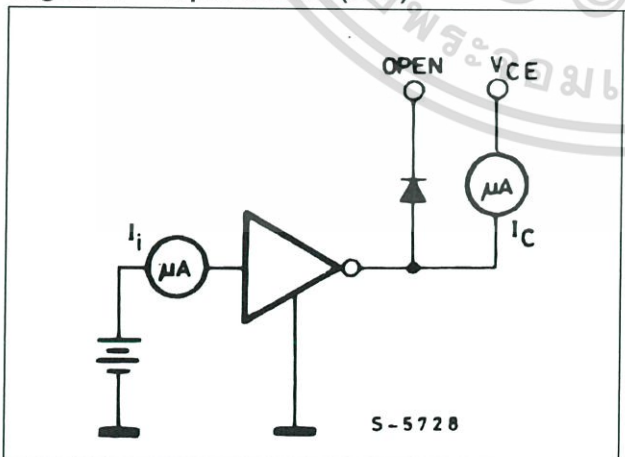


Figure 8. Input voltage

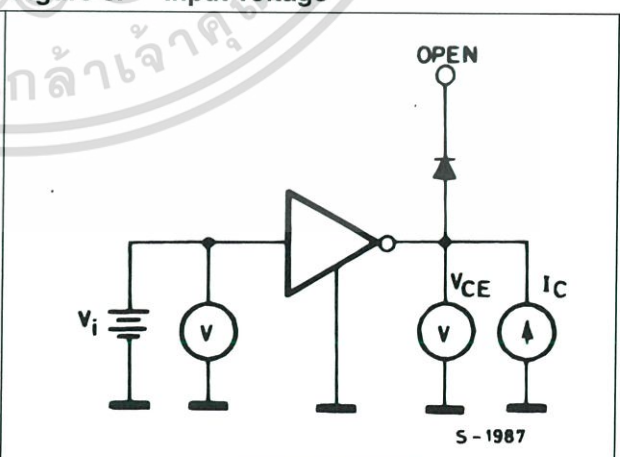


Figure 9. Clamp diode leakage current

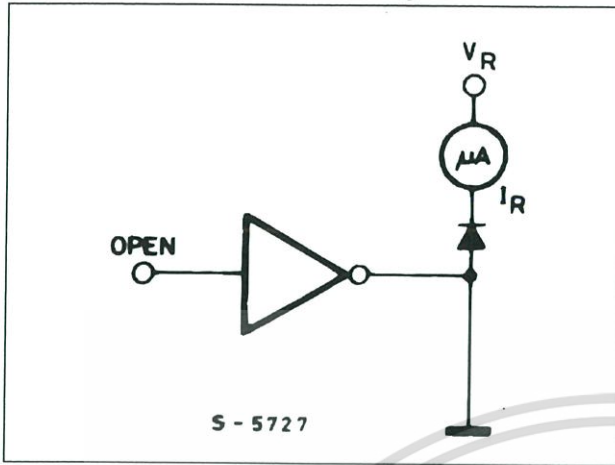
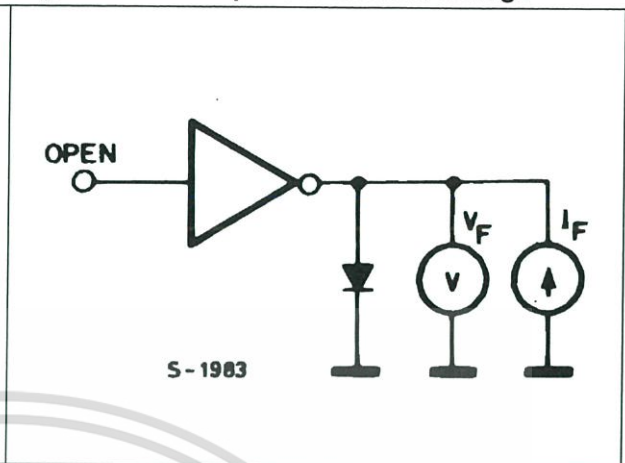


Figure 10. Clamp diode forward voltage



6 Typical performance characteristics

Figure 11. Collector current vs. saturation voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)

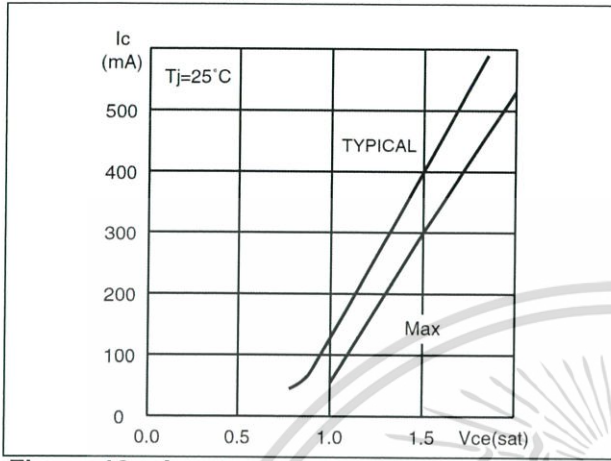


Figure 12. Collector current vs. saturation voltage

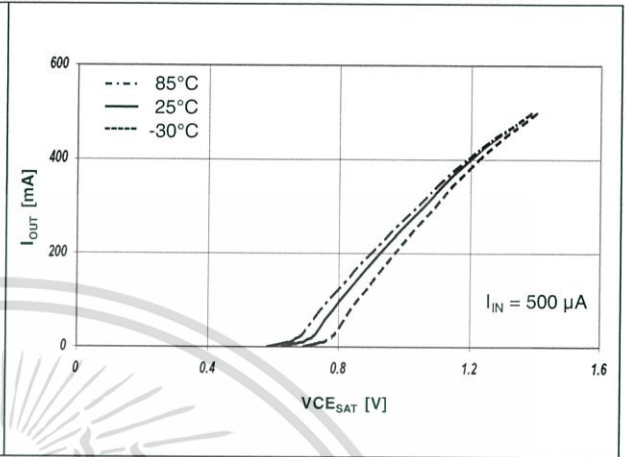


Figure 13. Input current vs. input voltage

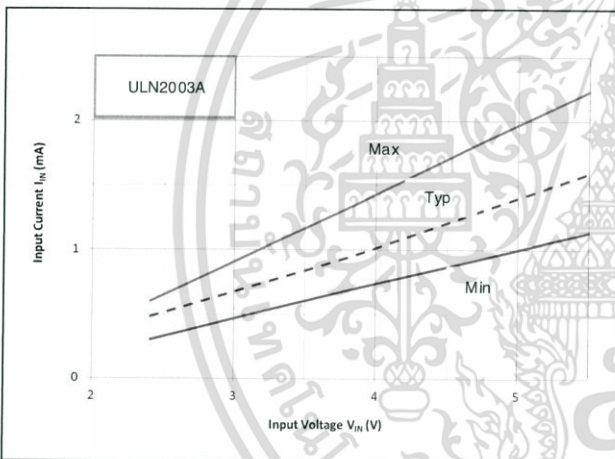


Figure 14. Input current vs. input voltage ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

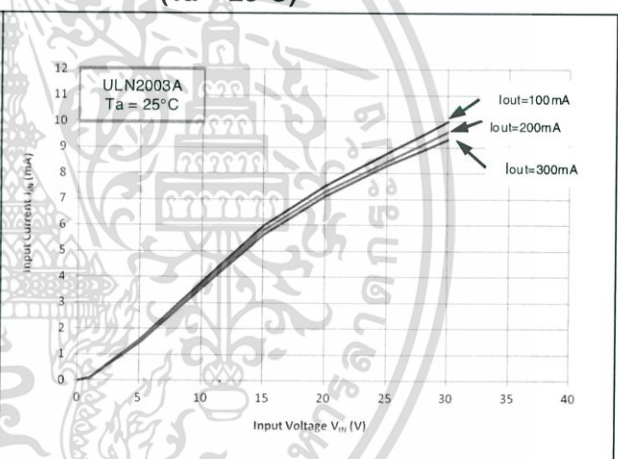


Figure 15. Collector current vs. input current

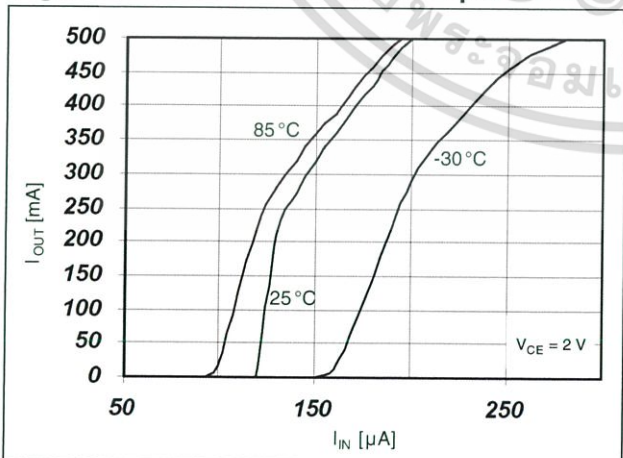


Figure 16. h_{FE} vs. output current

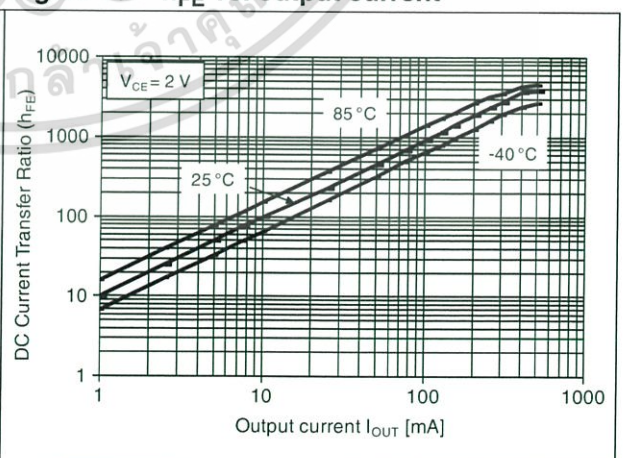


Figure 17. Peak collector current vs. duty cycle (DIP-16)

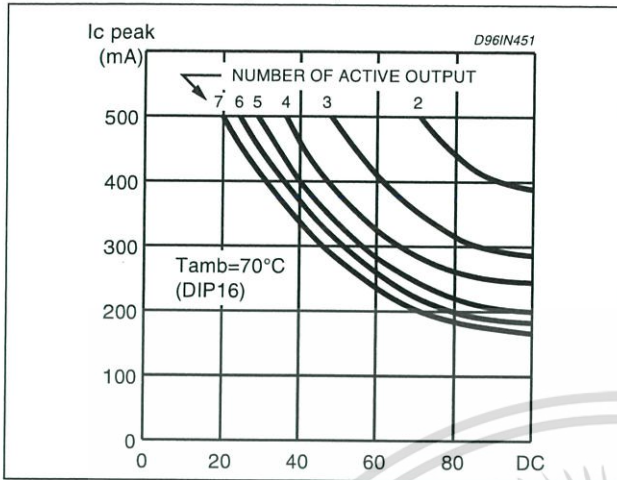


Figure 18. Peak collector current vs. duty cycle (SO-16)

