

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องพันธลวดแบบอัตโนมัติ



รพ.
๑/๔๘๑
๒๕๓๙

นางสาว คลฤดี เจริญกิจธนกุล
นาย ตูลา จันคณา
นาย เสกสม จินะวิจารณ์ะ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

๖19๕24๐๐2

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

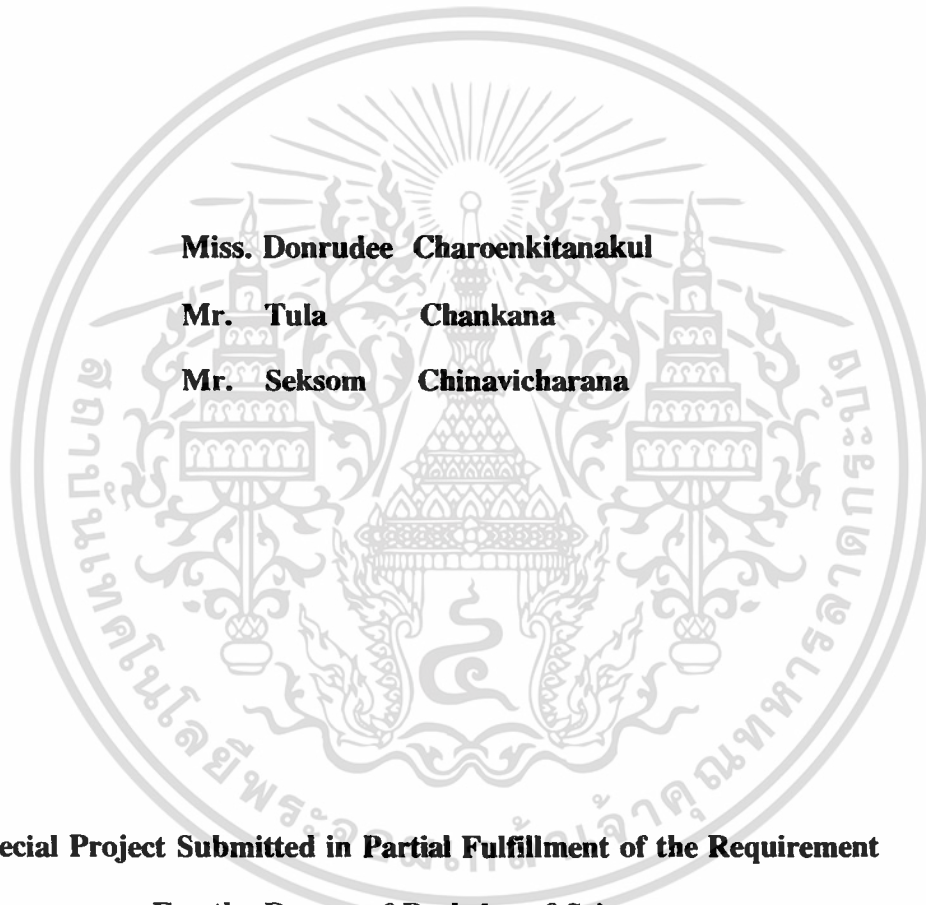
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Automatic Coil - Winding Machine



Miss. Donrudee Charoenkitanakul

Mr. Tula Chankana

Mr. Seksom Chinavicharana

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องพันธลวดแบบอัตโนมัติ
โดย นางสาว คลฤดี เจริญกิจธนกุล
นาย ตูลา จันคณา
นาย เสกสม จินะวิจารณ์ะ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

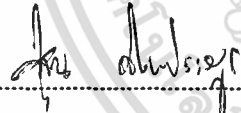
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....
(รศ. สุรพล รักรัตน์)

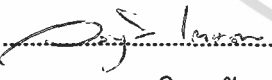
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์


.....
(ผศ. ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)


ประธานกรรมการ


.....
(อ. สุน อ่างประยูร)

กรรมการ


.....
(ผศ. ดร. วรารุณี เถาลัดดา)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	เครื่องพันธลวดอัด โนมัติ
โดย	นางสาว ดลฤดี เจริญกิจชนกุล นาย ตูลา จันคนา นาย เสกสม จินะวิจารณ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล
คณะ	วิทยาศาสตร์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2539

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเรื่องเครื่องพันธลวดแบบอัด โนมัติชุดนี้ ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อการใช้งานในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถใช้ในการพันธลวดตัวนำเพื่อใช้ทำตัวอินดักเตอร์ได้อย่างสะดวกสบาย โครงสร้างของเครื่องมือประกอบไปด้วยส่วนควบคุมขนาดและความตึงของลวด ส่วนแกนหมุนที่ยึดติดกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนเข็ครอบด้วยขอปโตคัปเปิลที่ติดกับแกนหมุน ส่วนแสดงผล และคีย์บอร์ด ซึ่งทุก ๆ ส่วนยกเว้นส่วนควบคุมขนาดและความตึงของลวด ต้องใช้การควบคุมและเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสิ้น ในที่นี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C51 นอกจากนี้ในขณะที่ใช้งานเรายังสามารถกำหนดจำนวนรอบที่จะพันได้ด้วยการใช้การกดคีย์บอร์ดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Automatic Coil-Winding Machine
By Miss. Donrudee Charoenkitanakul
Mr. Tula Chankana
Mr. Seksom Chinavicharana
Special Project Adviser Assit. Prof. Dr. Sirisak Techathaweekul
Faculty Science
Department Applied Physics
Academic Year 1996



Abstract

Our purpose in this special project is to construct an Automatic Coil-Winding Machine which is used to make inductors in an Electronics Laboratory. This machine consists of the mechanical controller for coil size and tension, the iron core which is rotated by D.C. motor, the opto-couple part for checking the number of turns, the display and the keyboard. All of these parts, except the mechanical controller, are controlled by and interfaced with a microcontroller board which is called the ANT-51 with IC number 89C51. Moreover, the number of turns of workpiece can be set by the keyboard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง เครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัติ จะไม่สำเร็จล่วงไปด้วยดี ถ้าหากไม่ได้รับความร่วมมือจากบุคคลดังจะกล่าวขอบคุณดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยอบรมดูแลพร้อมกับให้กำลังใจจนสามารถทำโครงการนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล ที่คอยให้คำแนะนำ และคำปรึกษา พร้อมกับอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ในการทำโครงการ ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำโครงการนี้มา

ขอขอบคุณ อาจารย์ สุน จ่างประยูร ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับเครื่องพันขดลวดแบบต้นฉบับ
ขอขอบคุณ อาจารย์ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ศูนย์ซ่อมสร้างเครื่องมือ วิทยาศาสตร์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในโครงการเชิง Mechanic

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ให้กำลังใจ และให้ความร่วมมือด้วยดีโดยตลอด

ขอขอบคุณ ทุก ๆ ท่านด้วยใจจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

เครื่องพั่นคอยล์แบบอัตโนมัติ เกิดขึ้นมาจากการปรับปรุงเครื่องพั่นคอยล์แบบดั้งเดิม ที่ใช้มือพั่นอยู่ ซึ่งเป็นเครื่องที่ค่อนข้างใหญ่และหนัก เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเป็นการยุ่งยากต่อการใช้งานเมื่อใช้พั่นขดลวดที่มีจำนวนรอบมาก ๆ เพราะจะทำให้ผู้ใช้ต้องออกแรงมากในการพั่น ดังนั้นการปรับปรุงที่เกิดขึ้นจึงเป็นการเพิ่มส่วนควบคุม ซึ่งใช้บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ANT-C51 ตัวคีย์บอร์ด ส่วนแสดงผล ส่วนควบคุมความเร็วของมอเตอร์ วงจรขับและเบรคมอเตอร์ ส่วนตรวจเช็คจำนวนรอบ และ power supply เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 การค้นคว้าให้ค่าความนำตามต้องการ	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	13
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2.1.2 การแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	16
2.1.3 ระบบคอนโทรลมอเตอร์	21
2.1.4 พื้นฐานของระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	21
2.1.5 ลักษณะการคอนโทรลของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	22
2.1.6 วิธีการคอนโทรลมอเตอร์	24
2.1.7 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	25
2.1.8 ระบบการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบเปิดลูป	26
2.1.9 ระบบการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบปิดลูป	31
2.1.10ระบบการคอนโทรลความเร็วได้เพียงทิศทางเดียวหรือควอดแรนต์เดียว	33
2.1.11การคอนโทรลความเร็วที่สามารถกลับทิศทางได้	33
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	35
2.2.1 โครงสร้างภายในของ MCS-51	35
2.2.2 หน้าที่การทำงานของขาแต่ละขาใน MCS-51	38
2.2.3 สัญญาณนาฬิกาของ MCS-51	40
2.2.4 หน่วยความจำภายใน MCS-51	41
2.2.5 การอินเตอร์รัพต์ภายใน MCS-51	44
บทที่ 3 การสร้างเครื่องฟันขดลวดแบบอัตโนมัติ	49
3.1 ส่วนแมคคานิค	49
3.1.1 การวางอุปกรณ์	49
3.1.2 อุปกรณ์สำหรับวางขดลวด	49
3.1.3 อุปกรณ์สำหรับฟันขดลวด	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ส่วนฮาร์ดแวร์	55
3.2.1 เพาเวอร์ซัพพลาย	56
3.2.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ANT-51	56
3.2.3 แมมโมรีบอร์ด	57
3.2.4 ส่วนแสดงผล	57
3.2.5 ส่วนควบคุมความเร็วของมอเตอร์	61
3.2.6 วงจรขับมอเตอร์	61
3.2.7 เซนเซอร์สปีด (speed sensor)	66
3.3 ส่วนซอฟต์แวร์	66
บทที่ 4 สรุปผลและวิจารณ์	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก	75
ภาคผนวก ข	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงความหมายของ a และ b ของขดลวด	3
รูปที่ 1.2 แสดงความหมายของ l และ d	4
รูปที่ 1.3 แสดงผลการวัดค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดเมื่อใช้ลวดเบอร์ 12 AWG พันถึ 8 รอบต่อนิ้วโดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้น A = 1/2 นิ้ว และของเส้น B = 3/4 นิ้ว	5
รูปที่ 1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอยล์กับตัวประกอบการคูณ	6
รูปที่ 1.5 เส้น A สำหรับคอยล์ที่มี (A), เส้น B สำหรับคอยล์ที่มี (B)	6
รูปที่ 1.6 แสดงความหมายของอักษรย่อต่าง ๆ สำหรับการพันหลายชั้นในรูปแบบเป็น ภาพหน้าตัดของขดลวด	8
รูปที่ 1.7 แสดง โนโมแกรมสำหรับการออกแบบคอยล์ชั้นเดียว	11
รูปที่ 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
รูปที่ 2.2 ลักษณะของโครง	14
รูปที่ 2.3 ขั้วสนามแม่เหล็ก	14
รูปที่ 2.4 แปรงถ่าน	15
รูปที่ 2.5 อามะเจอร์และคอมมิวเตเตอร์	15
รูปที่ 2.6 ซีรีส์มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว	16
รูปที่ 2.7 แสดงการกลับทางหมุน โดยกลับทิศทางกระแสไหลของกระแสในอามะเจอร์	17
รูปที่ 2.8 แสดงการกลับทางหมุน โดยกลับทิศทางกระแสไหลของกระแสในขั้วสนามแม่เหล็ก	17
รูปที่ 2.9 ชั้นที่มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว	18
รูปที่ 2.10 การกลับทางหมุนของชั้นที่มอเตอร์	18
รูปที่ 2.11 คอมเปาน์ดมอเตอร์	19
รูปที่ 2.12 ลองชันที่คิวมูเลตีฟคอมเปาน์ดมอเตอร์	19
รูปที่ 2.13 ซอร์ทชันที่คิวมูเลตีฟคอมเปาน์ดมอเตอร์	20
รูปที่ 2.14 ลองชันที่ดิฟเฟอเรนเชียลคอมเปาน์ดมอเตอร์	20
รูปที่ 2.15 ซอร์ทชันที่ดิฟเฟอเรนเชียลคอมเปาน์ดมอเตอร์	20
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง	21
รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลตำแหน่ง ที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวเสริมเสถียรภาพให้ดีขึ้น	23
รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมของระบบดิจิทัลคอนโทรลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	24
รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดแรงบิดในตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	25
รูปที่ 2.21 แสดงวงจรการคอนโทรลความเร็วของซิริสมอเตอร์ด้วยตัวต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการคอนโทรลแบบนี้	26
รูปที่ 2.22 แสดงวงจรการคอนโทรลความเร็วของซันท์มอเตอร์ด้วยตัวต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการคอนโทรลแบบนี้	27
รูปที่ 2.23 แสดงการคอนโทรลซันท์มอเตอร์ด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับฟิลด์	28
รูปที่ 2.24 แสดงทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนโทรลโวลต์แดงของอาร์เมเจอร์ของซันท์มอเตอร์	28
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการคอนโทรลซันท์มอเตอร์ด้วย SCR แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น	29
รูปที่ 2.26 ระบบการคอนโทรลแบบลูปเปิดโดยใช้วิธีการคอนโทรลอาร์มาเจอร์โวลต์แดง	30
รูปที่ 2.27 ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบปิดลูป	31
รูปที่ 2.28 ไดอะแกรมแสดงการทำงานเพียงควอดแรนต์แรกๆของระบบควบคุมความเร็วแบบทิศทางเดียว	32
รูปที่ 2.29 ไดอะแกรมแสดงการทำงานได้ถึง 4 ควอดแรนต์ของระบบควบคุมความเร็วแบบเซอร์โว	32
รูปที่ 2.30 การคอนโทรลแบบทำงานควอดแรนต์เดียว	33
รูปที่ 2.31 แสดงการจัดวงจรของสวิทช์ที่กลับทิศทางได้	34
รูปที่ 2.32 บล็อกไดอะแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์	35
รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ MCS-51	36
รูปที่ 2.34 แสดงหน่วยความจำ ROM, RAM และ รีจิสเตอร์ที่ใช้งานต่าง ๆ	37
รูปที่ 2.35 แสดงการกำหนดขาแต่ละขาของ MCS-51	38
รูปที่ 2.36 แสดงเวลาการเกิดสัญญาณที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก	40
รูปที่ 2.37 วงจรออสซิลเลเตอร์ และ เวลา	41
รูปที่ 2.38 แบ่งพื้นที่การทำงานของหน่วยความจำ RAM ภายใน	43
รูปที่ 2.39 การทำงานของโปรแกรมเมื่อเกิดการอินเตอร์รัพต์	44
รูปที่ 3.1 แสดงภาพการวางอุปกรณ์เครื่องฟันชดลวดอัตโนมัติ	49

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านหน้าของอุปกรณ์สำหรับวางขดลวด	50
รูปที่ 3.3 แสดงภาพด้านข้างของอุปกรณ์สำหรับวางขดลวด	50
รูปที่ 3.4 แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องพันขดลวด	51
รูปที่ 3.5 แสดงภาพด้านข้างของเครื่องพันขดลวด	51
รูปที่ 3.6 แสดงภาพด้านหน้าของส่วนเกลี่ย	52
รูปที่ 3.7 แสดงภาพด้านหลังของส่วนเกลี่ย	52
รูปที่ 3.8 แสดงถึง SWG	53
รูปที่ 3.9 รูปแสดงฟันเฟือง	54
รูปที่ 3.10 BLOCK DIAGRAM AUTOMETIC COIL-WINDING MACHINE	55
รูปที่ 3.11 ANT-51	58
รูปที่ 3.12 Manual Keyboard	59
รูปที่ 3.13 Display	60
รูปที่ 3.14 PWM Control Speed	62
รูปที่ 3.15 Drive motor-Start Motor from output PWM , break motro from uC Pin 6	63
รูปที่ 3.16 Speed Sensor	64
รูปที่ 3.17 Power Supply	65
รูปที่ 3.18 โพล์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก	67
รูปที่ 3.19 โพล์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์ 0	68
รูปที่ 3.20 โพล์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์ 1	69
รูปที่ 3.21 โพล์ชาร์ตแสดงโปรแกรมย่อยเมื่อมีการกดปุ่มตัวเลข START และ BACK SPACE	70
รูปที่ 3.22 โพล์ชาร์ตแสดงโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่ START และ BREAK มอเตอร์	71

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของลวดเคลือบน้ำยาเบอร์ต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2 ตำแหน่งแอคเตสที่โปรแกรมจะกระโดดไปทำงานเมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์	48
ตารางที่ 3 ลักษณะการทำงานของฟีนเฟือง	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในวงจรที่มีความถี่ไฟสลับ มักจะมีการใช้ลวดตัวนำที่พันหรือขดขึ้นเป็นคอยล์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำ (Inductant) ขึ้นภายในวงจร เราเรียกอุปกรณ์พวกนี้ว่า อินดักเตอร์ (Inductor) หรือบางที่เรียกว่า โชค (Choke) หรือเรียกว่า คอยล์ (Coil) ก็ได้

คอยล์ที่ใช้ในแต่ละวงจรมันจะมีค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกันไป ซึ่งแล้วแต่คุณสมบัติหรือความต้องการของวงจรมัน ๆ หน่วยพื้นฐานของค่าความเหนี่ยวนำก็คือ เฮนรี่ (Henry) ซึ่งจะขึ้นกับจำนวนรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของคอยล์ ดังนั้นการพันคอยล์ให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการจึงสำคัญมากและค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากในปัจจุบันยังต้องทำการพันคอยล์ด้วยเครื่องมือที่ใช้มือหมุน โครงการเครื่องพันคอยล์แบบอัตโนมัติจึงมีที่มาจากความต้องการความสะดวกสบายและรวดเร็วในการพันคอยล์นั่นเอง ซึ่งจะประหยัดเวลามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพันคอยล์ที่มีจำนวนรอบมาก ๆ หรือจำนวนรอบน้อย ๆ ก็ตาม

1.2 การพันคอยล์ให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการ

คอยล์หรืออินดักเตอร์ทำได้โดยการนำลวดตัวนำมาพันหรือขดบนแกนของคอยล์ ซึ่งมีทั้งที่ทำจากสารแม่เหล็ก เช่น แกนเหล็ก หรือแกนเฟอร์ไรท์ หรืออาจจะใช้แกนที่เป็นฉนวน ไม่มีคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก เช่น แกนพลาสติกหรือเบเคไลท์ (Bakelite) สำหรับเป็นโครงยึดขดลวดในกรณีที่พันด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ หรือถ้าเป็นลวดเส้นโต ๆ ก็พันตัวเปล่า ๆ โดยไม่ต้องมีแกนซึ่งเราเรียกคอยล์ของขดลวดตัวนำที่ไม่ได้ใช้สารแม่เหล็กเป็นแกนเหล่านี้ว่า อินดักเตอร์แกนอากาศ (Air Core Inductor)

คอยล์ของขดลวดตัวนำ มีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งเราเรียกกันว่า อินดักแตนซ์ (Inductance) เราแทนค่านี้ด้วยอักษร L ค่าอินดักแตนซ์เป็นค่าที่เกิดจากการขุดตัวและพองตัวของสนามแม่เหล็กในคอยล์ที่ต่อในวงจรไฟฟ้าสลับ ทำให้มีคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าที่พยายามจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในวงจร

ค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ขึ้นกับชนิดและขนาดของแกน รวมทั้งลักษณะการพันคอยล์และจำนวนขดลวดของคอยล์ คอยล์ที่ใช้แกนเป็นสารแม่เหล็กจะมีค่าอินดักแตนซ์มากกว่าคอยล์ที่ใช้แกนเป็นฉนวนหรือแกนอากาศมาก และคอยล์ที่มีจำนวนขดลวดมากจะทำให้มีค่าอินดักแตนซ์มากขึ้นตามไปด้วย

คำจำกัดความของหน่วยพื้นฐานของค่าอินดักแตนซ์ ซึ่งมีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry) นั้น ก็คือ ตัวนำหรือคอยล์จะมีค่าอินดักแตนซ์ 1 เฮนรี ก็ต่อเมื่อ มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในอัตรา 1 แอมแปร์ ต่อ 1 วินาที แล้วทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (Vemf) 1 โวลต์ หน่วยย่อยของเฮนรี ได้แก่ มิลลิเฮนรี (milli henry) และไมโครเฮนรี (micro henry) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\text{มิลลิเฮนรี (mH)} = 1/1,000 \text{ H}$$

$$\text{หรือ } 1 \text{ H} = 1,000 \text{ mH}$$

$$\text{ไมโครเฮนรี (}\mu\text{H)} = 1/1,000,000 \text{ H}$$

$$\text{หรือ } 1 \text{ H} = 1,000,000 \mu\text{H}$$

คอยล์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าอินดักแตนซ์ในช่วงกว้างมาก เช่น ถ้าอยู่ในวงจรจ่ายไฟ ก็ใช้ค่าหลายเฮนรี ซึ่งจะต้องใช้ขดลวดพันบนแกนเหล็กจึงจะได้ค่ามาก ๆ ถ้าอยู่ในวงจรที่ความถี่ไม่สูงนัก ค่าอินดักแตนซ์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงมิลลิเฮนรี (mH) ถ้าในวงจรความถี่ปานกลาง และที่ความถี่สูงขึ้นไป ค่าอินดักแตนซ์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงไมโครเฮนรี (μH)

ในตัวนำข้อมมีค่าอินดักแตนซ์เสมอ แม้ว่าตัวนำนั้นไม่อยู่ในรูปของคอยล์ก็ตาม ลวดตัวนำที่เป็นเส้นตรงสั้น ๆ จะมีค่าอินดักแตนซ์น้อยมาก แต่ถ้าหากมีกระแสที่เปลี่ยนแปลงไหลผ่านตัวมันมากพอก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นได้ หรือลวดตัวนำที่ยาวเพียงไม่กี่นิ้ว เราอาจจะมองข้ามไปได้ ถ้าอยู่ในวงจรความถี่ต่ำ ๆ แต่ในกรณีที่ความถี่สูงกว่า 100 MHz ขึ้นไป เส้นลวดอันนี้อาจมีผลต่อความถี่ในวงจรได้

ค่าอินดักแตนซ์โดยประมาณของขดลวดที่พันชั้นเดียวบนแกนอากาศ คำนวณได้จากสูตร

$$\text{ค่าอินดักแตนซ์ } L = \frac{a^2 n^2}{9a + 10b}$$

หรือหาจำนวนรอบของขดลวดได้โดยการจัดสูตรใหม่

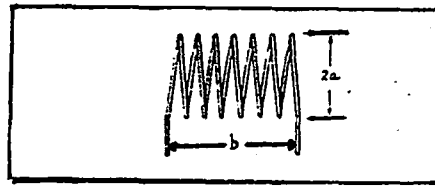
$$\text{จำนวนรอบ } n = \sqrt{\frac{L(9a + 10b)}{a^2}}$$

เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ มีหน่วยเป็น μH

a คือ รัศมีของคอยล์ มีหน่วยเป็นนิ้ว

b คือ ความยาวในการพันขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

n คือ จำนวนรอบของขดลวด



รูปที่ 1.1 แสดงความหมายของ a และ b ของขดลวด

ค่าที่ได้จากการคำนวณของสูตรนี้ จะใกล้เคียงความจริงถ้าความยาวของการพันขดลวด (ค่า b) มีไม่น้อยกว่า 0.8a

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณหาค่า L สมมติมีคอยล์ขดหนึ่ง พันไว้ 48 รอบ ด้วยระยะการพัน 32 รอบ
ตอนนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอยล์ = 3/4 นิ้ว ให้หาค่า L ของขดลวดขดนี้

$$\text{ระยะพันคอยล์ 32 รอบ ได้คอยล์ยาว} = 1 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{ถ้าคอยล์พัน 48 รอบ จะได้ ความยาว (ค่า b) = } 48 / 32 = 1.5 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของคอยล์} = 3 / 4 \text{ นิ้ว} = 0.75 \text{ นิ้ว}$$

$$\therefore \text{รัศมีของคอยล์ (ค่า a) = } 0.75 \div 2 = 0.375 \text{ นิ้ว}$$

แทนค่าในสูตร

$$\begin{aligned} L &= \frac{.375 \times .375 \times 48 \times 48}{(9 \times .375) + (10 \times 1.5)} \\ &= 17.6 \mu\text{H} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาจำนวนรอบของคอยล์ สมมติ ต้องการพันคอยล์ให้ได้ค่าอินดักแตนซ์ = 10 μH โดยที่คอยล์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และความยาวของคอยล์เท่ากับ 1 1/4 นิ้ว ดังนั้น a = 0.5, b = 1.25 และ L = 10 แทนค่าในสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} \text{หาจำนวนรอบ } n &= \sqrt{\frac{L(9a + 10b)}{a^2}} \\ &= \sqrt{\frac{10(4.5 + 12.5)}{.5 \times .5}} \\ &= \sqrt{680} = 26.1 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติเราพันแค่ 26 รอบซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ เนื่องจากความยาวของคอยล์ที่ต้องการ = 1.25 นิ้ว เราจึงหาค่าจำนวนรอบตอนนี้ได้ = 26.1 / 1.25 = 20.9 รอบตอนนี้

เรานำค่าจำนวนรอบต่อนิ้วที่ได้ไปเทียบดูในตารางที่ 1 เพื่อหาค่าเบอร์ลวดที่จะนำมาพันคอยล์ จะเห็นว่าลวดเบอร์ AWG 17 หรือ SWG 18 ในตารางที่ 1 สามารถใช้ได้เพราะพันได้ถึง 21.2 รอบต่อ นิ้ว (มากกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย) เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ หรือจะใช้ลวดเบอร์อื่นที่เล็กกว่าก็ได้ (ลวดเบอร์สูงขึ้น)

ในการพัน ให้พันจนได้จำนวนรอบ 26 รอบตามที่ต้องการ แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างรอบ ให้เท่าๆกัน จนได้ความยาวรวมของคอยล์เท่ากับ 1.25 นิ้ว

สูตรสำหรับหาค่าอินดักแตนซ์และจำนวนรอบอีกแบบ ซึ่งเหมือนกับสูตรก่อน แต่อยู่ในรูปแบบที่ต่างกันเท่านั้น คือ

$$* \text{ หาค่าอินดักแตนซ์ } L (\mu\text{H}) = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l}$$

$$* \text{ หาจำนวนรอบ } n = \frac{\sqrt{L(18d + 40l)}}{d}$$

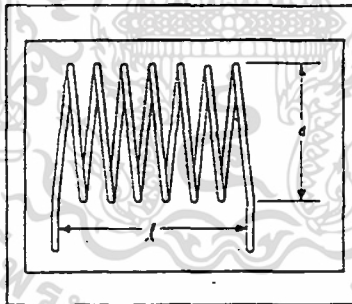
กำหนดให้

$$L = \text{ค่าอินดักแตนซ์ หน่วยเป็นไมโครเฮนรี}$$

$$d = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์ หน่วยเป็นนิ้ว}$$

$$l = \text{ความยาวของคอยล์ หน่วยเป็นนิ้ว}$$

$$n = \text{จำนวนรอบของคอยล์}$$



รูปที่ 1.2 แสดงความหมายของ l และ d

ใช้โจทย์ตามตัวอย่างที่ 1 ในการหาค่าอินดักแตนซ์ ดังนั้น $d = 0.75$, $l = 48/32 = 1.5$ และ $n = 48$ แทนค่าในสูตร

$$L = \frac{0.75^2 \times 48^2}{18 \times 0.75 + 40 \times 1.5}$$

$$= \frac{1296}{73.5} = 17.6 \mu\text{H}$$

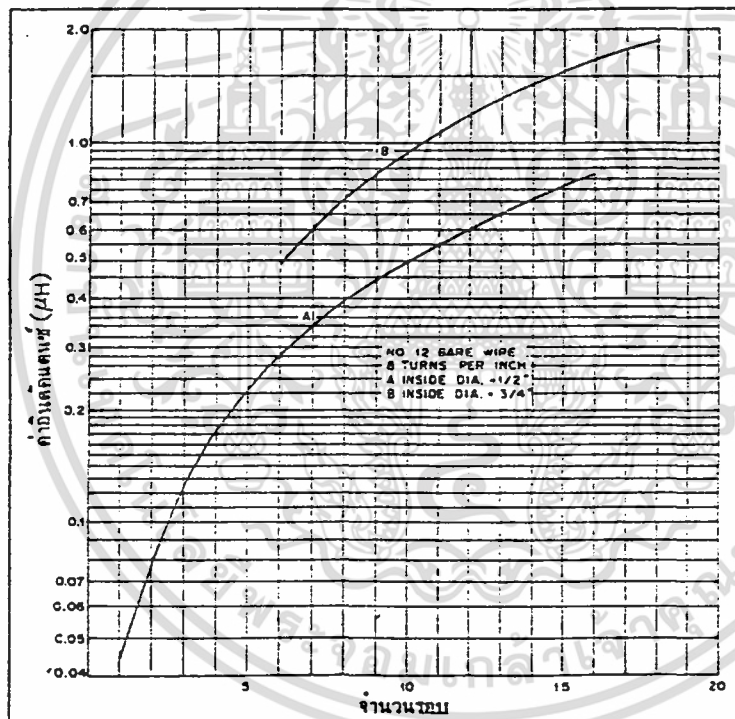
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้โจทย์ตามตัวอย่างที่ 2 ในการหาจำนวนรอบ ดังนี้ $d = 1$, $l = 1.25$ และ $L = 10$ แทนค่าในสูตร

$$n = \frac{\sqrt{10(18 \times 1 + 40 \times 1.25)}}{1}$$

$$n = \sqrt{680} = 26.1 \text{ รอบ}$$

โดยมากแล้วค่าที่หาได้จากสูตรอินดักแตนซ์จะไม่ค่อยตรงนัก ถ้านำไปใช้กับคอยล์อันเล็ก ๆ เช่นที่ใช้ในย่านความถี่ VHF หรือที่ใช้เป็นตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low pass filters) เพื่อกันไม่ให้คลื่นฮาร์โมนิคออกไปรบกวนโทรทัศน์ เพราะความหนาของลวดตัวนำไม่มากพอจนต้องตัดทิ้งไปเมื่อนำมาเทียบกับขนาดของคอยล์ ในรูปที่ 1.3 แสดงค่าที่วัดได้จากคอยล์ที่ใช้งานในย่านความถี่ VHF ซึ่งอาจนำมาหาค่าต่าง ๆ ของคอยล์ได้

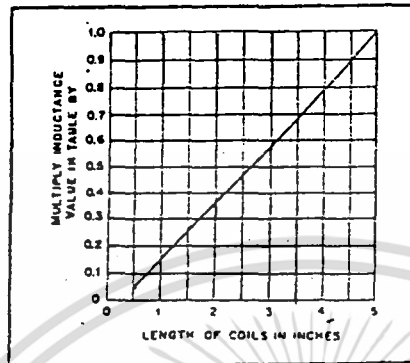


รูปที่ 1.3 แสดงผลการวัดค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดเมื่อใช้ลวดเบอร์ 12 AWG พันที่ 8 รอบต่อนิ้ว โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้น A = 1/2 นิ้ว และของเส้น B = 3/4 นิ้ว

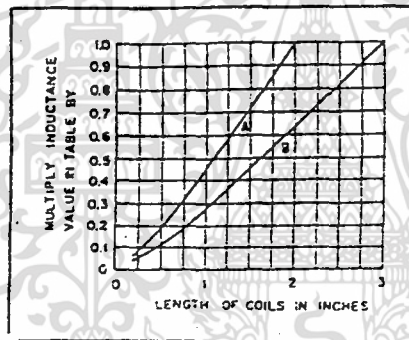
จากกราฟในรูปที่ 1.3 มีเส้น 2 เส้น เส้น A สำหรับคอยล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 1/2 นิ้ว เส้น B สำหรับคอยล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 3/4 นิ้ว คอยล์ทั้ง 2 แบบพันด้วยลวดเบอร์ 12 AWG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะความยาวของการพันคอยล์ 8 รอบต่อนิ้ว (ระยะจากกึ่งกลางของเส้นลวดเส้นหนึ่ง ไปยังกึ่งกลางของเส้นลวดถัดไป = $1/8$ นิ้ว) ค่าของอินดักแตนซ์ที่ได้รวมทั้งค่าอินดักแตนซ์ที่เกิดจากปลายลวดที่ยาว $1/2$ นิ้วด้วย



รูปที่ 1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอยล์กับตัวประกอบการคูณ



รูปที่ 1.5 เส้น A สำหรับคอยล์ที่มี (A), เส้น B สำหรับคอยล์ที่มี (B)

ตามรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 ใช้สำหรับหาค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ที่ใช้กันทั่วไปในวงจรความถี่วิทยุ ย่าน 3-30 MHz ค่าที่ได้จะถูกต้องเพียงพอต่อการใช้งานจริง

ในกราฟของรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 ใช้หาค่าตัวประกอบการคูณ (Multiplying factor) โดยแกนทางแนวนอนของกราฟแสดงค่าความยาวของคอยล์ แกนทางแนวตั้งแสดงค่าตัวประกอบการคูณ

เราหาค่าตัวประกอบการคูณของคอยล์ได้จากการลากเส้นตรงขึ้นไปจากจุดบนแกนทางแนวนอนตามค่าความยาวของคอยล์ที่เราต้องการหาค่าอินดักแตนซ์ ณ จุดที่ตัดกับเส้นกราฟ (Curve) ในกราฟให้ลากเส้นตรงไปตัดกับแกนทางแนวตั้ง จุดนี้เป็นจุดที่แสดงค่าตัวประกอบการคูณที่ต้องการ เราจะเอาค่านี้ไปใช้ในการหาค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตารางข้างล่างกราฟนั้น แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวนรอบต่อนิ้ว และค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ที่มีความยาว 1 นิ้ว เราหาค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ที่ต้องการทราบค่าได้โดยเทียบค่าในตารางตรงช่องที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์ และจำนวนรอบต่อนิ้วตรงกับคอยล์ของเรา เราเอาค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์นี้ที่มีความยาว 1 นิ้ว จากช่องขวาสุดในตาราง มาคูณกับค่าตัวประกอบการคูณที่ได้จากขั้นก่อน ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ที่เราต้องการทราบค่า

ตัวอย่าง 3 ในการหาค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์ที่มีจำนวนรอบ = 20 รอบ เส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์ = 1 นิ้ว คอยล์ยาว = 1 1/4

$$\begin{aligned} \text{คอยล์ยาว } 1 \frac{1}{4} &= 5/4 \text{ นิ้ว} \\ \text{คอยล์มีจำนวนรอบ} &= 20 \text{ รอบ} \\ \therefore \text{จำนวนรอบต่อนิ้ว} &= 20 / (5/4) \\ &= 20 \times (4/5) \\ &= 16 \text{ รอบต่อนิ้ว} \end{aligned}$$

นำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์และจำนวนรอบต่อนิ้ว ไปเทียบค่าในตาราง ได้ค่าอินดักแตนซ์ของคอยล์นี้ที่มีความยาว 1 นิ้ว = 16.9 μH เอาค่าความยาวคอยล์ 1 1/4 ไปหาค่าตัวประกอบการคูณจากกราฟ ได้ค่า = 0.35

$$\therefore \text{คอยล์ที่ต้องการทราบค่ามีอินดักแตนซ์} = 16.9 \times 3.5 = 5.9 \mu\text{H}$$

การหาค่า L สำหรับการพันหลายชั้น
กรณีที่ต้องการพันหลายชั้นจะคำนวณหาค่า L ได้ดังนี้

$$L = \frac{0.8a^2n^2}{6a + 9b + 10c}$$

โดยที่ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวด มีหน่วยเป็น μH

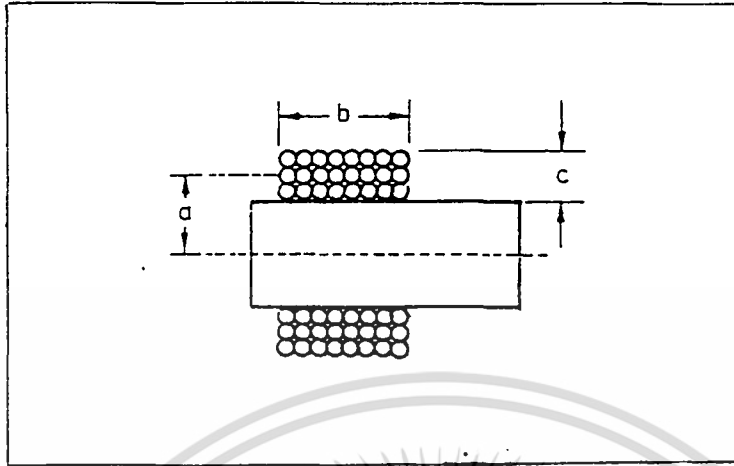
a คือ รัศมีเฉลี่ยของการพัน มีหน่วยเป็นนิ้ว (เท่ากับรัศมีของแกน + 1/2 c)

b คือ ความยาวของการพันขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

c คือ ความหนาของชั้นลวดที่พันกันขึ้นไป

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

ลองดูรูปที่ 4 จะเข้าใจความหมายของอักษรตัวย่อต่าง ๆ ได้ดีขึ้น



รูปที่ 1.6 แสดงความหมายของอักษรย่อต่าง ๆ สำหรับการพันหลายชั้น
ในรูปเป็นภาพหน้าตัดของขดลวด

ถ้าต้องการให้ได้ค่า L สูงสุดสำหรับความยาวของลวดที่มีจำกัดแล้ว ควรเลือกให้ $b = c = 0.8a$ หลังจากที่กำหนดขนาดของ a, b, c และค่า L ที่ต้องการแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาจำนวนรอบที่ต้องพันได้โดยจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{L(6a + 9b + 10c)}{0.8a^2}}$$

ขนาดของลวดที่จะใช้พันขึ้นอยู่กับค่า b, c และระยะห่างระหว่างแต่ละรอบ สำหรับการพันหลายชั้นนี้ หลังจากคำนวณหาจำนวนรอบที่ต้องพันได้แล้วนำมาหารด้วยผลคูณของความยาวของการพัน b และความลึก c ก็จะได้จำนวนรอบต่อตารางนิ้ว ซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับช่องที่ 5 ในตารางที่ 1 เพื่อนำไปพิจารณาเลือกขนาดขดลวด

ตัวอย่างที่ 4 มีแกนยาวพอที่จะพันได้ยาว 0.4 นิ้ว และมีรัศมีของแกน 0.5 นิ้ว ต้องการพันขดลวดให้ได้ค่า L เป็น 22 μH

จากความต้องการนี้แสดงว่า $b = 0.4$ นิ้ว, $L = 22 \mu\text{H}$

เริ่มต้นเราไม่รู้ว่าจะเลือกค่า a และ c เป็นเท่าไรดี ก็สมมติให้ $b = c = 0.8a$ ซึ่งเป็นการพันที่ใช้ความยาวของเส้นลวดน้อยที่สุด

$$\therefore a = b / 0.8 = 0.4 / 0.8 = 0.5 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{และ } c = b = 0.4 \text{ นิ้ว}$$

$$\begin{aligned} \therefore n &= \sqrt{\frac{22(3+3.6+4)}{0.8 \times 0.5 \times 0.5}} \\ &= 34.2 \text{ รอบ} \\ \therefore \text{จำนวนรอบ/ตารางนิ้ว} &= n / bc \\ &= 34.2 / (0.4 \times 0.4) = 213.8 \end{aligned}$$

เมื่อดูจากตารางที่ 1 ในช่องที่ 5 จะเห็นว่าลวดเบอร์ 14 AWG หรือ เบอร์ 16 SWG ใช้ได้ เพราะสามารถพันได้ประมาณ 221 รอบ/ตารางนิ้ว ซึ่งเป็นค่าสูงที่ใกล้เคียงกับ 213.8 มากที่สุด เมื่อดูช่องที่ 4 จะเห็นว่าเบอร์ 14 AWG สามารถพันได้ประมาณ 13.6 รอบต่อความยาว 1 นิ้ว แต่ความยาวของการพันคือ $b = 0.4$ นิ้ว ดังนั้นในแต่ละ 1 ชั้น จะต้องพันให้ได้ $13.6 \times 0.4 = 5.4$ รอบ และจะต้องพันอย่างนี้ประมาณ $34.2/5.4 = 6.3$ ชั้น

สรุปแล้วก็คือต้องพันชั้นละ 5.4 รอบ แล้วทบขึ้นไปจนรวมการพันได้ประมาณ 34.2 รอบ หรือประมาณ 6.6 ชั้นนั่นเอง



ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของลวดเคลือบนำยาเบอร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของลวดเคลือบนำยาเบอร์ต่าง ๆ

เบอร์ลวด AWG	เบอร์ลวด SWG ที่ใกล้เคียง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนรอบ/นิ้ว	จำนวนรอบ ต่อ ค.ว. นิ้ว	ค่า $\Omega/1000$ ฟุต ที่ 88 °ซ
1	1	7.348	-	-	0.1264
2	3	6.544	-	-	0.1593
3	4	5.827	-	-	0.2009
4	5	5.189	-	-	0.2533
5	7	4.621	-	-	0.3195
6	8	4.115	-	-	0.4028
7	9	3.665	-	-	0.5080
8	10	3.264	7.6	57	0.6405
9	11	2.906	8.6	72	0.8077
10	12	2.588	9.6	90	1.018
11	13	2.305	10.7	113	1.284
12	14	2.053	12.0	141	1.619
13	15	1.828	13.5	177	2.042
14	16	1.628	15.0	221	2.575
15	17	1.450	16.8	277	3.247
16	18	1.291	18.9	348	4.094
17	18	1.150	21.2	437	5.163
18	19	1.024	23.6	548	6.510
19	20	0.912	26.4	681	8.210
20	21	0.812	29.4	852	10.35
21	22	0.723	33.1	1065	13.05
22	23	0.644	37.0	1340	16.46
23	24	0.573	41.3	1665	20.76
24	25	0.511	46.3	2100	26.17
25	26	0.455	51.7	2630	33.00
26	27	0.405	58.0	3320	41.62
27	29	0.361	64.9	4145	52.48
28	30	0.321	72.7	5250	66.17
29	31	0.286	81.6	6510	83.44
30	33	0.255	90.5	8175	105.2
31	34	0.227	101	10,200	132.7
32	36	0.202	113	12,650	167.3
33	37	0.180	127	16,200	211.0
34	38	0.160	143	19,950	266.0
35	38-39	0.143	158	25,000	335
36	39-40	0.127	175	31,700	423
37	41	0.113	198	39,600	533
38	42	0.101	224	49,100	673
39	43	0.090	248	62,600	848
40	44	0.080	282	77,600	1070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

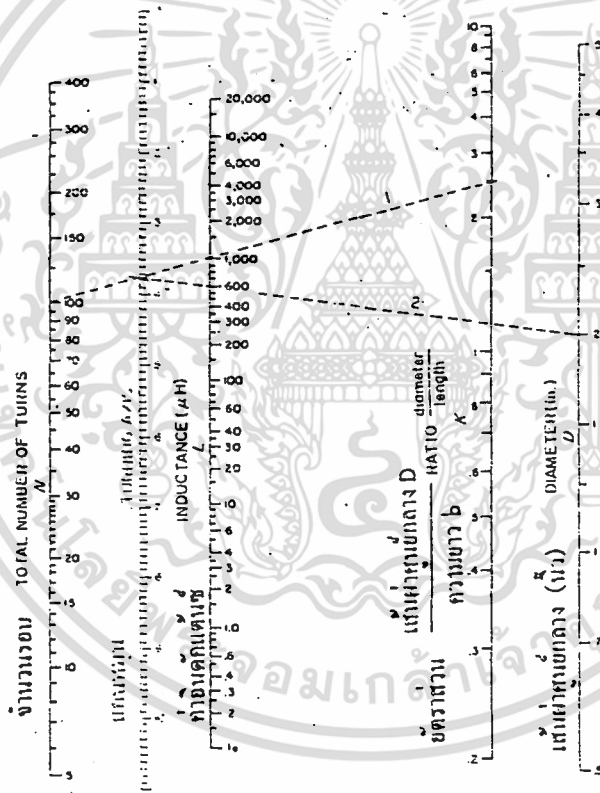
โนโมแกรมสำหรับออกแบบคอยล์ชั้นเดียว (ก)

SINGLE-LAYER COIL DESIGN NOMOGRAM (A)

โนโมแกรมนี้ได้มาจากสูตรการพันคอยล์ ชั้นเดียว คือ

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b}$$

- เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ มีหน่วยเป็น μH
- a คือ รัศมีของคอยล์ มีหน่วยเป็นนิ้ว
- b คือ ความยาวในการพันขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว
- N คือ จำนวนรอบของขดลวด



รูปที่ 1.7 แสดงโนโมแกรมสำหรับการออกแบบคอยล์ชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง

1. จงหาค่า L ของคอยล์ซึ่งพันไว้ 100 รอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว พันยาว 0.8 นิ้ว

หา K (เส้นผ่านศูนย์กลาง/ความยาว) ได้ $2/0.8 = 2.5$ ลากเส้นจาก 2.5 บน K ไปยัง N ที่ 100 ตัดกับแกนหมุน (Turning Axis) ที่ 3.8 แล้วลากเส้นจาก 3.8 นี้ไปยัง 2 บนสเกล D (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ตัดค่า L ที่ $600 \mu H$

2. จงหาจำนวนรอบเมื่อต้องการคอยล์ $290 \mu H$ ยาว 3 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว

หา $K = 3/2.5 = 0.8$ ลาก 290 บนสเกล L กับ 2.5 บนสเกล D ตัดแกนหมุน (Turning Axis) ที่ 4.6 จากจุดนี้ลากเส้นตรงต่อไปตัดแกน K ที่ 0.8 และต่อปลายอีกข้างไปตัดสเกล N ที่ 90 คือจำนวนรอบ



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor หรือ D.C. Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเรียกกันว่าไดนาโม (Dynamo) มีส่วนประกอบและลักษณะคล้ายกันมาก มอเตอร์ที่เป็นเครื่องที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy) ให้เป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) นั้น อาจหมุนแล้วใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ (เฉพาะไฟฟ้ากระแสตรง) แต่เนื่องด้วยตำแหน่งแนวแกนที่ไม่มีกระแสไฟเกิดทาง Commutator (Axis of Sparkless Commutation) ต่างกันกับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งของแปรงถ่านในเมื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นมอเตอร์ ดูรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมี ดังนี้

1. โครง (Frame of yoke)
2. ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Pole or Field Core)
3. แปรงถ่าน (Brush)
4. อามะเจอร์ (Armature)
5. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)
6. ฝาครอบ (End Plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โครง (Frame or yoke)

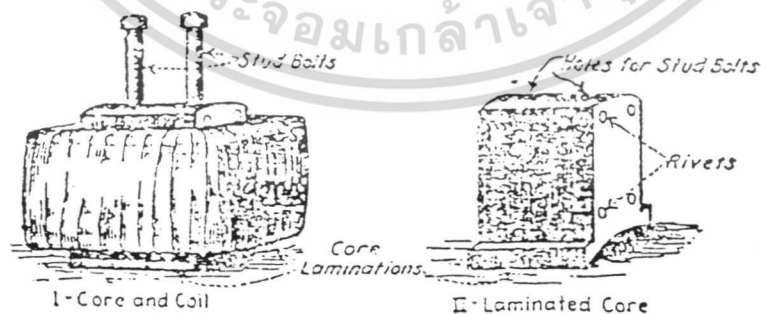
สร้างด้วยเหล็กหล่อ (Cast Iron) หรือเหล็กเหนียว (Steel) เป็นโครงสำหรับยึดขั้วสนามแม่เหล็ก ทำหน้าที่เชื่อมวงจรมแม่เหล็กให้ครบวงจร ซึ่งจะนำเอาวัสดุชนิดที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กมาสร้างเป็นโครงไม่ได้ ดูรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของโครง

2. ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Pole or Field Core)

สร้างด้วยเหล็กหล่อ (Cast Iron) หรือเหล็กอ่อนเหนียว (Steel Laminated) เป็นเหล็กแผ่นบางๆ หนาประมาณ 0.025 นิ้วอบน้ำยาแล้วนำมาอัดกันเป็นปึก เมื่อสร้างเป็นขั้วสนามแม่เหล็ก ทำหน้าที่ให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบตัวมัน ดูรูปที่ 2.3



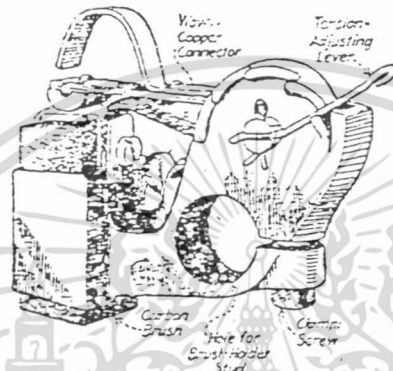
รูปที่ 2.3 ขั้วสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. แปรงถ่าน (Brush)

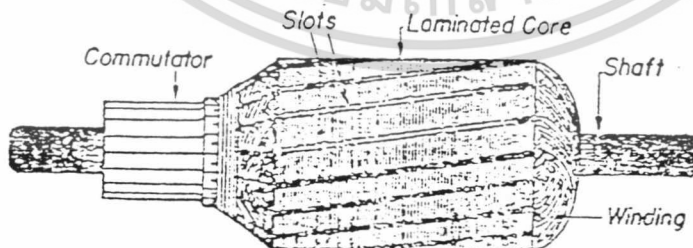
เป็นส่วนผสมของถ่านแกรไฟท์ (Graphite Carbon) ทำเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้ายังคอมพิวเตอร์ แปรงถ่านจะต้องกอดอยู่ในตำแหน่งที่เลื่อนไปมาไม่ได้ ต้องมีสปริงกดแท่งแปรงถ่านเพื่อกันหลุดและมีช่องถ่าน ซึ่งทำด้วยโลหะบังคับไว้เรียกว่า Brush Holder สปริงมีแรงกด (Pressure) ประมาณ 1.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากแปรงถ่านมีสายทองแดงเล็ก ๆ หลายเส้น ขั้วนี้เป็นเกลียวต่อไปยังขั้วต่อสาย (Terminal) จากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แปรงถ่าน

4. อามะเจอร์ (Armature)

สร้างด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ เรียกว่า Laminated Iron Core แต่ละแผ่นหนาประมาณ 0.025 นิ้ว การทำด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ หลาย ๆ แผ่นอัดแน่นก็เพื่อลดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก รอบ ๆ ตัว อามะเจอร์จะมีช่องว่างขนาดกว้างเท่า ๆ กัน สำหรับพันขดลวดเรียกว่า Slot ปลายของขดลวดทุก ๆ ปลายต่อไปยังคอมมิวเตเตอร์ จากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อามะเจอร์และคอมมิวเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

การสร้างประกอบด้วยชิ้นส่วนของทองแดงหลาย ๆ ชิ้นส่วน มีไมก้า (Mica) เป็นฉนวนคั่นระหว่างชิ้นส่วนของทองแดงเหล่านี้ มีหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวด (Coil) ของอามะเจอร์และเป็นหัวต่อขั้วของขดลวด (Coil) ทั้ง 2 ปลาย ดูรูปที่ 2.5

6. ฝาครอบ (End Plate)

คือ ฝาครอบมอเตอร์ ส่วนมากสร้างด้วยเหล็กหล่อ (Cast Iron) หรือเหล็กเหนียว (Steel) หน้าที่ของฝาครอบนี้เพื่อบังคับให้อามะเจอร์หมุนตรงอยู่ในแนวเส้นแรงแม่เหล็กและให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของตัวมอเตอร์ด้วย ดูรูปที่ 2.1

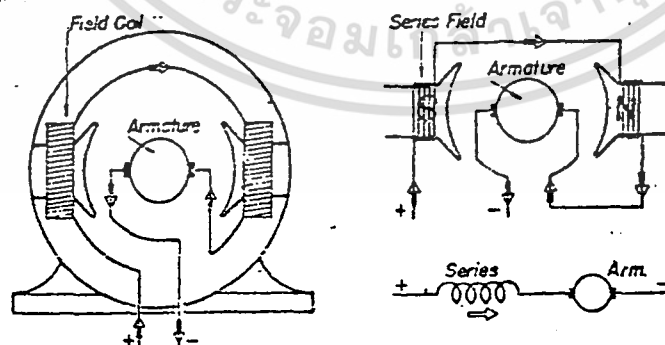
2.1.2 การแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. ซีรีส์มอเตอร์ (Series Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยขดลวดสนามแม่เหล็กเรียกว่า ซีรีส์ฟิลด์ (Series Field) พันด้วยลวดเส้นใหญ่มีจำนวนรอบเพียงเล็กน้อยและต่อเป็นอนุกรมกับอามะเจอร์ คุณสมบัติ (Characteristic) คือ พยายามจะหมุนด้วยความเร็วไม่สิ้นสุดถ้าไม่มี load ก็จะหมุนเร็วขึ้นจนกว่าจะพัง ดังนั้นจึงต้องมี load ประจำเสมอจะหมุนตัวเปล่าไม่ได้ แบบนี้มีแรงเริ่มหมุนสูง (High Starting Torque) และนำไปใช้กับงานหนัก เช่น มอเตอร์สตาร์ทของรถยนต์น้ำมันจันทันยกของ (Crane) กว้านแม่แรง (Winch) รถราง (Tram) เป็นต้น ดูรูปที่ 2.6

หมายเหตุ หมุนด้วยความเร็วไม่สิ้นสุดนั้นหมายความว่าหมุนไม่คงที่ มีการเร่งความเร็วขึ้นทุก ๆ ขณะ ตัวอย่าง ซีรีส์มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว

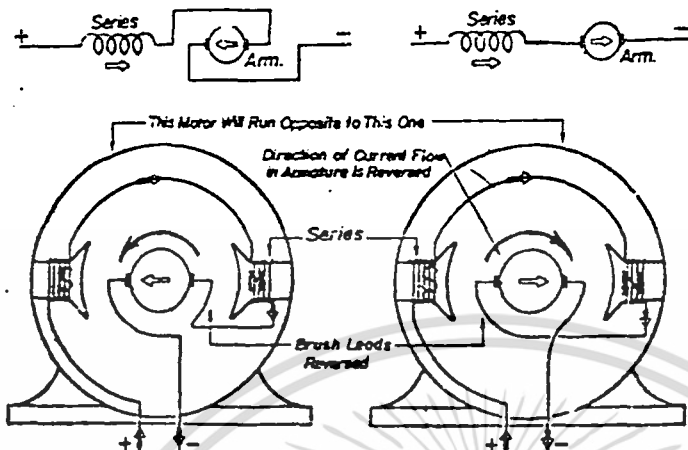


รูปที่ 2.6 ซีรีส์มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

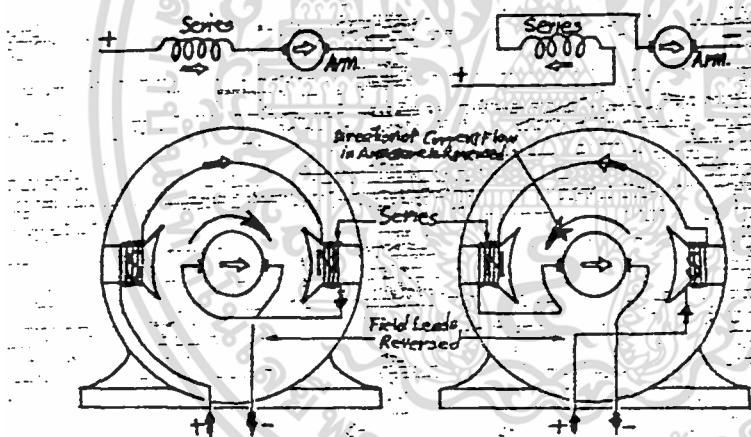
การกลับทางหมุน กลับได้ 2 วิธีดังนี้

ก. กลับโดยกลับทิศทางการไหลของกระแสใน Armature รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการกลับทางหมุน โดยกลับทิศทางการไหลของกระแสในอะมีเจอร์

ข. กลับโดยกลับทิศทางการไหลของกระแสใน Field Pole รูปที่ 2.8



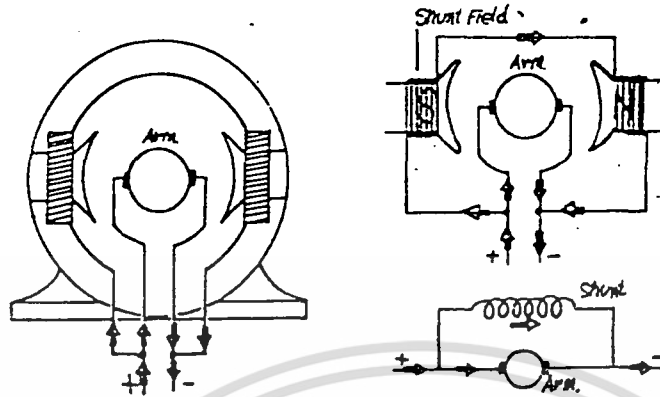
รูปที่ 2.8 แสดงการกลับทางหมุน โดยกลับทิศทางการไหลของกระแสในขั้วสนามแม่เหล็ก

2. ชั้นท์มอเตอร์ (Shunt motor)

เป็นแบบที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปมากกว่าแบบอื่น ๆ ขดลวดสนามแม่เหล็กเรียกว่าชั้นท์ฟิลด์ (Shunt Field) พันด้วยลวดเส้นเล็ก มีจำนวนรอบมาก ต่อขนานกับอะมีเจอร์ คุณสมบัติ (Characteristic) คือมีแรงเริ่มหมุนต่ำแต่รอบการหมุนคงที่ (Low Starting Torque Constant Speed) ตั้งแต่ไม่มี load จนกระทั่งถึง load เต็มที่ แบบนี้บังคับรอบการหมุนของมอเตอร์ได้ และนำไปใช้กับงาน เช่น เครื่องเจาะ (Drilling) เครื่องกลึง (Lathe) เป็นต้น รูปที่ 2.9

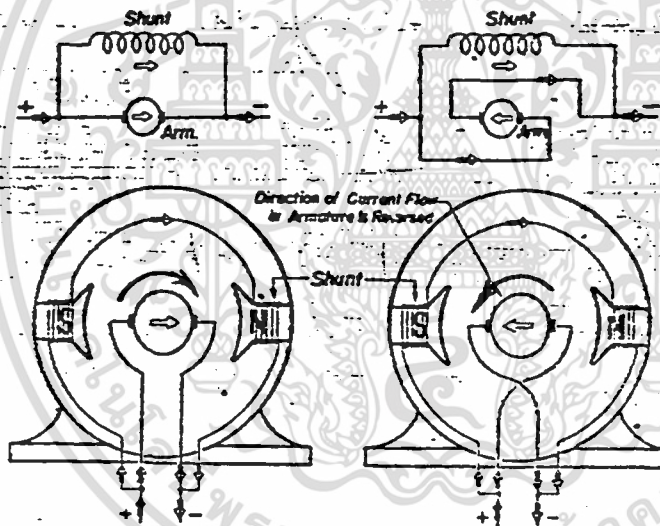
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ชั้้นท์มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชั้้นท์มอเตอร์ชนิดขั้วสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว

การกลับทางหมุน รูปที่ 2.10

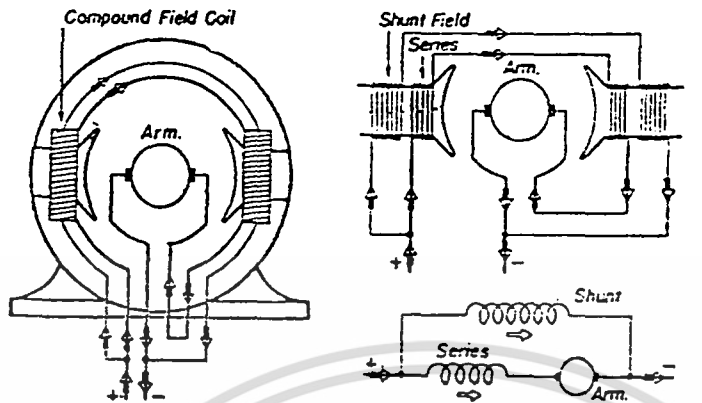


รูปที่ 2.10 การกลับทางหมุนของชั้้นท์มอเตอร์

3. คอมเปานต์มอเตอร์ (Compound Motor)

เพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วสม่ำเสมอทั่วกันทุก ๆ load จะต้องมีขดลวดสนามแม่เหล็ก (field coil) 2 ชุดรวมกัน คือ ซีรีส์ฟิลด์ (Series Field) กับชั้้นท์ฟิลด์ (Shunt Field) และรวมคุณลักษณะ (Characteristic) ของทั้ง 2 แบบไว้ด้วยกัน คือมีแรงเริ่มหมุนสูง แต่รอบการหมุนคงที่ (High Starting Torque Constant Speed) ตั้งแต่ไม่มี load จนกระทั่ง load เต็มที่ คอมเปานต์มอเตอร์ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือแบ่งตามทิศทางกระแสไหลของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก ดังนี้ รูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



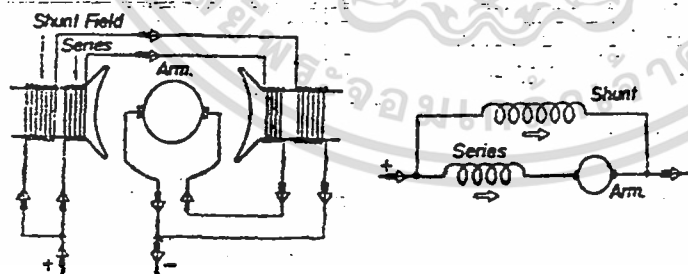
รูปที่ 2.11 คอมเปานด์มอเตอร์

1. คิวมูเลตีฟ คอมเปานด์มอเตอร์ (Cumulative Compound Motor)

เป็นแบบที่ใช้มากที่สุด ในแบบนี้ และมีคุณลักษณะ (Characteristic) ที่มีแรงเริ่มหมุนสูง (High Starting Torque) โดยไม่ Run Away ซึ่งเป็นลักษณะของซีรี่ส์มอเตอร์ (Series Motor) มอเตอร์แบบนี้มีซีรี่ส์ฟิลด์ (Series Field) และชันทฟิลด์ (Shunt Field) ต่อให้ทำงานช่วยกันและกัน ในคิวมูเลตีฟคอมเปานด์มอเตอร์นี้ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในซีรี่ส์ฟิลด์ (Series Field) สูงมากจึงช่วยให้เส้นแรงแม่เหล็กของชันทฟิลด์ (Shunt Field) แรงขึ้นอย่างมาก กระแสในวงจรชันทฟิลด์ (Shunt Field) และซีรี่ส์ฟิลด์ (Series Field) ไหลตามกัน

ก. ลองชันทคิวมูเลตีฟคอมเปานด์มอเตอร์ (Long Shunt Coumulative Compound Motor)

ดูรูปที่ 2.12

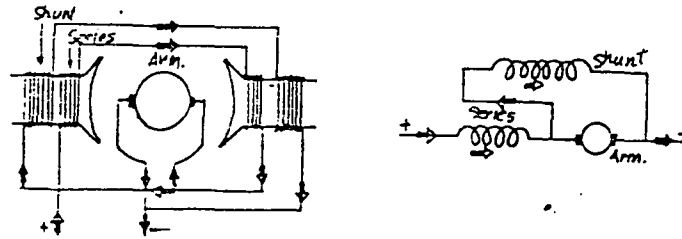


รูปที่ 2.12 ลองชันทคิวมูเลตีฟคอมเปานด์มอเตอร์

ข. ชอร์ตชันทคิวมูเลตีฟคอมเปานด์มอเตอร์ (Short Shunt Cumulative Compound Motor)

ดูรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

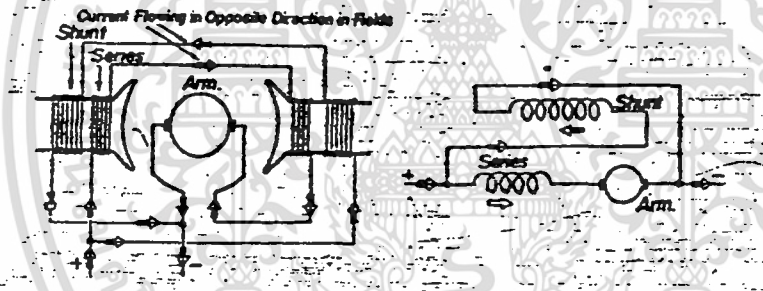


รูปที่ 2.13 ขอรท์ชั้นที่คิวมุเลตีฟคอมเปานคัมมอเตอรื

2. ดิฟเฟอเรนเชี่ยลคอมเปานคัมมอเตอรื (Differential Compound Motor)

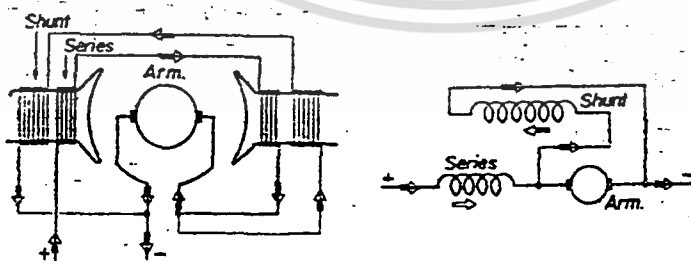
เป็นแบบที่มีแรงเริ่มหมุนต่ำมาก (Low Starting Torque) ความเร็วคงที่สม่ำเสมอดีมากเมื่อ load เปลี่ยนไปไม่มากนัก กระแสในวงจรขัณฑ์ฟิลด์ (Shunt Field) และซีรีส์ฟิลด์ (Series Field) ไหลสวนทางกัน

ก. ลองชัณฑ์ดิฟเฟอเรนเชี่ยลคอมเปานคัมมอเตอรื (Long Shunt Differential Compound Motor) ดูรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลองชัณฑ์ดิฟเฟอเรนเชี่ยลคอมเปานคัมมอเตอรื

ข. ขอรท์ชั้นที่ดิฟเฟอเรนเชี่ยลคอมเปานคัมมอเตอรื (Short Shunt Differential Compound Motor) ดูรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขอรท์ชั้นที่ดิฟเฟอเรนเชี่ยลคอมเปานคัมมอเตอรื

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ระบบคอนโทรลมอเตอร์

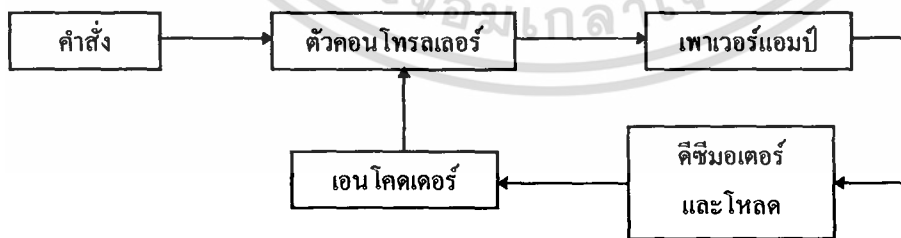
ในปัจจุบันการคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพบได้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมาก เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นการออกแบบระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการวิเคราะห์จึงเป็นเทคนิคใหม่ที่สำคัญและน่าสนใจ

ระบบการคอนโทรลแบบดั้งเดิม พลังจักรกลที่สำคัญในระบบมักได้แก่ พวงมอเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ ไฮดรอลิกแอ็คชูเอเตอร์และพวกเบรกและครัช เป็นต้น แต่ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีคุณภาพสูง ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกลายเป็นพลังจักรกลที่สำคัญในระบบคอนโทรลเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน และในเวลาเดียวกันบวกกับความก้าวหน้าของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สร้างการประยุกต์งานใหม่ ๆ ขึ้นทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ สเตปมอเตอร์ได้รับความนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันอย่างกว้างขวาง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอนาลอกแอ็คชูเอเตอร์ที่ไม่มีตำแหน่งหยุดที่แน่นอนเหมือนสเตปมอเตอร์ ดังนั้นระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปมักเป็นระบบแบบลูปปิด ในระบบแบบลูปปิดตำแหน่งเอาต์พุตหรือความเร็วเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับ ไปเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิงเพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานที่ต้องการ ตัวอย่างเช่นระบบการคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ประยุกต์ใช้กับแขนหุ่นยนต์โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในแต่ละข้อต่อเพื่อให้ได้อัตราส่วนของแรงบิดต่อแรงเพื่อสูง สามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถวัดแรงบิดขับเคลื่อน เพื่อป้อนกลับไปเป็นระบบลูปปิด

2.1.4 พื้นฐานของระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ในบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกที่สำคัญ 4 บล็อก คือ



รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. ตัวคอนโทรลเลอร์ (controller) เป็นส่วนของระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณคอนโทรลไปยังคัมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโพล คอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณอนาลอกเราเรียกว่า อนาลอกคอนโทรลเลอร์ (analog controller) ส่วนคอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณดิจิทัลเราเรียกว่า ดิจิตอลคอนโทรลเลอร์ (digital controller)

2. วงจรไดรเวอร์ (driver circuit) หรือ เพาเวอร์แอมพลิไฟ (power amplified) เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวคอนโทรลเลอร์กับคัมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโพล มีหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้าไปกับคัมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโพล วงจรไดรเวอร์ส่วนใหญ่ได้แก่ เพาเวอร์แอมพลิไฟ ซึ่งอาจแบ่งย่อยออกเป็นลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟ (linear power amplified) และ พัลส์วidthมอดูเลชันแอมพลิไฟ (Pulse Width Modulation Amplified)

3. ฟีดแบคทรานสดิวเซอร์ (feedback transducer) หรือเอนโคเดอร์ (encoder) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้รับรู้หรือตีเทค (detect) สัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการโหลด (loading) สัญญาณที่ตีเทคได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ทำให้ได้สัญญาณเออร์เรอร์ (error) ฟีดแบคทรานสดิวเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ อนาลอกทรานสดิวเซอร์ (analog transducer) คือ สิ่งประดิษฐ์ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณอนาลอก ได้แก่ พกทาโคเจนเนอเรเตอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์และซิงโคร เป็นต้น ส่วนฟีดแบคทรานสดิวเซอร์อีกแบบหนึ่ง คือ ดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ (digital transducer) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ได้แก่ พกอินคริเมนต์เอนโคเดอร์รีโซลเวอร์ แมกเนติกฟลักซ์ เป็นต้น

4. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโพล (load) คือระบบที่ถูกคอนโทรลหรือส่วนที่ออกแรงทำงาน ซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์มาเจอร์อินดักแตนซ์ และแรงเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ

2.1.5 ลักษณะการคอนโทรลของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

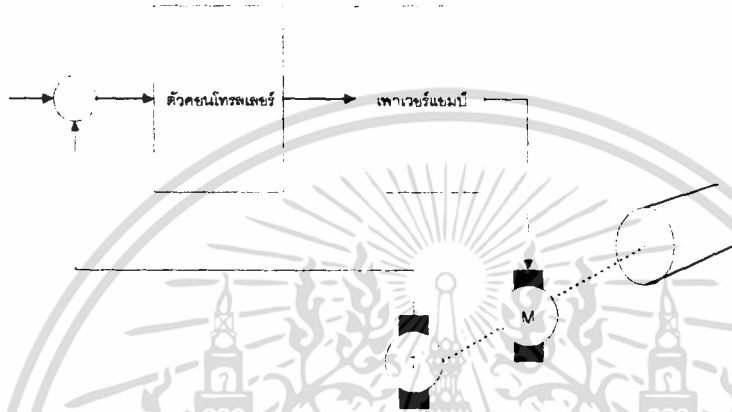
ระบบการคอนโทรลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถที่จะจำแนกลักษณะการคอนโทรลออกได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบอนาลอกคอนโทรล และ ระบบดิจิทัลคอนโทรล

1. ระบบอนาลอกคอนโทรล (Analog Control System)

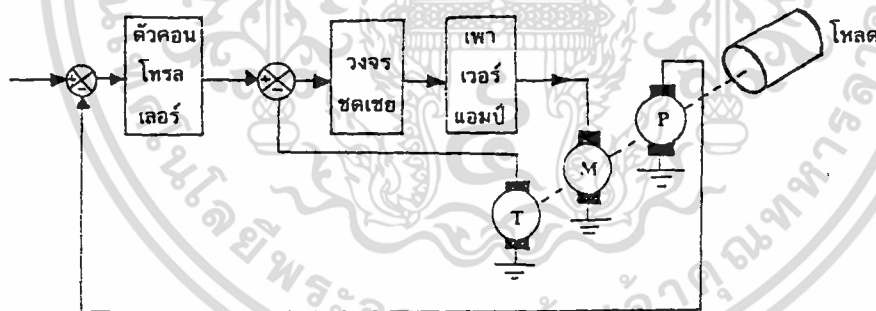
ในคอนโทรลลูปของระบบอนาลอกคอนโทรล เอาท์พุทของระบบจะถูกวัดค่าหรือตีเทคค่าได้เป็นสัดส่วนกับสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาลอก เช่น ระบบที่มีการป้อนกลับด้วยทาโคมิเตอร์ ในรูปที่ 2.17 โวลต์เตจเอาท์พุทของทาโคมิเตอร์จะเป็นสัญญาณอนาลอกที่แสดงถึงความเร็วมอเตอร์

ในทำนองเดียวกัน ระบบการคอนโทรลตำแหน่งในรูปที่ 2.18 ไคนามิกวาริเอเบิล (การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพล) จะเป็นสัดส่วนกับโวลต์เตจเอาต์พุตที่ได้จากโปเทนทิโอมิเตอร์ นั่นคือตำแหน่งเอาต์พุตของระบบเป็นสัญญาณอนาลอกที่มีลักษณะเป็น ไคนามิกวาริเอเบิล

สรุปได้ว่า ระบบอนาลอกคอนโทรลก็คือคอนโทรลลูปที่มีฟีดแบคทรานสดิวเซอร์เป็นอนาลอกทรานสดิวเซอร์ วัตถุประสงค์ของไคนามิกวาริเอเบิลคือเป็นสัญญาณอนาลอกป้อนกลับไปยังตัวอนาลอกคอนโทรลเลอร์เพื่อคอนโทรลให้ได้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ



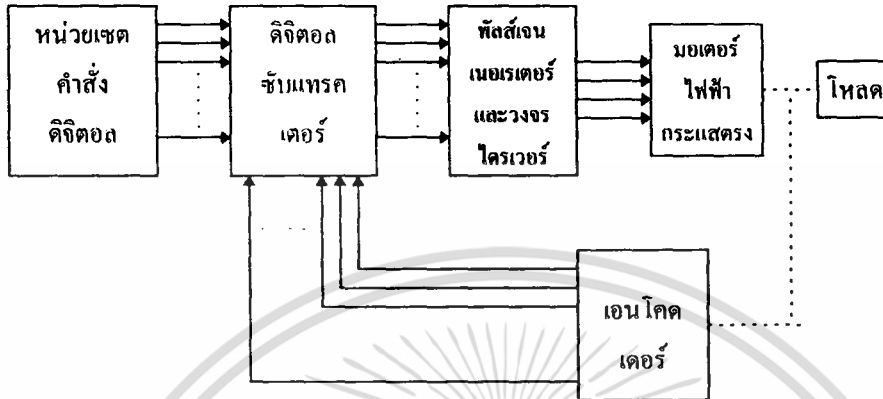
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลตำแหน่งที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวเสริมเสถียรภาพให้ดีขึ้น

2. ระบบดิจิทัลคอนโทรล (Digital Control System)

ระบบดิจิทัลคอนโทรล คือระบบที่คอนโทรลลูปมีฟีดแบคทรานสดิวเซอร์เป็นดิจิทัลทรานสดิวเซอร์ซึ่งสามารถวัดค่าไคนามิกวาริเอเบิลออกเป็นสัญญาณดิจิทัล หรือในรูปของสัญญาณแอนโคดดิ้งของไบนารี คือสัญญาณเอาต์พุตของดิจิทัลทรานสดิวเซอร์จะเป็นไบนารีป้อนกลับไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังตัวคิติดอลคอนโทรลเลอร์ เพื่อคอนโทรลให้คุณสมบัติการทำงานจากระบบเป็นไปตามที่ต้องการ บล็อกไดอะแกรมจากระบบคิติดอลคอนโทรลเลอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 บล็อก ไดอะแกรมจากระบบคิติดอลคอนโทรลเลอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.1.6 วิธีการคอนโทรลมอเตอร์

แบ่งเป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. การคอนโทรลมอเตอร์ด้วยดีซีโวลต์เตจ (D.C. Voltage)
 - 1.1 เฟสคอนโทรลโดยใช้ไทรริสเตอร์ (SCR)
 - 1.2 โวลต์เตจคอนโทรลโดยใช้ทรานซิสเตอร์
 - 1.3 ออน-ออฟ คอนโทรลโดยใช้ทรานซิสเตอร์และไทรริสเตอร์
 - 1.4 เฟสลึกลับคอนโทรล
2. การคอนโทรลมอเตอร์ด้วยเอซีโวลต์เตจ (A.C. Voltage)
 - 2.1 เฟสคอนโทรลด้วยไทรริสเตอร์ (TRIAC)
 - 2.2 อินดิกรอลคอนโทรลด้วยไทรริสเตอร์
3. การคอนโทรลมอเตอร์ด้วยการคอนโทรลความถี่ (frequency)
 - 3.1 อินเวอเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์
 - 3.2 อินเวอเตอร์ด้วยไทรริสเตอร์
 - 3.3 เฟสลึกลับคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นทรานส์ดิวเซอร์แรงบิด ซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษ คือแรงบิดของเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูป 2.20 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟิลด์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ และขดลวดตัวนำเหล่านั้น อยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ r ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\phi I$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

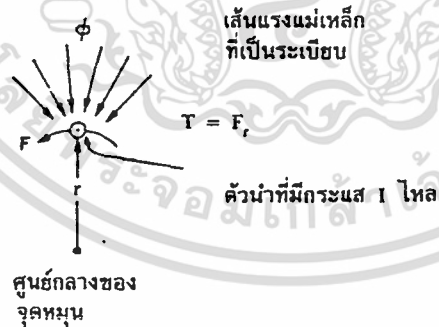
ϕ คือ เส้นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์

I คือ กระแสเป็นแอมแปร์

และ K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลลา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแม่เหล็ก และ กระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลามอเตอร์ คือ

$$E = K\phi\omega$$



รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดแรงบิดในตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ E คือ โวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็น โวลต์

θ คือ เส้นแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.8 ระบบการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบเปิดลูป

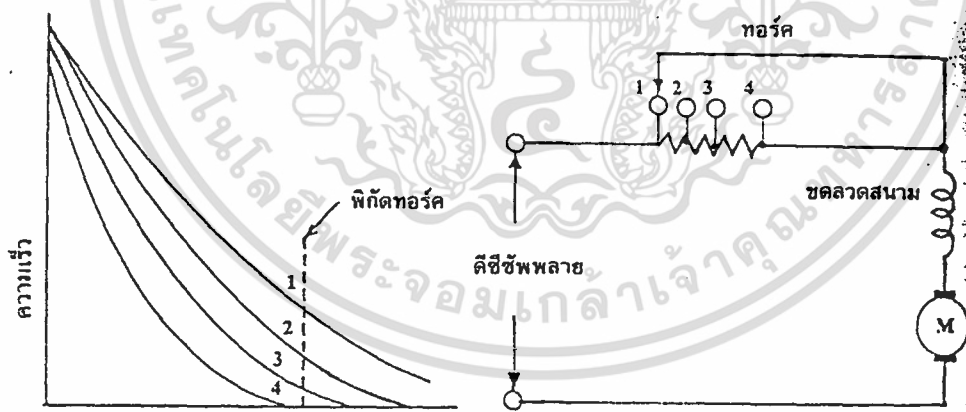
ตัวคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบเปิดลูปแบ่งออกได้เป็น 4 แบบดังต่อไปนี้

1. ตัวคอนโทรลเลอร์แบบความต้านทานที่ปรับค่าได้ (rheostat)

การคอนโทรลแบบนี้เป็นวิธีการคอนโทรลที่ง่ายที่สุดและใช้กันในยุคแรก ๆ มีประสิทธิภาพการคอนโทรลความเร็วอยู่ในพิสัย 4 : 1 และให้การเรีกลูทความเร็วของมอเตอร์ไม่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดและโวลต์เตจของสายส่งการคอนโทรลแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะว่ากำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทาน

ในรูปที่ 2.21 แสดงถึงตัวอย่างการคอนโทรลความเร็วของซีรี่ส์มอเตอร์ (series motor) ด้วยคอนโทรลเลอร์แบบเป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับมอเตอร์ตัวเล็ก ๆ

การคอนโทรลแบบนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ) แต่จะให้ความเร็วสูงจัดมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่โหลดน้อย ๆ ดังนั้นการคอนโทรลแบบนี้จะเป็นประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้าน (friction) คงที่ ยกตัวอย่างเช่น การคอนโทรลความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เครื่องผสมอาหาร และการบังคับแบบนี้จะให้การเรีกลูทที่มีความเร็วลดลงเมื่อความเร็วลดลงทำให้เป็นการยากที่จะคอนโทรลความเร็วให้ได้พิสัยกว้าง

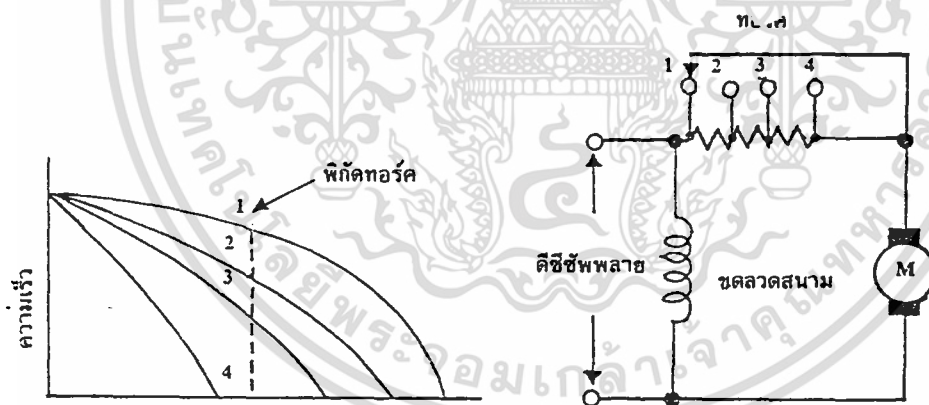


รูปที่ 2.21 แสดงวงจรการคอนโทรลความเร็วของซีรี่ส์มอเตอร์ด้วยตัวต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการคอนโทรลแบบนี้

ส่วนการคอนโทรลความเร็วของชั้้นท์มอเตอร์ (shunt motor) ด้วยตัวคอนโทรลเลอร์แบบรีโอสตาทแสดงในรูป 2.22 ตัวคอนโทรลเลอร์ต่ออนุกรมอยู่กับวงจรรีมาเจอร์และขดลวดของฟิลต์ถูกกระตุ้นด้วยโวลต์เตจคงที่ (ถ้าเป็นมอเตอร์แบบฟิลต์ที่ได้จากแม่เหล็กถาวรก็ใช้ได้)

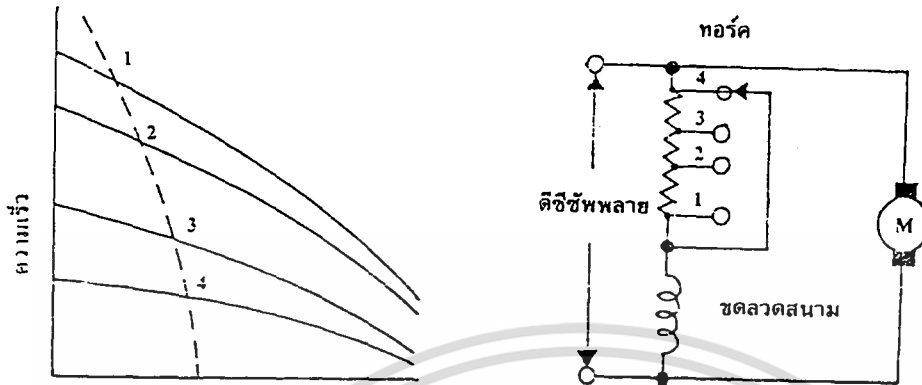
ผลของการคอนโทรลแสดงในรูปซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด การคอนโทรลแบบนี้ถ้าเพิ่มความต้านทานในวงจรรีมาเจอร์มากขึ้น ทำให้รีคูลทความเร็วลดลงด้วย การคอนโทรลแบบนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่แรงบิดของโหลดคงที่ต่ำกว่างานที่มีภาวะของโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง

ในรูป 2.23 เราจะเห็นว่าชั้้นท์มอเตอร์ต่ออยู่กับความต้านทานคอนโทรลการเปลี่ยนแปลงของฟิลต์ วงจรการคอนโทรลแบบนี้มีข้อคืออยู่ที่ว่าความเร็วของมอเตอร์สามารถปรับได้เฉพาะความเร็วที่สูงกว่าความเร็วในตอนที่ยังไม่ได้ใส่ตัวความต้านทานเพื่อคอนโทรลฟิลต์เท่านั้น ส่วนผลเสียหายของการคอนโทรลแบบนี้ คือ แรงบิดคงที่ของมอเตอร์จะลดลงด้วยการเพิ่มค่าความต้านทานที่ใส่เข้าไป (ทำให้สนามแม่เหล็กลดลง) ดังนั้นมอเตอร์อาจจะถูกทำให้โอเวอร์โหลดได้ง่าย และวงจรการคอนโทรลก็ควรจะใช้งานเฉพาะในกรณีเมื่อสภาพของโหลดและการคอนโทรลยืนยันได้ว่าเป็นจริง



รูปที่ 2.22 แสดงวงจรการคอนโทรลความเร็วของชั้้นท์มอเตอร์ด้วยตัวต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการคอนโทรลแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

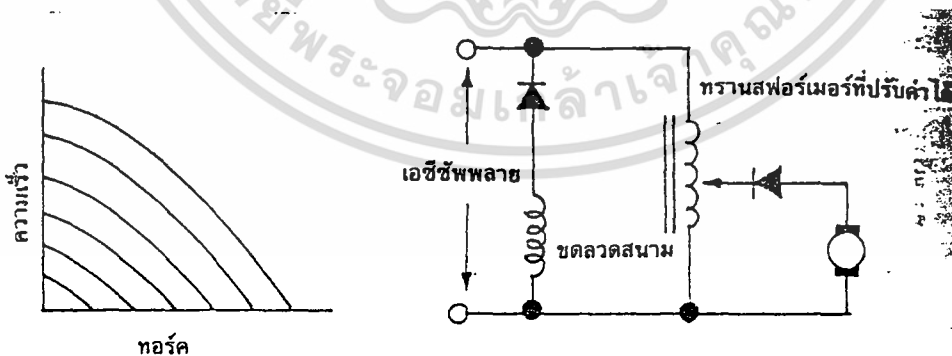


รูปที่ 2.23 แสดงการคอนโทรลชันทมอเตอร์ด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับฟิลด์

2. ตัวคอนโทรลเลอร์แบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ปรับค่าได้ (variac) กับตัวเรกติไฟ

การคอนโทรลแบบนี้สามารถขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้พิสัยความเร็ว 10 : 1 และให้การเรกติเพิลและประสิทธิภาพที่ดีกว่าการคอนโทรลด้วยรีโอสแตท

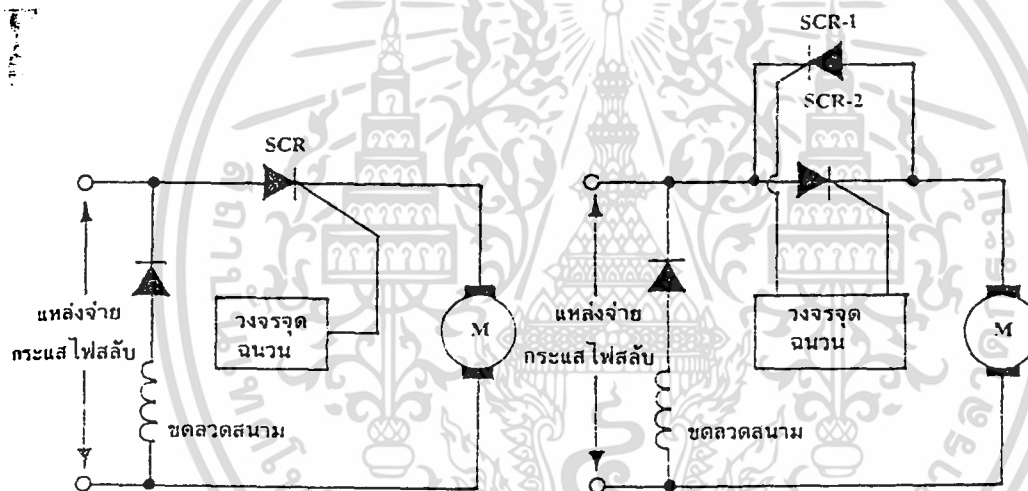
รูป 2.24 แสดงถึงการคอนโทรลโดยใช้วาริแอคบังคับกับโวลต์เตจของชันทมอเตอร์ด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ฟลัดคังที่ ผลของคุณสมบัติความเร็ว-แรงบิดได้รับการปรับปรุงดีขึ้นกว่าการคอนโทรลด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ และให้การเรกติเพิลความเร็วคงที่ได้ดีขึ้นตลอดพิสัยความเร็วที่กว้างกว่า



รูปที่ 2.24 แสดงทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนโทรลโวลต์เตจของอาร์เมเจอร์ของชันทมอเตอร์

3. ตัวคอนโทรลเลอร์แบบ SCR (ไทรสเตอร์)

ด้วยการทำงานเป็นแบบครึ่งคลื่นจะให้คุณสมบัติคล้ายกับการคอนโทรลด้วยวาริแอก อย่างไรก็ตามระบบของ SCR ที่ทำงานแบบเต็มคลื่นสามารถให้พิสัยการคอนโทรลความเร็วได้ถึง 20:1 เมื่อใช้เทคนิคการชดเชย "IR" (หมายถึงเทคนิคการรับรู้กระแสและป้อนกลับเป็นระบบปิดรูป) ด้วยวิธีการชดเชย การคอนโทรลความเร็วนี้สามารถให้การเรีอกูละทความเร็วได้ถึง 3% จากไม่มีโหลดถึงภาวะที่มีโหลดเต็มที่ เช่น มอเตอร์มีความเร็วที่กำหนดให้ 1800 รอบต่อนาที การคอนโทรลให้เรีอกูละทความเร็วเท่ากับ 3% ของความเร็วสูงสุด หมายความว่าความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป 54 รอบต่อนาทีเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงสมมติว่ามอเตอร์หมุนอยู่ที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาทีและไม่ได้ต่อโหลด เมื่อต่อกับโหลดตามที่กำหนด ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงเป็น $180 - 54 = 126$ รอบต่อนาที ดังนั้นการเรีอกูละทจะเท่ากับ 30% ของความเร็วที่ตั้งไว้ (set speed)



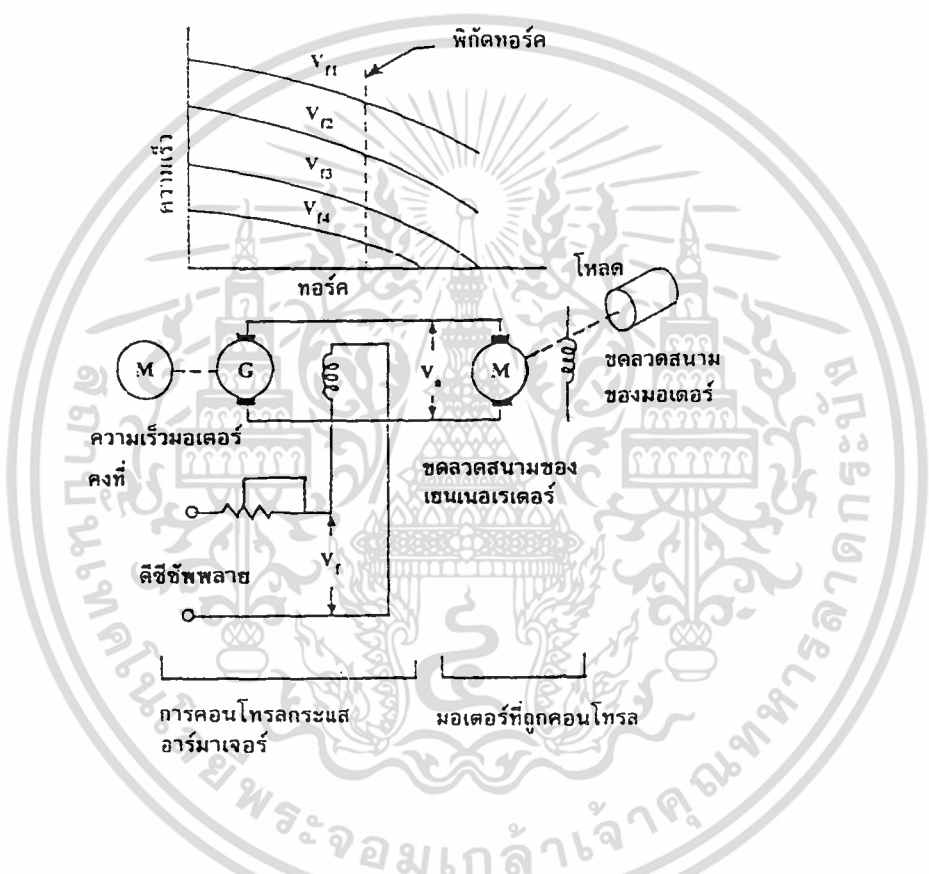
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์ด้วย SCR แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น

4. คอนโทรลเลอร์แบบคอนโทรลอาร์มาเจอร์โวลต์เตจของมอเตอร์ด้วยเจนเนอเรเตอร์

เป็นวิธีการคอนโทรลความเร็วแบบเปิดรูปที่ค่อนข้างยุ่งยากดังแสดงในรูปที่ 2.26 มอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่จะใช้เป็นตัวขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ที่มีโวลต์เตจของฟิลด์ถูกคอนโทรลให้ได้ ดังนั้นเจนเนอเรเตอร์จะเป็นตัวผลิตโวลต์เตจที่ปรับค่าได้จ่ายให้กับอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์และผลที่ได้ของคุณสมบัติ แรงบิด-ความเร็วจะดีขึ้นกว่าในรูป 2.22 เนื่องจากการคอนโทรลแบบนี้ให้การเรีอกูละทที่เป็นอิสระต่อความเร็วที่ตั้งไว้

ผลลัพธ์ที่ได้ของการคอนโทรลแบบนี้ให้คุณสมบัติที่เหนือกว่าการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์วิธีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาแพงของชุดมอเตอร์

เจนเนอเรเตอร์ และส่วนการคอนโทรลฟิลต์ของเจนเนอเรเตอร์ทำให้การคอนโทรลความเร็ววิธีนี้ใช้ไม่ได้ผลดีกับคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์ตัวเล็ก ๆ การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์ตัวใหญ่ ๆ ตั้งแต่ 1 แรงม้าขึ้นไป เพราะว่าคุณสมบัติการขยายกำลังไฟฟ้าของชุดมอเตอร์เจนเนอเรเตอร์เหมาะสมใช้ในระบบการคอนโทรลลูปปิดในยุคแรก ๆ เมื่อหลอดสูญญากาศกำลังสูงและเครื่องขยายแบบแม่เหล็กเริ่มนำมาใช้สำหรับการคอนโทรล



รูปที่ 2.26 ระบบการคอนโทรลแบบลูปปิด โดยใช้วิธีการคอนโทรลอาร์มาเจอร์โวลต์เตจ

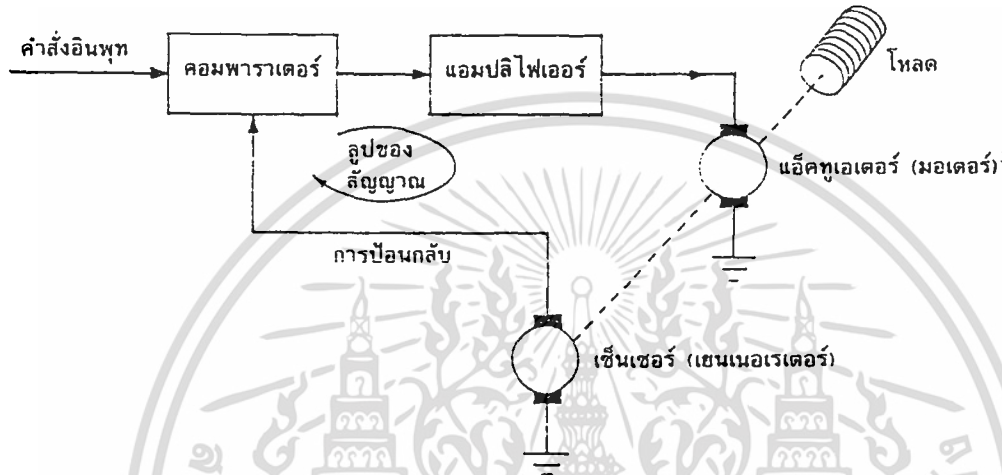
วิธีการคอนโทรลดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเชื่อว่า จะได้รับการพัฒนาเพื่อใช้งานทั้งหมดทุกวิธี วิธีการคอนโทรลเหล่านั้นถือได้ว่าเป็นตัวอย่างของปัญหาที่จะต้องได้พบในการคอนโทรลแบบลูปเปิดของระบบการทำงานที่คอนโทรลด้วยมือ ในอดีตเราสามารถเห็นได้ว่าในแต่ละกรณีก็มีข้อเสียที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นซึ่งเป็นข้อจำกัดให้แต่ละวิธีใช้งานได้เฉพาะอย่างเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 ระบบคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบปิดลูป

ระบบการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปิดลูปดังแสดงในรูปที่

2.27



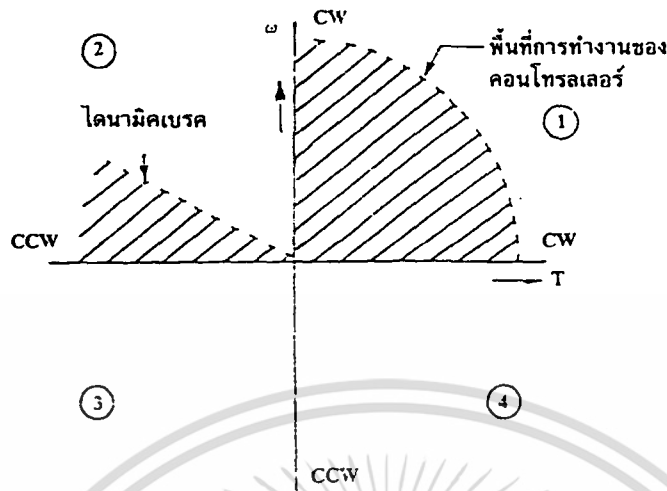
รูปที่ 2.27 ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบปิดลูป

แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ระบบการคอนโทรลความเร็วแบบเร็กูเลเตอร์

จะเป็นการบังคับความเร็วเพียงทิศทางเดียวโดยทำงานในควอดแรนต์แรกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ระบบไม่สามารถจะให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าเป็นลบ และไม่สามารถกลับทิศทางของความเร็วได้

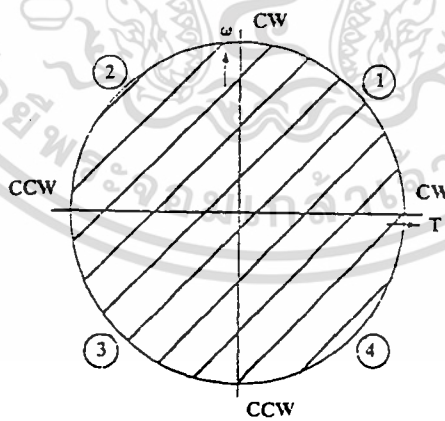
ระบบการคอนโทรลความเร็วแบบทิศทางเดียวนี้ เราสามารถจะเพิ่มไดนามิคเบรก (dynamic break) เข้าไปในระบบได้ทำให้เราสามารถจำกัดแรงบิดลบของมอเตอร์ในควอดแรนต์ที่สองได้ แต่เนื่องจากการบังคับในควอดแรนต์ที่สองนี้อยู่ในพื้นที่การควบคุมให้มอเตอร์หยุดหมุน ดังนั้น เราถือได้ว่าการควบคุมความเร็วแบบเร็กูเลเตอร์เป็นการคอนโทรลแบบควอดแรนต์เดียว



รูปที่ 2.28 ไดอะแกรมแสดงการทำงานเพียงควอดแรนท์แรกของระบบควบคุมความเร็วแบบทิศทางเดียว

2. ระบบการคอนโทรลความเร็วแบบเซอร์โว

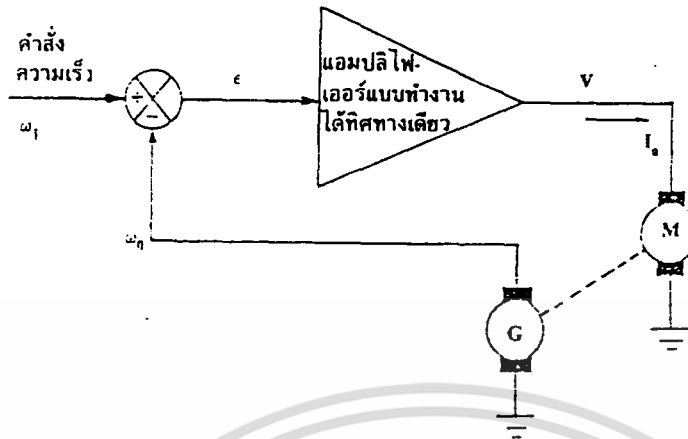
จะเป็นการบังคับความเร็วได้สองทิศทาง นอกจากนั้นระบบแบบนี้ยังสามารถให้ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้ทั้งในทิศทางลบและบวกดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งแสดงถึงพื้นที่การคอนโทรลแบบเซอร์โวก็สามารถทำงานได้แบบสองทิศทางหรือเป็นการคอนโทรลได้ 4 ควอดแรนท์



การทำงานของคอนโทรลเลอร์อยู่ในพื้นที่แรงทั้งหมด

รูปที่ 2.29 ไดอะแกรมแสดงการทำงานได้ถึง 4 ควอดแรนท์ของระบบควบคุมความเร็วแบบเซอร์โว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 การคอนโทรลแบบทำงานควอดแรนต์เดียว

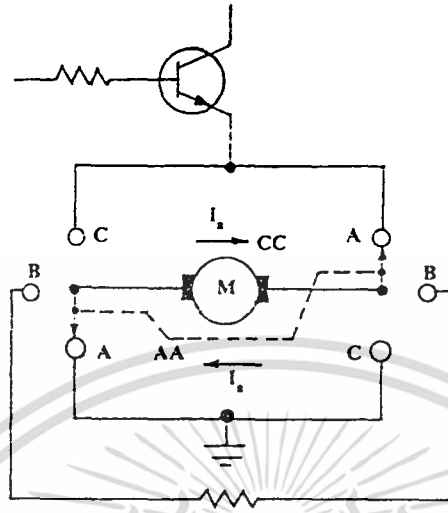
2.1.10 ระบบการคอนโทรลความเร็วได้เพียงทิศทางเดียวหรือควอดแรนต์เดียว

ระบบคอนโทรลแบบควบคุมความเร็วได้เพียงควอดแรนต์เดียวจะใช้เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบบขยายสัญญาณได้ทิศทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.30 เพาเวอร์แอมป์ดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังงานให้มอเตอร์เฉพาะกระแสและโวลต์แดงที่เป็นบวก (หรือลบเท่านั้น) ดังนั้นการคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์จะกระทำได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้นด้วยระบบแรงบิดของโพลด์เป็นเหมือนแรงบิดที่ด้านการหมุนของมอเตอร์ ในรูปที่ 2.28 เมื่อความเร็วของมอเตอร์ ω แทนแกนตั้งและแรงบิด T แทนแกนนอน เราจะหาได้ว่าความเร็วที่คอนโทรลได้ และช่วงพิสัยของแรงบิดของระบบการคอนโทรลแบบควอดแรนต์เดียวจะอยู่ในควอดแรนต์แรกเท่านั้น

2.1.11 การคอนโทรลความเร็วที่สามารถกลับทิศทางได้

รูปที่ 2.31 แสดงถึงการจัดวงจรของสวิทช์ซึ่งให้การคอนโทรลความเร็วของมอเตอร์แบบใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวขั้วเดียวและสามารถกลับทิศทางการหมุนได้

การจัดสวิทช์ที่กลับทิศทางได้นี้ให้อยู่ที่ตำแหน่งกลาง (B) ก็จะทำให้ภาวะการคอนโทรลแบบไดนามิกเบรคเพื่อเป็นการลดไม่ให้สวิทช์กลับทิศทางของโวลต์แดงจ่ายให้กับมอเตอร์รวดเร็วเกินไปในเมื่อมอเตอร์ยังคงหมุนอยู่ในทิศทางเดิม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ทรานซิสเตอร์พัง (breakdown)

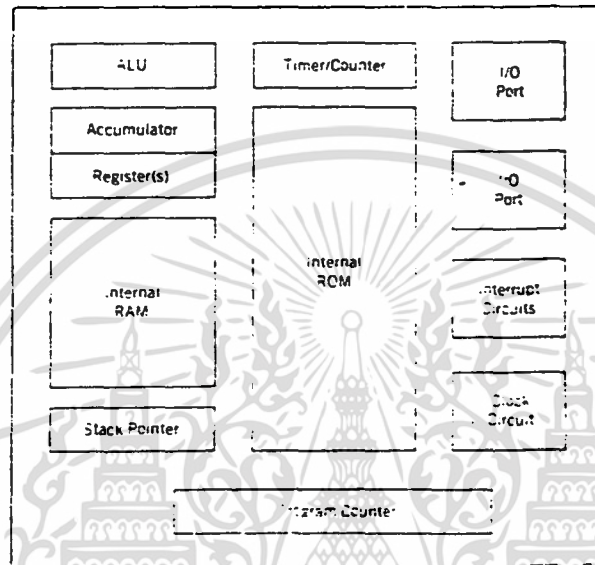


รูปที่ 2.31 แสดงการจัดวงจรของสวิตช์ที่กลับทิศทางได้

วงจรกลับทิศทางของมอเตอร์อาจทำงานได้ด้วยรีเลย์แทนที่จะใช้สวิตช์ที่ทำงานด้วยมือ ทำให้ได้ระบบการคอนโทรลความเร็วที่มีคุณสมบัติแบบคอนโทรลได้สองทิศทางสำหรับการบังคับใน ระยะทางไกล อย่างไรก็ตามวิธีการคอนโทรลแบบนี้ตามปกติทั่วไปใช้งานไม่ได้ผลดีในระบบการคอนโทรลตำแหน่งแบบปิดลูป หรือในระบบเซอร์โวคอนโทรลความเร็ว ระบบเซอร์โวตามปกติจะมีการเปลี่ยนกลับทิศทางอยู่ตลอดเวลารอบ ๆ จุดสมดุล ดังนั้นหน้าสัมผัสของรีเลย์จะสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นแล้วระบบดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับไทม์ดีเลย์และความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) เนื่องจากการสวิตช์ของรีเลย์

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ส่วนประกอบของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยทั่วไป จะต้องมี Arithmetic and Logic Unit (ALU), Program Counter (PC), Stack Pointer (SP), รีจิสเตอร์ และมีหน่วยความจำทั้ง ROM และ RAM พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตแบบขนาน พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตแบบอนุกรม เคาน์เตอร์ (counters) และวงจรสัญญาณนาฬิกา (clock circuit) ซึ่งแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.32

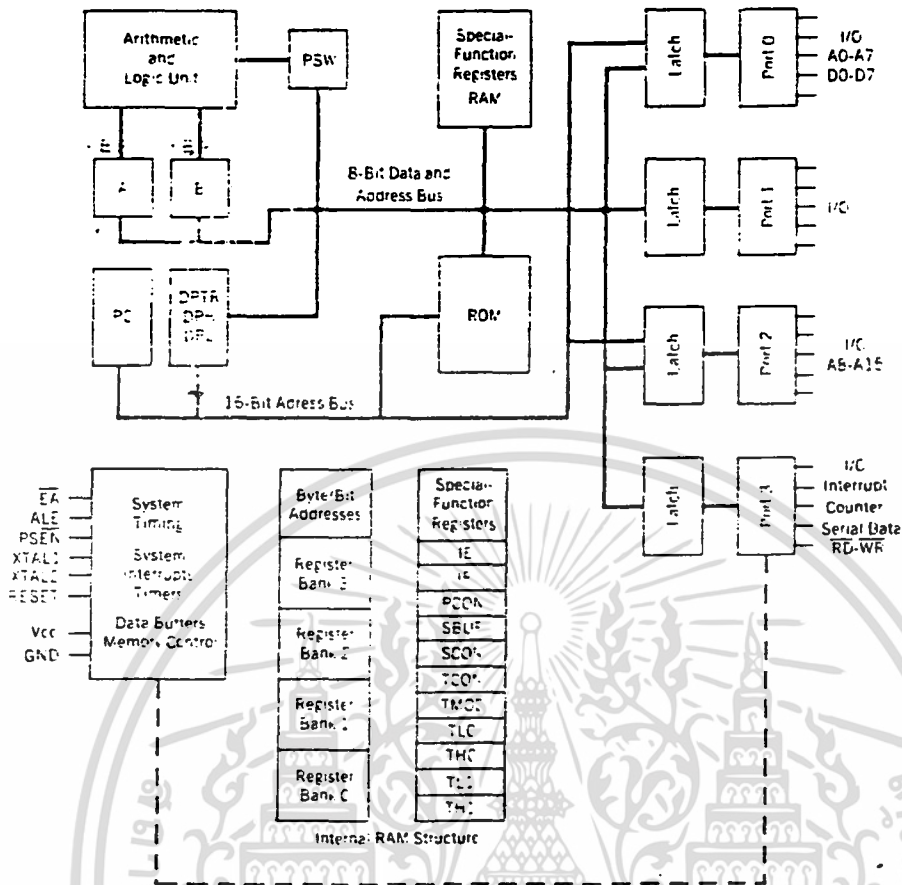


รูปที่ 2.32 บล็อกไดอะแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

บล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.32 เป็นโครงสร้างโดยรวมของไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกตระกูลสำหรับโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 8 บิตนั้น จะมีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตที่เพิ่มขึ้น และมีรีจิสเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานภายในไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการโปรแกรมได้อีกด้วย

2.2.1 โครงสร้างภายในของ MCS-51

โครงสร้างภายในของ MCS-51 ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญๆ ดังนี้



รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ MCS-51

1. หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และทางตรรกศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU)
2. รีจิสเตอร์ A และ B ขนาด 8 บิต
3. โปรแกรมสเตตัสเวิร์ด (program status word : PSW)
4. โปรแกรมเคาน์เตอร์ (program counter : PC) และเคาต์ดาต้าพอยน์เตอร์ (data pointer : DPTR) ขนาด 6 บิต
5. สแต็กพอยน์เตอร์ (stack pointer : SP) ขนาด 8 บิต
6. หน่วยความจำถาวร (ROM) หรือ อีพรอม (EPROM)
7. หน่วยความจำชั่วคราว (RAM) ภายใน ขนาด 128 ไบต์ ประกอบด้วย
 - รีจิสเตอร์ มีทั้งหมด 4 แบนด์ คือ แบนด์ 0, 1, 2 และ 3 แต่ละแบนด์ประกอบไปด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต จำนวน 8 ตัว คือ R0 - R7 ส่วนนี้มีพื้นที่ทั้งหมด 32 ไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หน่วยความจำจำนวน 16 ไบต์ ที่สามารถอ้างแอดเดรสเพื่อควบคุมการทำงานในระดับบิตได้

- หน่วยความจำสำหรับใช้งานโดยทั่วไป จำนวน 80 ไบต์

8. ขารับสัญญาณอินพุท/เอาต์พุท 32 ขา แบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ละ 8 บิต ซึ่งเรียกว่าพอร์ต (Port) มี 4 พอร์ต คือ P0, P1, P2 และ P3

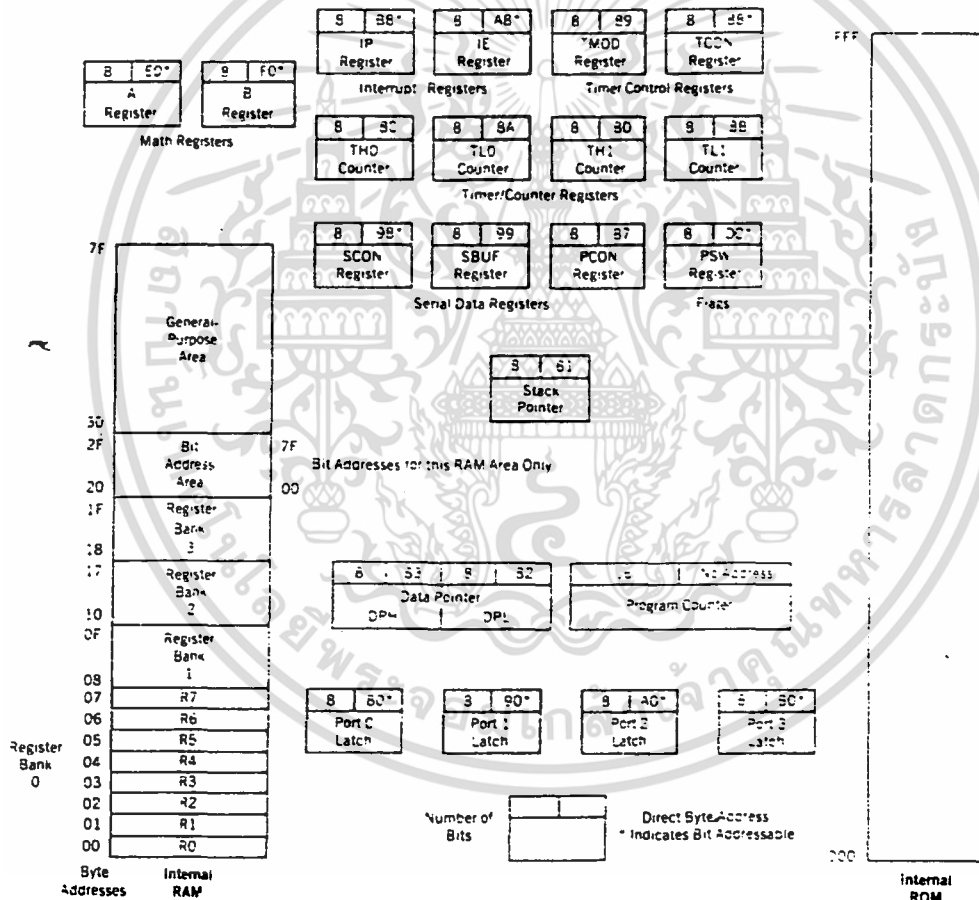
9. ไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ ขนาด 16 บิต 2 ชุด คือ T0 และ T1

10. พอร์ตอนุกรมที่ใช้รับส่งสัญญาณแบบ full duplex เรียกว่า SBUF

11. รีจิสเตอร์ควบคุม (Controlled register) ได้แก่ TCON, TMOD, SCON, IP และ IE

12. มีอินเตอร์รัพท์ทั้งภายในและภายนอก

13. ส่วนของออสซิลเลเตอร์และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาภายใน



รูปที่ 2.34 แสดงหน่วยความจำ ROM, RAM และ รีจิสเตอร์ที่ใช้งานต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 หน้าที่การทำงานของขาแต่ละขาใน MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 โดยทั่วไปจะมี 40 ขา ตัวอย่างเช่น 8051, 87(C)51 หรือ 89(C)51 เป็นต้น ซึ่งภายในขา 40 ขานี้ จะประกอบด้วยพอร์ตที่ใช้งานเป็น อินพุท/เอาต์พุท จำนวน 4 พอร์ต และขาที่เหลือก็จะเป็นขาที่ใช้งานทั่วไปในวงจร เช่น ขา RESET, External Access (EA), Vcc และ GND เป็นต้น สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานในแต่ละพอร์ตหรือในแต่ละขาของ MCS-51 ได้ดังนี้

Port 1 Bit 0	1	P1.0	Vcc	40	+5V
Port 1 Bit 1	2	P1.1	(ADC)P0.0	39	Port 0 Bit 0 (Address/Data 0)
Port 1 Bit 2	3	P1.2	(AD1)P0.1	38	Port 0 Bit 1 (Address/Data 1)
Port 1 Bit 3	4	P1.3	(AD2)P0.2	37	Port 0 Bit 2 (Address/Data 2)
Port 1 Bit 4	5	P1.4	(AD3)P0.3	36	Port 0 Bit 3 (Address/Data 3)
Port 1 Bit 5	6	P1.5	(AD4)P0.4	35	Port 0 Bit 4 (Address/Data 4)
Port 1 Bit 6	7	P1.6	(AD5)P0.5	34	Port 0 Bit 5 (Address/Data 5)
Port 1 Bit 7	8	P1.7	(AD6)P0.6	33	Port 0 Bit 6 (Address/Data 6)
Reset Input	9	RST	(AD7)P0.7	32	Port 0 Bit 7 (Address/Data 7)
Port 3 Bit 0 (Receive Data)	10	P3.0(RXD)	Vcc	31	External Enable (EPROM Programming Voltage)
Port 3 Bit 1 (Transmit Data)	11	P3.1(TXD)	(PROG)ALE	30	Address Latch Enable (EPROM Program Pulse)
Port 3 Bit 2 (Interrupt 0)	12	P3.2(INT0)	PSEN	29	Program Store Enable
Port 3 Bit 3 (Interrupt 1)	13	P3.3(INT1)	(A15)P2.7	28	Port 2 Bit 7 (Address 15)
Port 3 Bit 4 (Timer 0 Input)	14	P3.4(T0)	(A14)P2.6	27	Port 2 Bit 6 (Address 14)
Port 3 Bit 5 (Timer 1 Input)	15	P3.5(T1)	(A13)P2.5	26	Port 2 Bit 5 (Address 13)
Port 3 Bit 6 (Write Strobe)	16	P3.6(WR)	(A12)P2.4	25	Port 2 Bit 4 (Address 12)
Port 3 Bit 7 (Read Strobe)	17	P3.7(RD)	(A11)P2.3	24	Port 2 Bit 3 (Address 11)
Crystal Input 2	18	XTAL2	(A10)P2.2	23	Port 2 Bit 2 (Address 10)
Crystal Input 1	19	XTAL1	(A9)P2.1	22	Port 2 Bit 1 (Address 9)
Ground	20	Vss	(A8)P2.0	21	Port 2 Bit 0 (Address 8)

รูปที่ 2.35 แสดงการกำหนดขาแต่ละขาของ MCS-51

- พอร์ต 0 (ขา 32-39) เป็นพอร์ตที่ใช้งาน 2 หน้าที่ คือ หน้าที่แรกใช้เป็นพอร์ตอินพุทหรือเอาต์พุท ส่วนอีกหน้าที่หนึ่งนั้นใช้ควบคุมหน่วยความจำภายนอก เมื่อต้องการขยายระบบให้ใหญ่ขึ้น โดยจะให้สัญญาณที่มัลติเพลกซ์ระหว่างบัสแอดเดรสกับบัสข้อมูลออกมา (A0-A7,D0-D7)

- พอร์ต 1 (ขา 1-8) ใช้เป็นอินพุทและเอาต์พุทพอร์ตอย่างเดี่ยว การอ้างถึงขาแต่ละขาหรือ บิตแต่ละบิตภายในพอร์ต จะใช้ P1.0 แทนบิต 0 ของพอร์ต 1 หรือ P1.1 แทนบิต 1 ของพอร์ต

1 เป็นต้น พอร์ตนี้ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหน้าที่เดียวกัน ยกเว้น 8032/8052 ที่ใช้ P1.0 และ P1.1 ในหน้าที่เป็นอินพุท/เอาต์พุทของไมโครเมอร์

- พอร์ต 2 (ขา 21-28) เป็นพอร์ตที่ใช้งาน 2 หน้าที่เช่นกัน หน้าที่แรกเป็นอินพุท/เอาต์พุท หน้าที่ที่สองใช้ควบคุมหน่วยความจำภายนอก โดยให้สัญญาณแอดเดรสไบต์สูง (A8-A15) ออกมา

- พอร์ต 3 (ขา 10-17) เป็นพอร์ตที่ใช้งาน 2 หน้าที่อีกเช่นกัน หน้าที่แรกก็คือเป็นอินพุท/เอาต์พุทพอร์ต หน้าที่ที่สองมีหลายอย่าง ซึ่งกำหนดไว้ตามขาต่าง ๆ ดังนี้

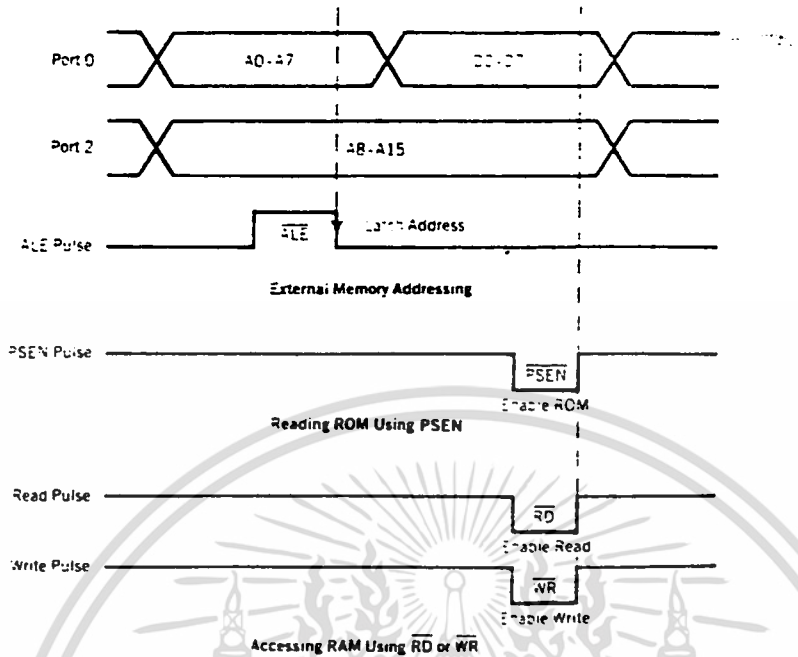
บิต	ชื่อ	หน้าที่
P3.0	RxD	รับสัญญาณข้อมูลเข้ามาแบบอนุกรม
P3.1	TxD	ส่งสัญญาณข้อมูลออกไปแบบอนุกรม
P3.2	$\overline{INT0}$	อินเตอร์รัพต์ภายนอกเบอร์ 0
P3.3	$\overline{INT1}$	อินเตอร์รัพต์ภายนอกเบอร์ 1
P3.4	T0	รับสัญญาณอินพุทของไมโครเมอร์ 0
P3.5	T1	รับสัญญาณอินพุทของไมโครเมอร์ 1
P3.6	\overline{WR}	สัญญาณเขียนข้อมูลใช้ต่อกับหน่วยความจำภายนอก
P3.7	\overline{RD}	สัญญาณอ่านข้อมูลใช้ต่อกับหน่วยความจำภายนอก

- \overline{PSEN} (ขา 29) มาจากคำว่า program store enable เป็นสัญญาณเอาต์พุทซึ่งใช้ควบคุมการอินทิเนล (Enable) หน่วยความจำที่ใช้เก็บรหัสที่ต่ออยู่ภายนอก (external program (code) memory) โดยทั่วไปจะต่อเข้ากับขาเอาต์พุทอินทิเนล (output enable : \overline{OE}) ของอีพรอม

สัญญาณพัลส์จาก \overline{PSEN} จะเป็นลอจิก 0 ในขณะที่กำลังมีการเฟตช์ (fetch) คำสั่งจากอีพรอม ข้อมูลจะถูกวางลงในบัสข้อมูล และถูกนำไปเก็บไว้ในตัว MCS-51 เพื่อรอรับการถอดรหัสต่อไป เมื่อทำการรันโปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอก \overline{PSEN} จะมีลอจิกเป็น 1 ตลอด

- ALE (ขา 30) มาจากคำว่า Address Latch Enable คำว่า Latch หมายถึงการค้างข้อมูลไว้ชั่วคราว ALE จึงหมายถึงสัญญาณเอาต์พุทที่ใช้เป็นสัญญาณควบคุมการค้างสัญญาณที่เป็นแอดเดรสที่ออกมาจากพอร์ต 0 ไว้ชั่วคราว เมื่อพอร์ต 0 ถูกใช้งานในหน้าที่ที่สอง คือมีทั้งสัญญาณแอดเดรสและสัญญาณข้อมูลออกมาต่อ ๆ กัน ความถี่ของ ALE จะมีค่าเป็น 1/6 เท่าของความถี่ที่เกิดขึ้นภายในชิป เช่น ถ้าใช้คริสตอลความถี่ 12 MHz สัญญาณ ALE จะมีความถี่ 2 MHz ยกเว้นการทำคำสั่ง MOVX

- EA (ขา 31) มาจากคำว่า External Access

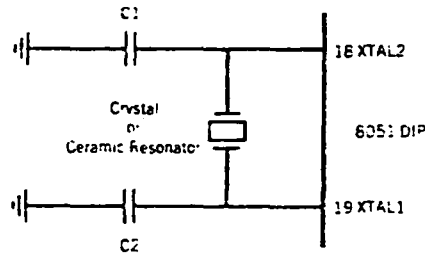


รูปที่ 2.36 แสดงเวลาการเกิดสัญญาณที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

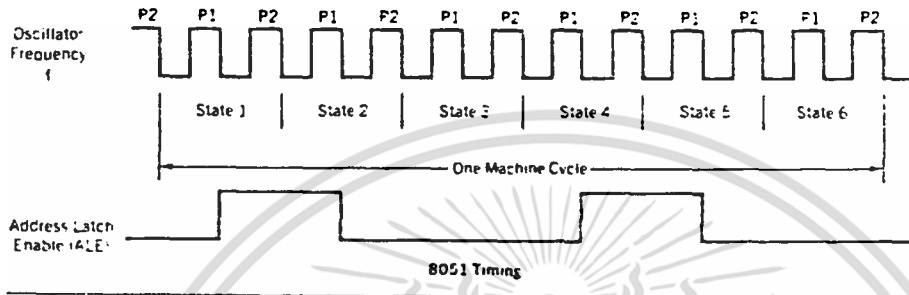
2.2.3 สัญญาณนาฬิกาของ MCS-51

หัวใจสำคัญของ MCS-51 ก็คือ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ซึ่งจะทำการกระทำทุกการกระทำที่เกิดขึ้นภายในเป็นไปอย่างมีระเบียบและเป็นจังหวะ ขา XTAL1 และ XTAL2 คือ ขา 18 และ ขา 19 ตามลำดับ เป็นขาที่ถูกเตรียมไว้สำหรับต่อกับวงจรที่กำเนิดสัญญาณความถี่ ซึ่งประกอบไปด้วยคริสตัลและตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.37

ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ f ที่มีขนาดเล็กที่สุด เรียกว่า เวลาในการเกิดพัลส์ (pulse time) คือ P ดังแสดงในรูปนั่นเอง ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดที่จะทำส่วนของคำสั่งใด ๆ ได้สำเร็จเสร็จสิ้น เรียกว่า แมชชีนไซเคิล (machine cycle) 1 แมชชีนไซเคิลประกอบไปด้วยสเตท (state) 6 สเตท 1 สเตท คือ เวลาพื้นฐานสำหรับการกระทำหนึ่ง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ อย่างเช่น การเฟตซ์รหัสของข้อมูล, ถอดรหัสข้อมูล, ปฏิบัติตามข้อมูล, หรือเขียนข้อมูล แต่ละสเตทประกอบด้วยสัญญาณพัลส์ 2 ลูก



Crystal or Ceramic Resonator Oscillator Circuit



รูปที่ 2.37 วงจรออสซิลเลเตอร์ และ เวลา

การคำนวณเวลาของคำสั่งใด ๆ ที่ถูกกระทำ เมื่อ C แทนจำนวนแมกซ์ซินไซเคิลที่แต่ละคำสั่งต้องการ จะสามารถคำนวณและได้ตามสมการนี้

$$T_{inst} = \frac{C \times 12d}{\text{Crystal frequency}}$$

2.2.4 หน่วยความจำภายใน MCS-51

การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ต้องมีหน่วยความจำสำหรับเก็บรหัสของโปรแกรม โดยปรกติก็คือ ROM และหน่วยความจำ RAM สำหรับเก็บข้อมูลที่อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ ขณะที่โปรแกรมกำลังทำงาน MCS-51 มีทั้งหน่วยความจำ RAM และ ROM ภายใน สำหรับเก็บค่าต่าง ๆ หน่วยความจำเพิ่มเติมสามารถถูกต่อเข้าไปจากภายนอกได้ด้วยการใช้วงจรที่เหมาะสม

1. หน่วยความจำ RAM ภายใน ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- รีจิสเตอร์แ่งค์ RAM ภายในจำนวน 32 ไบต์จากแอดเดรส 00H ถึง 1FH ถูกนำมาเป็นตัว รีจิสเตอร์สำหรับใช้งาน โดยแยกออกเป็น 4 แ่งค์ แ่งค์ละ 8 รีจิสเตอร์ รีจิสเตอร์แต่ละแ่งค์ก็มีหมายเลขกำกับเป็น แ่งค์ 0 ถึง แ่งค์ 3 และรีจิสเตอร์แต่ละตัวจะอ้างตำแหน่งแอดเดรสโดยใช้ชื่อ (เมื่อแ่งค์ใดแ่งค์หนึ่งถูกเลือกใช้) หรืออ้างเป็นตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำ RAM เลขก็ได้ เช่นถ้าต้องการอ้างถึงรีจิสเตอร์ R0 ของแ่งค์ 3 ลองดูจากคำสั่ง MOV ข้อมูลจากรีจิสเตอร์ R0 มาไว้ยังแอดคิวิตูเมเตอร์ โดยสมมติว่า แ่งค์ 3 ถูกเลือกใช้งานอยู่ในขณะนี้

MOV A, R0

คำสั่งนี้จะใช้ชื่อกำหนดลงไปตรง ๆ ผลที่ได้จะเป็นเช่นเดียวกับคำสั่งต่อไปนี้

MOV A, 18H

สำหรับคำสั่งทั้งสองเป็นการอ้างตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำโดยตรง ข้อดีของแบบแรกก็คือ ไม่ต้องจำตำแหน่งแอดเดรส ส่วนข้อดีของแบบที่สองคือ ไม่ต้องสนใจว่าแอดเดรสใดถูกเลือกใช้งานในขณะนี้

การเลือกใช้รีจิสเตอร์ แอดเดรสใดทำงานสามารถกำหนดโดยการเซตหรือเคลียร์บิต RSO หรือ RS1 ในรีจิสเตอร์ PSW และรีจิสเตอร์แอดเดรสใดที่ไม่ถูกเลือกใช้งาน สามารถใช้เป็นหน่วยความจำ RAM แบบปกติได้ หลังจากทำการ Reset ไมโครคอนโทรลเลอร์ รีจิสเตอร์แอดเดรส 0 จะถูกเลือกใช้งาน

- หน่วยความจำ RAM ที่สามารถอ้างถึงแอดเดรสแบบบิต หน่วยความจำ RAM ที่เหนือจากรีจิสเตอร์แอดเดรสขึ้นไป 16 บิต คือตั้งแต่แอดเดรส 20H ถึง 2FH (หนึ่งตำแหน่งแอดเดรสคือ หนึ่งบิต) สามารถอ้างตำแหน่งได้สองแบบคือ แบบแรกอ้างแบบบิต คือ แอดเดรส 20H แบบที่สองอ้างแบบบิต จะได้ทั้งหมด 128 ตำแหน่ง คือ แอดเดรส 00H ถึง 7FH (8 บิต \times 16 บิต = 128 บิต)

การอ้างแอดเดรสแบบบิตอาศัยแนวความคิดจากความคล่องตัว และ ประสิทธิภาพการใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่สามารถเซตหรือเคลียร์บิตใดบิตหนึ่ง หรือทำการแอนด์ออร์บิตใดบิตหนึ่งได้ภายในหนึ่งคำสั่ง ยิ่งไปกว่านั้น อินพุท/เอาต์พุทพอร์ตของ MCS-51 สามารถเป็นแอดเดรสแบบบิตได้ จึงทำให้การเขียนซอฟต์แวร์ทำได้ง่ายขึ้นการควบคุมและตรวจสอบทำได้อย่างรวดเร็ว

ตำแหน่งแอดเดรสที่กล่าวมาข้างต้นจะอ้างแบบบิตหรือแบบบิตก็ได้ แล้วแต่คำสั่งที่ใช้ เช่น ต้องการเซตบิตที่ตำแหน่งแอดเดรสที่อ้างแบบบิต 67H ให้เป็น 1 คำสั่งที่จะใช้เป็นดังนี้

SETB 67H

แต่ตำแหน่งแอดเดรสที่อ้างแบบบิต 67H ก็คือบิตที่ 7 ของตำแหน่งแอดเดรสที่อ้างแบบบิตที่ 2CH โดยการใช้นี้คำสั่งที่ผ่านมาจะไม่มีผลกระทบต่อบิตข้างเคียง ในตำแหน่งนี้ และนี่ก็คือข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์

- หน่วยความจำ RAM ที่ใช้งานทั่วไป ส่วนนี้จะอยู่เหนือบริเวณหน่วยความจำ RAM ที่อ้างถึงแอดเดรสแบบบิตขึ้นไป โดยเริ่มตั้งแต่แอดเดรส 30H จนกระทั่งถึง 7FH รวมทั้งสิ้น 80 บิต ตำแหน่งแอดเดรสเหล่านี้ถูกอ้างถึงได้เฉพาะแบบบิตเท่านั้น การอ้างอิงจะใช้แบบกำหนดแอดเดรสโดยตรง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV A, 5FH
```

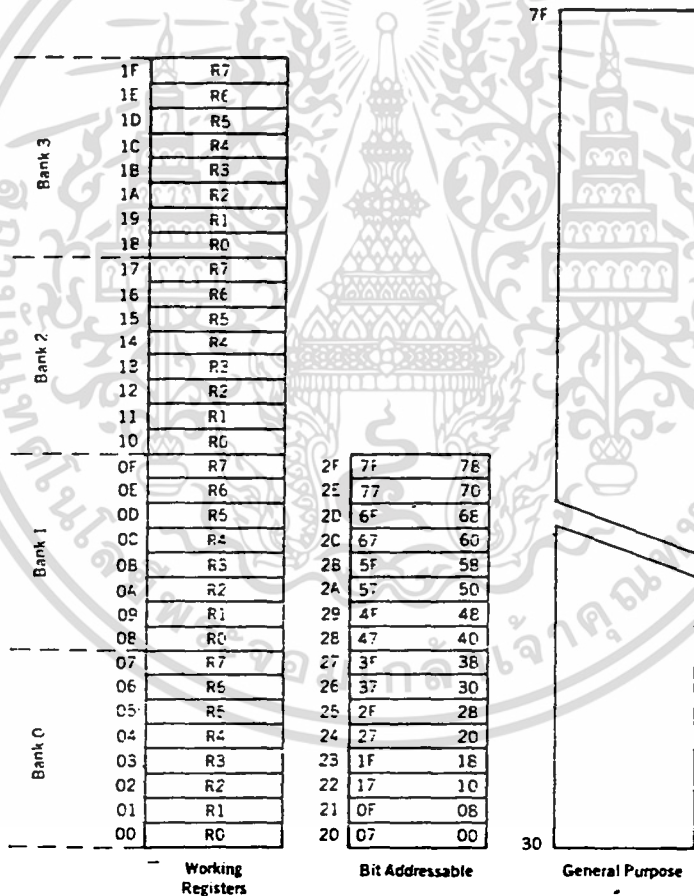
หรือใช้การอ้างอิงแอดเดรสทางอ้อมก็ได้ เช่น

```
MOV R0, #5FH
```

```
MOV A, @R0
```

ในลักษณะเช่นนี้ ตำแหน่งแอดเดรสที่ต้องการจะใช้รีจิสเตอร์ R0 เป็นตัวชี้

Special Function Registers (SFR) ภายใน MCS-51 ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยความจำ RAM ภายในชิป ดังนั้นแต่ละรีจิสเตอร์จะมีตำแหน่งแอดเดรสที่แน่นอน ดังเช่น R0 - R7 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ใน MCS-51 จะมี SFR ซึ่งจะอยู่ส่วนบนสุดของหน่วยความจำ RAM ภายใน โดยมีตำแหน่งแอดเดรสจาก 80H-FFH แต่ทั้ง 128 แอดเดรสนี้ ไม่ได้ใช้ทั้งหมด แต่ใช้เพียง 21 แอดเดรสเท่านั้น ในส่วนที่เว้นว่างไว้จะใช้เป็นหน่วยความจำ RAM ไม่ได้ (ข้อมูลที่ดึงออกมาจะไม่ยืนยันว่าถูกต้องเหมือนกับที่เขียนลงไป)



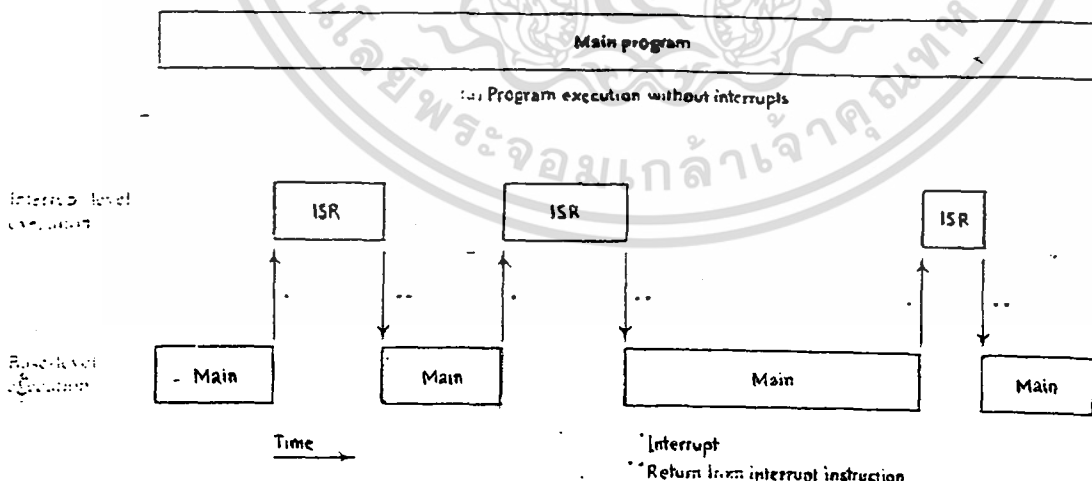
รูปที่ 2.38 แบ่งพื้นที่การทำงานของหน่วยความจำ RAM ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หน่วยความจำ ROM ภายใน โครงสร้างของ RAM ภายในได้อธิบายไปแล้ว บล็อกของรหัสของโปรแกรม (program code) ภายใน จะบรรจุไว้ใน ROM ภายใน มีแอดเดรสตั้งแต่ 0000 H ถึง 0FFFH โปรแกรมเคาน์เตอร์ (PC) ถูกใช้กำหนดแอดเดรสของรหัสโปรแกรมจากแอดเดรส 0000H ถึง FFFFH โปรแกรมที่มีแอดเดรสสูงกว่า 0FFFH ซึ่งเกินความจุของ ROM ภายใน จะทำให้ MCS-51 เฟตซ์รหัสจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกเข้ามาโดยอัตโนมัติ รหัสโปรแกรมสามารถถูกเฟตซ์จากหน่วยความจำภายนอกเพียงอย่างเดียว ที่แอดเดรส 0000H ถึง FFFFH ได้โดยการต่อขา \overline{EA} ลงกราวด์ PC จะไม่สนใจว่ารหัสจะอยู่ที่ไหน การออกแบบวงจรจะตัดสินใจว่า พบรหัสใน ROM ภายใน ใน ROM ภายนอก หรือ ทั้ง ROM ภายในและภายนอก

2.2.5 การอินเตอร์รัพต์ใน MCS-51

การอินเตอร์รัพต์เกิดจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดที่จัดตั้งไว้ก่อนล่วงหน้า ทำให้โปรแกรมที่กำลังรันอยู่ถูกละทิ้งไว้ชั่วคราว เพื่อไปทำตามโปรแกรมอื่นที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์นั้น ๆ เมื่อเสร็จสิ้นแล้ว จึงกลับมารันโปรแกรมเดิม โปรแกรมที่ถูกกระทำเมื่อเกิดการอินเตอร์รัพต์ขึ้น เรียกว่า โปรแกรมให้บริการอินเตอร์รัพต์ (Interrupt service routine : ISR) ISR จะถูกกระทำก็ต่อเมื่อมีการอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้น โดยทั่วไปจะเป็นการจัดการเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการอินพุท/เอาต์พุท เมื่ออินเตอร์รัพต์เกิดขึ้น โปรแกรมหลักจะถูกหยุดกระทำไว้ชั่วคราว แล้วกระโดดไปยัง ISR กระทำ ISR ISR จะถูกกระทำเสร็จสิ้นก็ต่อเมื่อทำคำสั่งกลับจากการอินเตอร์รัพต์ จากนั้นโปรแกรมหลักจะถูกกระทำต่อไป โดยทั่วไปเมื่ออ้างถึงโปรแกรมหลัก จะถือว่าเป็นการกระทำโปรแกรมในระดับพื้นฐาน ส่วน ISR ถือว่าเป็นการกระทำโปรแกรมในระดับอินเตอร์รัพต์ ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 การทำงานของ โปรแกรมเมื่อเกิดการอินเตอร์รัพต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการอินเทอร์รัพต์ตัวอย่างหนึ่งที่พบทั่ว ๆ ไป คือ การป้อนข้อมูลผ่านทางปุ่มของเตาไมโครเวฟ โปรแกรมหลักจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานในรูปไมโครเวฟออกมา จากแหล่งพลังงานเมื่อใช้งานในขณะที่กำลังใช้งานเพื่อให้อาหารสุก ระบบจะต้องตอบโต้กับการป้อนข้อมูลที่ฝาปิดด้านหน้า เช่นการตั้งเวลาให้สั้นหรือยาวเมื่อใช้งาน เมื่อผู้ใช้กดปุ่มจะเกิดการอินเทอร์รัพต์ขึ้น โปรแกรมหลักจะถูกขัดจังหวะชั่วคราว โดยกระโดดไปทำงานที่โปรแกรมบริการเพื่ออ่านรหัสจากปุ่มและทำการปรับตั้งค่าใหม่ตามข้อมูลที่ป้อนเข้าไปเมื่อเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว มักจะกลับมาทำงานในโปรแกรมหลักต่อไป

ในทางปฏิบัติ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะแยกแยะข้อกำหนดในการตัดสินใจได้เพียง 2 วิธีเท่านั้น คือ วิธีแรก ใช้คำสั่งทางซอฟต์แวร์ทำการทดสอบค่าแฟล็กต่าง ๆ หรือการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่พอร์ตต่าง ๆ ถ้าตรงตามข้อกำหนดก็จะกระโดดไปยังโปรแกรมที่กำหนดไว้ ส่วนวิธีที่สอง ใช้สัญญาณทางฮาร์ดแวร์เข้ามากระตุ้นเพื่อให้กระโดดไปทำโปรแกรมที่ต้องการ เช่น การกดปุ่มดังตัวอย่างที่ยกมาข้างต้น ซึ่งก็คือการอินเทอร์รัพต์นั่นเอง ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการทั้งสองคือ การใช้เทคนิคทางซอฟต์แวร์จะต้องเสียเวลาไปส่วนหนึ่งในการคอยเฝ้าตรวจสอบข้อกำหนดต่าง ๆ อยู่ตลอดเวลา ส่วนการใช้เทคนิคการอินเทอร์รัพต์จะเสียเวลาเฉพาะเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่กำหนดขึ้นเท่านั้น ฉะนั้นเวลาที่เหลืออยู่จึงใช้ไปทำงานอื่น ๆ ได้อีก

แหล่งกำเนิดการอินเทอร์รัพต์ของ MCS-51

MCS-51 ขอมให้เกิดอินเทอร์รัพต์ได้ทั้งหมด 5 แหล่งด้วยกัน 3 แหล่งจะมาจากภายในตัว MCS-51 เอง ได้แก่ การอินเทอร์รัพต์ที่เกิดจากไทม์เมอร์แฟล็ก 0 ไทม์เมอร์แฟล็ก 1 และ พอร์ตอนุกรม (R1 หรือ T1) การอินเทอร์รัพต์อีก 2 แหล่งที่เหลือเกิดจากภายนอกตัว MCS-51 โดยมีสัญญาณจากภายนอกกระตุ้นที่ขา $\overline{INT0}$ และ $\overline{INT1}$ การอินเทอร์รัพต์ทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมผ่านทางอินเทอร์รัพต์อินาบิลริจิสเตอร์ (IE) อินเทอร์รัพต์ไพอริตีริจิสเตอร์ (IP) และริจิสเตอร์ควบคุมไทม์เมอร์ (TCON) ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

รายละเอียดของ IE และ IP จะเป็นดังนี้

	7	6	5	4	3	2	1	0	bit
IE	EA	-	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต	สัญลักษณ์	รายละเอียด
7	EA	บิตแสดงการยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์เมื่อเซตให้เป็น 1 แสดงว่าต้องการให้มีการอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้นและเคลียร์ให้เป็น 0 เมื่อไม่ต้องการให้มีการอินเตอร์รัพต์เกิดขึ้น
6	-	ไม่ใช้งาน
5	ET2	สงวนไว้ใช้งานภายใน
4	ES	ยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์เนื่องมาจากพอร์ตอนุกรมเซตให้เป็น 1 เมื่อต้องการให้มีการอินเตอร์รัพต์จากพอร์ตอนุกรมเกิดขึ้นและเคลียร์เป็น 0 เมื่อไม่ต้องการให้มีการอินเตอร์รัพต์จากพอร์ตอนุกรม
3	ET1	ยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์เนื่องมาจากไทม์เมอร์ 1 เกิดโอเวอร์โฟลว์เซตให้เป็น 1 เมื่อต้องการให้มีการอินเตอร์รัพต์จากไทม์เมอร์ 1 และเคลียร์เป็น 0 เมื่อไม่ต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพต์
2	EX1	ยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์จากภายนอกผ่านขา INT1 โดยเซตเป็น 1 เมื่อต้องการให้อินเตอร์รัพต์และเคลียร์เป็น 0 เมื่อไม่ต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพต์
1	ET0	ยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์เนื่องมาจากไทม์เมอร์ 0 เกิดจากโอเวอร์โฟลว์ ข้อกำหนดเป็นเช่นเดียวกับ ET1
0	EX0	ยอมให้มีการอินเตอร์รัพต์จากภายนอกผ่านขา INTO โดยมีข้อกำหนดเดียวกับ EX1

ซึ่งรีจิสเตอร์นี้สามารถอ้างอิงแบบบิตแอดเดรสได้จาก IE0 - IE7

	7	6	5	4	3	2	1	0	bit
IP	-	-	PT2	PS	PT1	PX1	PT0	PX0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต	สัญลักษณ์	รายละเอียด
7	-	ไม่ใช้งาน
6	-	ไม่ใช้งาน
5	PT2	สงวนไว้ใช้งานภายหลัง
4	PS	ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากพอร์ตอนุกรม
3	PT1	ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากไทม์เมอร์ 1
2	PX1	ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากภายนอก INT1
1	PT0	ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากไทม์เมอร์ 0
0	PX0	ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพต์จากภายนอก INTO

ลำดับความสำคัญอาจเป็น 1 ซึ่งหมายถึงสูงสุดหรืออาจเป็น 0 ซึ่งหมายถึงต่ำสุดก็ได้ ขณะเดียวกันรีจิสเตอร์ IP สามารถอ้างอิงเป็นแบบแอดเดรสได้เช่นเดียวกันคือ IPO ถึง IP7 การอินเตอร์รัพต์จากภายนอกที่ขา INTO และ INT1 จะใช้รีจิสเตอร์ TCON เข้ามาช่วยกำหนดรูปแบบของสัญญาณที่จะเข้ามากระตุ้น (IE0, IE1) เช่น การกำหนดการอินเตอร์รัพต์เนื่องจาก INTO

- ให้เกิดอินเตอร์รัพต์ที่ INTO เซตบิต EX0 ในรีจิสเตอร์ IE ให้เป็น 1
- ให้เกิดอินเตอร์รัพต์ที่บริเวณใดของสัญญาณที่เข้ามากระตุ้น
- ที่ระดับสัญญาณต่ำเป็น 0 เคลียร์ ITO ในรีจิสเตอร์ TCON ให้เป็น 0
- ที่บริเวณขอบของสัญญาณ เซต ITO ในรีจิสเตอร์ TCON ให้เป็น 1
- IE0 ในรีจิสเตอร์ TCON จะถูกรีเซตเป็น 1 เมื่อตรวจพบขอบสัญญาณขา INTO

(Set by Hardware)

ในกรณีที่เลือกให้เกิดอินเตอร์รัพต์ที่ระดับสัญญาณมีลอจิก 0 (low level) จะต้องทำให้สัญญาณนี้กลับเป็นระดับสัญญาณลอจิก 1 ก่อนที่จะทำคำสั่ง RETI มิฉะนั้นจะเกิดการอินเตอร์รัพต์ซ้อนขึ้นตลอดไปจนกว่าสัญญาณจะกลับเป็นระดับสัญญาณลอจิก 1 (high level)

ตำแหน่งของการอินเทอร์รัพต์ ตำแหน่งแอดเดรสที่โปรแกรมเรียก (call) เมื่อเกิดการอินเทอร์รัพต์จะถูกกำหนดไว้แน่นอน ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ตำแหน่งแอดเดรสที่โปรแกรมจะกระโดดไปทำงานเมื่อเกิดอินเทอร์รัพต์

การอินเทอร์รัพต์ที่เกิดจาก	ตำแหน่งแอดเดรส
IE0	0003H
TF0	000BH
IE1	0013H
TF1	001BH
Serial	023BH

ลำดับความสำคัญของการอินเทอร์รัพต์ ในกรณีที่เกิดการอินเทอร์รัพต์ขึ้นพร้อมกัน และมีการกำหนดความสำคัญไว้เป็น 1 เหมือนกัน (หมายถึงผู้ใช้กำหนดลำดับความสำคัญพร้อมไว้เท่ากัน) MCS-51 จะเข้าจัดลำดับความสำคัญใหม่เรียงกันไว้ดังนี้

1. IE0 (สูงสุด)
2. TF0
3. IE1
4. TF1
5. Serial (ต่ำสุด)

แต่ถ้าต้องการให้ลำดับสูงสุดก็ทำได้ดดยเซตบิต PS ใน IP รีจิสเตอร์ให้เป็น 1 เพียงบิตเดียว นอกนั้นให้เป็น 0 หมด ก็จะได้ผลตามต้องการ

บทที่ 3

การสร้างเครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัติ

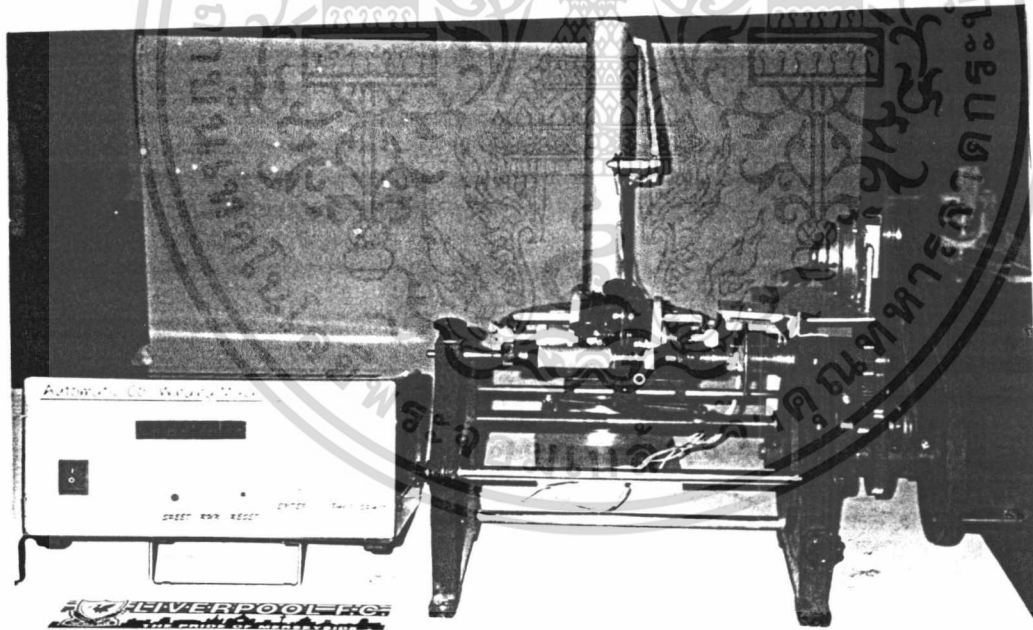
จากทฤษฎีที่เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 นั้น เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัติได้ โดยแบ่งส่วนประกอบของเครื่องออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วน Mechanic
2. ส่วนฮาร์ดแวร์
3. ส่วนซอฟต์แวร์

3.1 ส่วน Mechanic

ส่วน Mechanic นี้ถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำงานในการกำหนดขอบเขตของผลงานที่ได้ออกมา ซึ่งประกอบไปด้วย

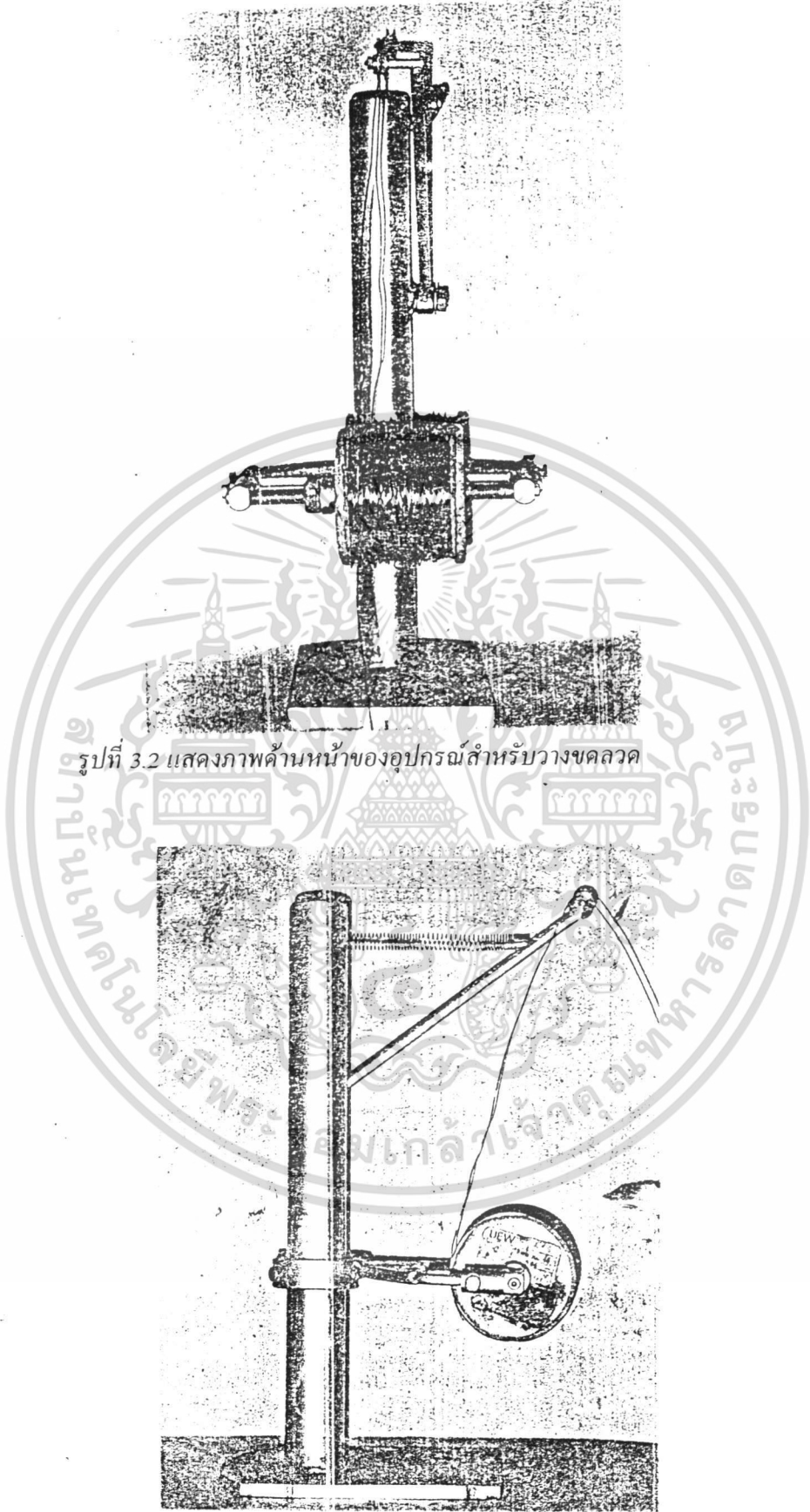
3.1.1 การวางอุปกรณ์ ซึ่งเป็นดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงภาพการวางอุปกรณ์เครื่องพันขดลวดอัตโนมัติ

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับวางขดลวด หน้าที่ คือเป็นจุดสำหรับวางขดลวดแหล่งกำเนิด โดยจะมีส่วนของการช่วยผ่อนแรงไปยังส่วนอื่น ๆ ต่อไป กล่าวคือ การทำให้ขดลวดตึงเพื่อสะดวกในการพัน และผลงานออกมาเป็นระเบียบเรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

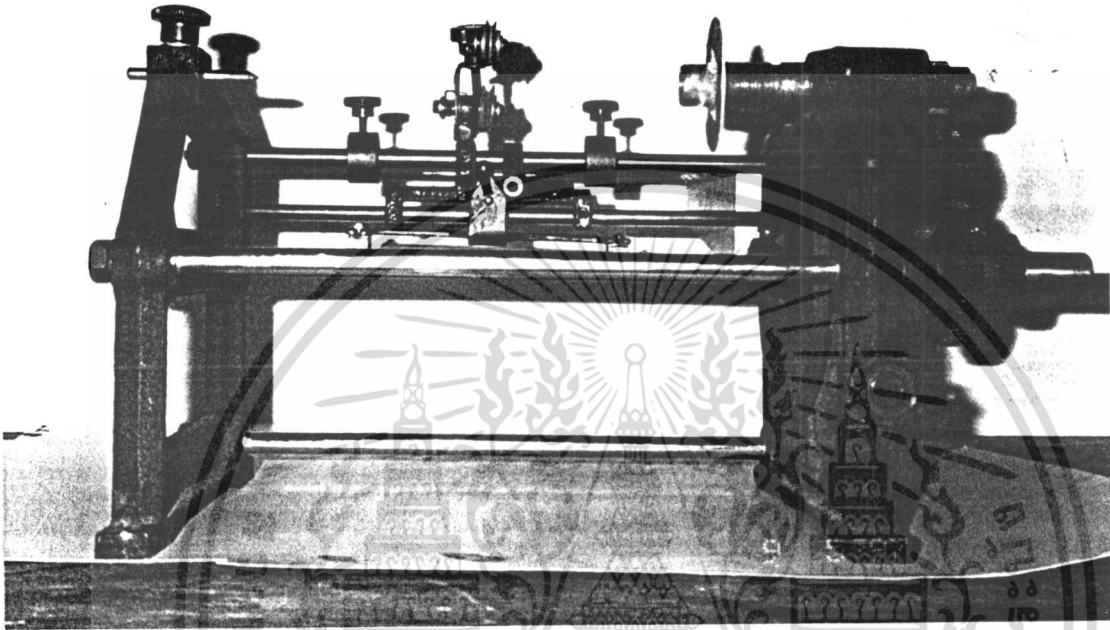


รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านหน้าของอุปกรณ์สำหรับวางขดลวด

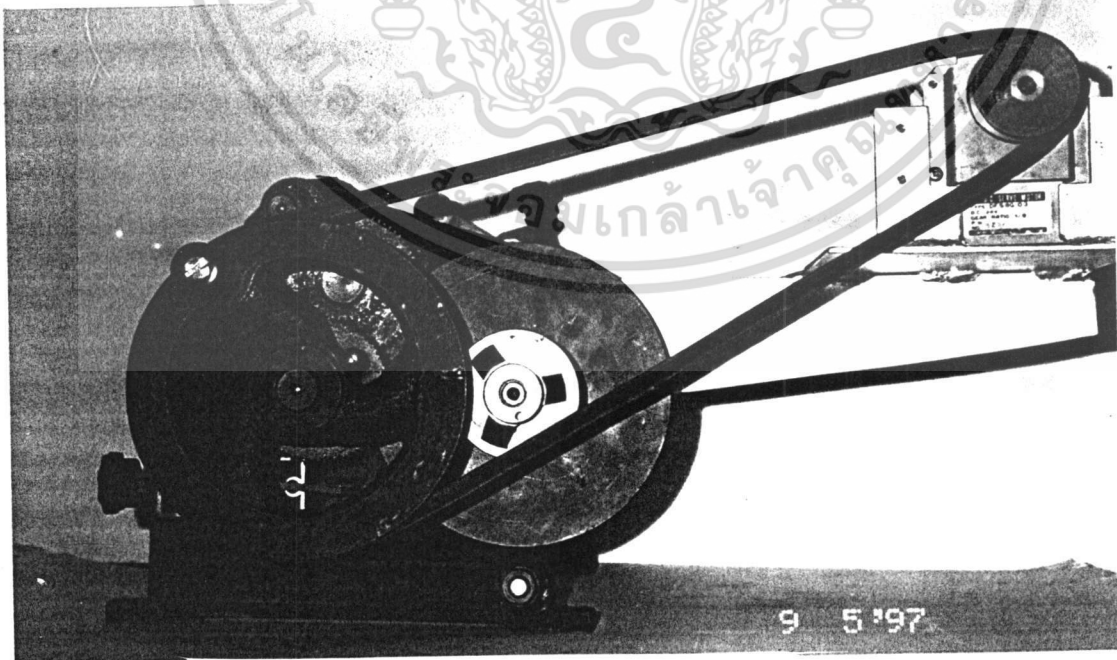
รูปที่ 3.3 แสดงภาพด้านข้างของอุปกรณ์สำหรับวางขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์สำหรับพันขดลวด ซึ่งควบคุมการหมุนโดย D.C. motor ดังภาพ



รูปที่ 3.4 แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องพันขดลวด



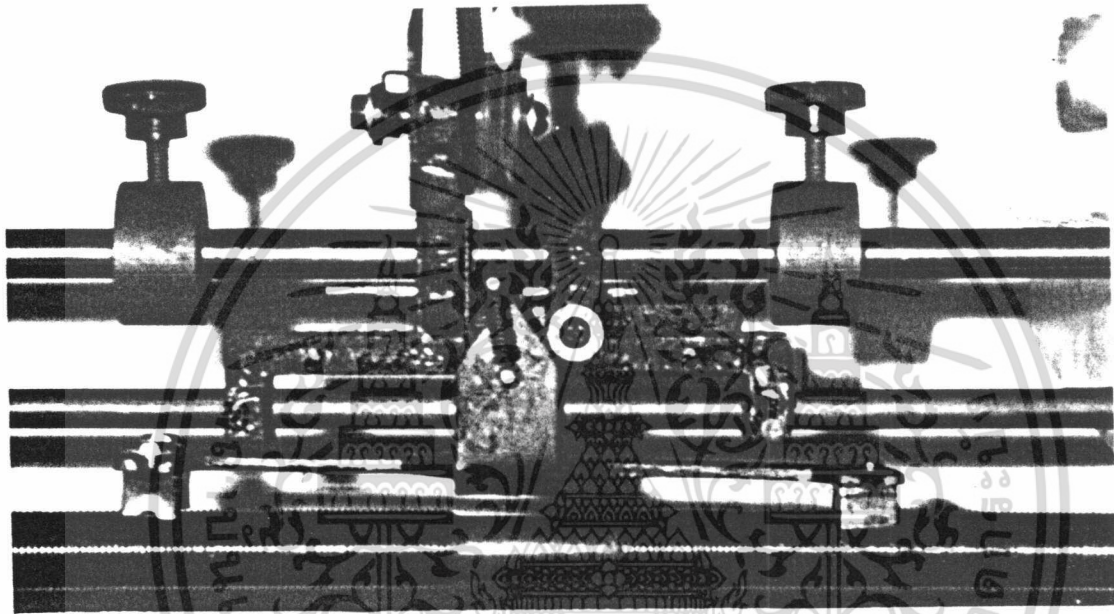
รูปที่ 3.5 แสดงภาพด้านข้างของเครื่องพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

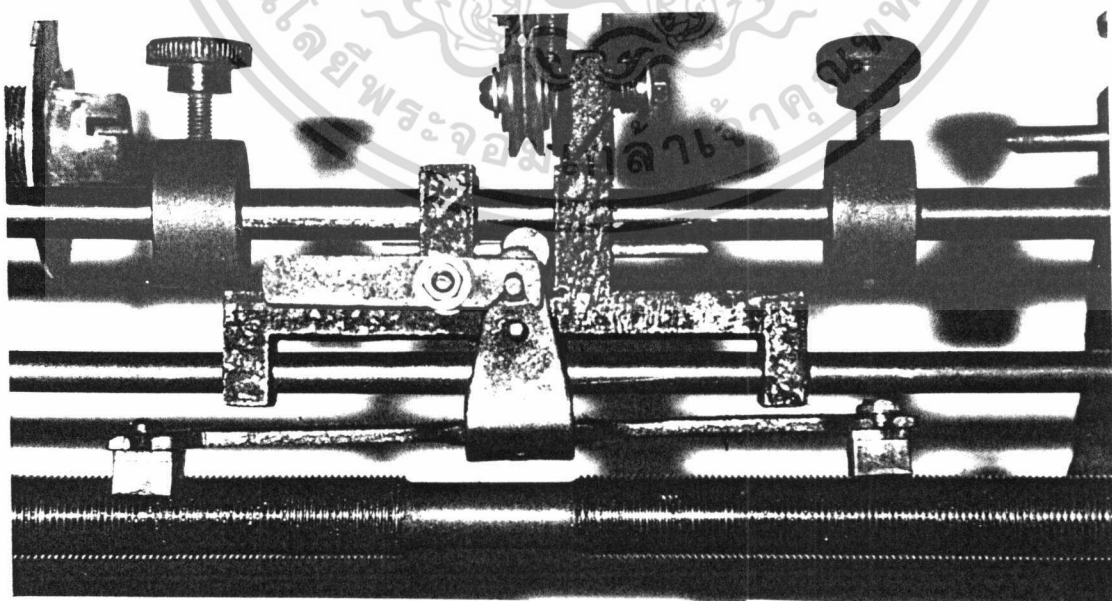
ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง

- limit switch หน้าที่ปรับความยาว เพื่อกำหนดระยะเวลาการพันขดลวด
- ส่วนปรับระดับความสูงของเส้นลวด เพื่อให้สัมพันธ์กับการพัน
- ส่วนเก็ยขดลวด โดยจะทำงานสัมพันธ์กับ limit switch

หลักการทำงาน จะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา ไปตามเกลียว โดยใช้หลักการสมดุลของแรงสปริง เป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่



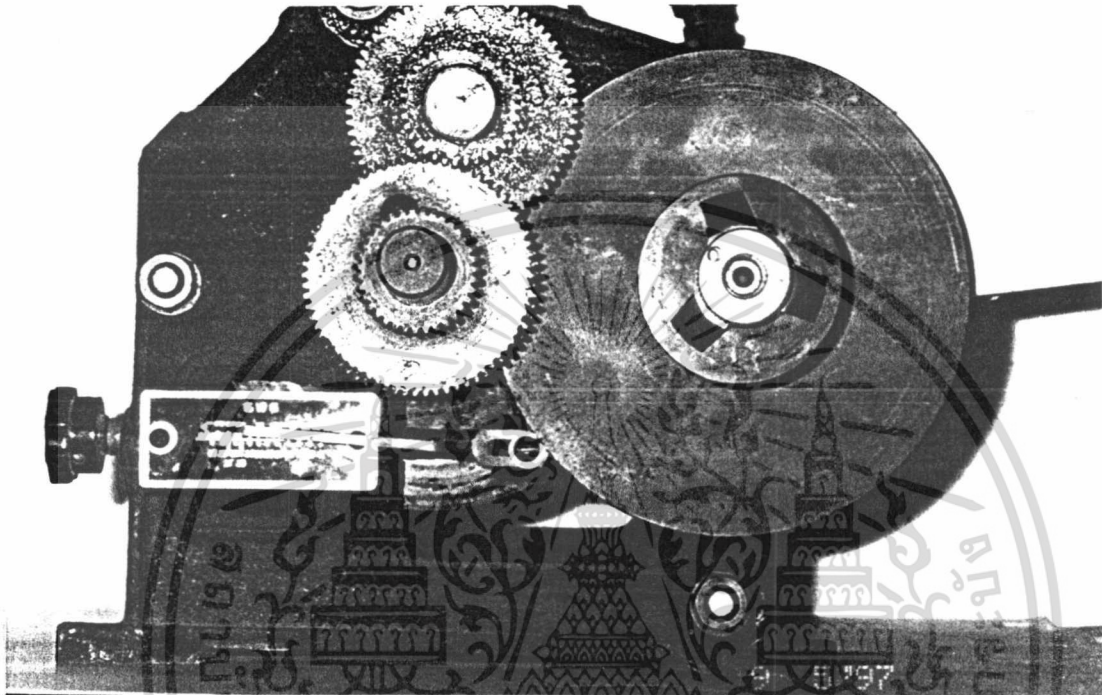
รูปที่ 3.6 แสดงภาพด้านหน้าของส่วนเก็ย



รูปที่ 3.7 แสดงภาพด้านหลังของส่วนเก็ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- SWG เป็นตัวกำหนดความยาวของเส้นรอบวงกลม เพื่อควบคุมความเร็วของส่วนเกียร์ ให้สัมพันธ์กับขนาดของขดลวด และความเร็วในการพัน



รูปที่ 3.8 แสดงถึง SWG

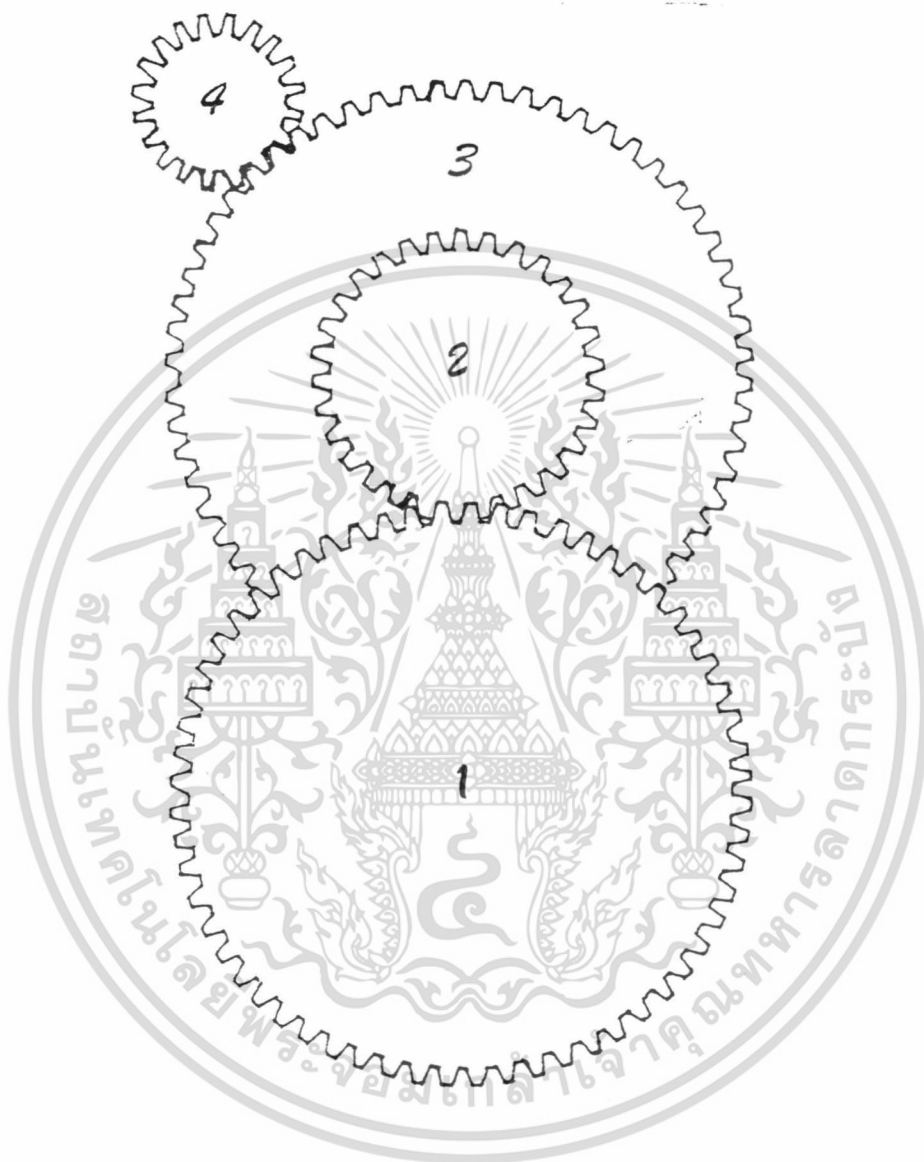
- ส่วนฟันเฟืองที่ต่อระหว่าง motor กับส่วนพันโดยสายพาน

หลักการทำงานของฟันเฟืองสามารถอธิบายได้โดยตาราง

เฟืองที่ 1		เฟืองที่ 2		เฟืองที่ 3		เฟืองที่ 4	
d=7.5 cm: 70 ฟันเฟือง		d=3.5 cm: 35 ฟันเฟือง		d=7.5 cm: 70 ฟันเฟือง		d=2.5 cm: 23 ฟันเฟือง	
step	รอบ	step	รอบ	step	รอบ	step	รอบ
17.5	1/4	17.5	1/2	35	1/2	35	1.521
35	1/2	35	1	70	1	70	3.043
52.5	3/4	52.5	3/2	105	3/2	105	4.563
70	1	70	2	140	2	140	6.086

ตารางที่ 3 ลักษณะการทำงานของฟันเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

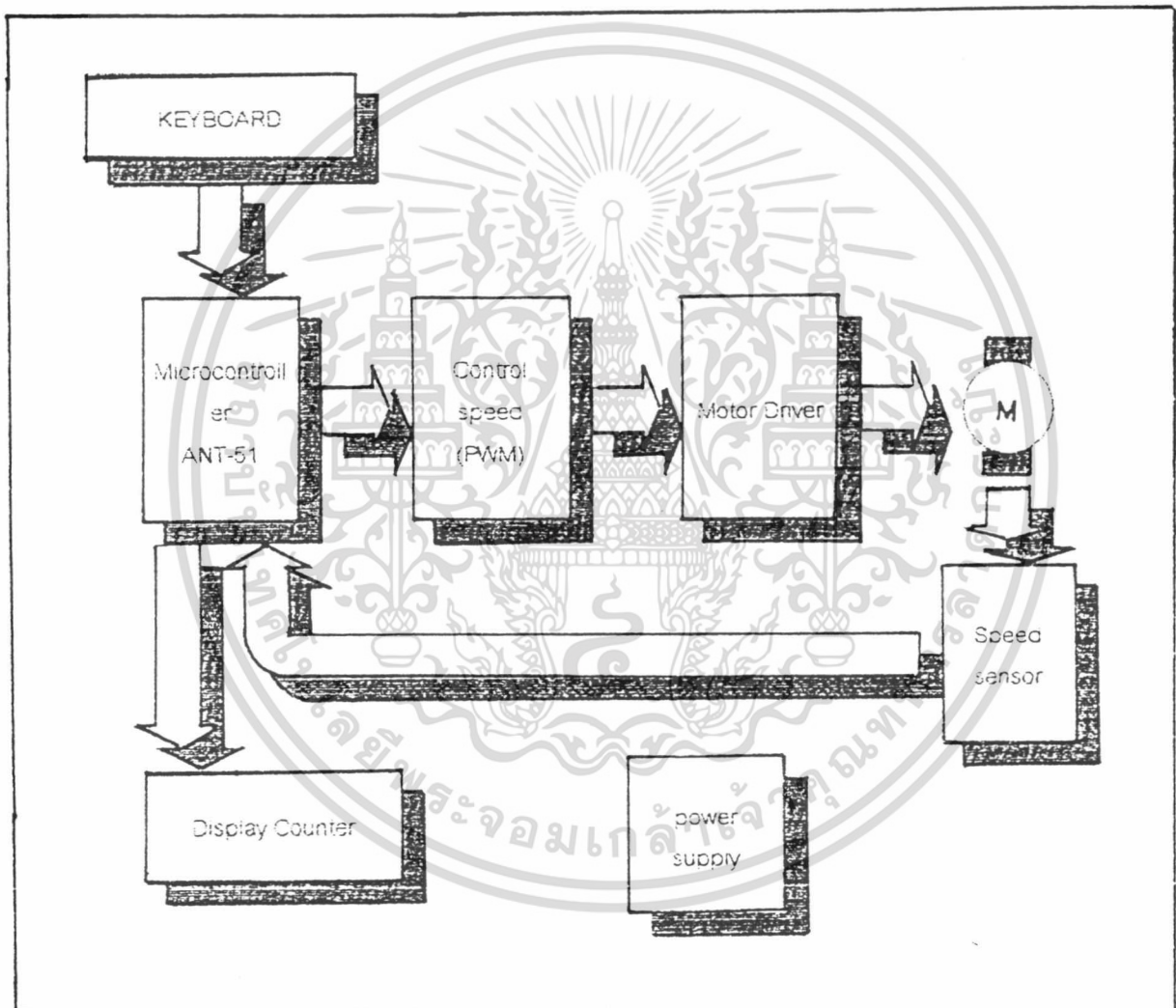


รูปที่ 3.9 รูปแสดงฟันเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนฮาร์ดแวร์

- รายละเอียดของวงจรแต่ละส่วน



รูปที่ 3.10 BLOCK DIAGRAM

AUTOMATIC COIL-WINDING MACHINE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Port 4 × 8 bit I/O on CPU
- Connector 3 pin RS232 (ชิพ MAX232)
 2 pin RS485 (ชิพ 75176)
 2 pin 5 VDC
- Power 5 VDC กระแส 35 mA
- ขนาด 4 × 5.5 inch

ในบอร์ด ANT-51 จะมีพื้นที่ PCB ขนาด 4 × 3.8 นิ้ว ซึ่งจะมีวงจร decoder, scankey และ buffer ประกอบอยู่ด้วย

ตัวโปรแกรมหลักของเครื่องพันคอยล์จะถูกเก็บไว้ใน Flash Memory 4 Kbyte ใน 89C51 และ port ต่าง ๆ ถูกใช้ในการรับค่าจาก keyboard, ส่วนแสดงผล seven-segment, start pulse width modulate, stop motor และทำการ check จำนวนรอบ

3.2.3 Manual keyboard

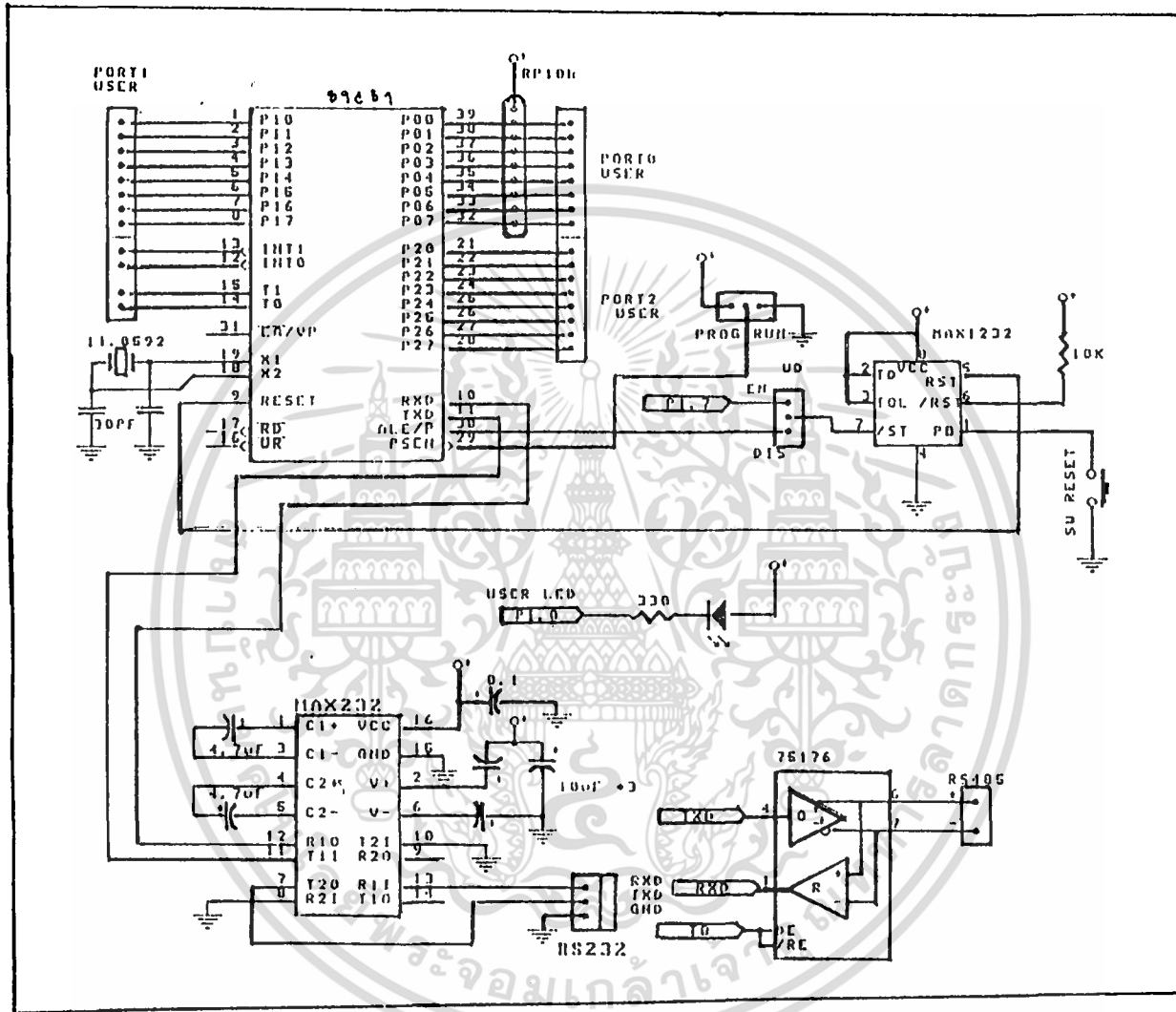
keyboard เป็นส่วนสำหรับการรับข้อมูลเป็นจำนวนรอบ ซึ่งประกอบด้วย คีย์ตัวเลข 0-9, คีย์ back space และ Run เครื่องจะรู้ว่าเราต้องการจะทำอะไร โดยใช้ไอซีเบอร์ 74922 เป็นไอซีสแกนคีย์บอร์ดโดยตรง เพื่อลดหน้าที่การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ลง โดยจะต้องต่อแถวและหลักของคีย์บอร์ดเข้ากับขา X และ Y ของไอซี และเมื่อมีการกดคีย์ ขา \overline{OE} จะแอกทีฟ และส่งค่าคีย์ที่กดออกไปยัง P1.0-P1.3 และเมื่อต่อขา \overline{OE} เข้ากับขา \overline{INT} ของ 89C51 จะมีการกระโดดไปที่อินเทอร์รัพท์โปรแกรมขณะกำลังทำ Main program ซึ่งเป็นการเรียกใช้ sub-program เพื่ออ่านค่าคีย์ที่ส่งเข้ามาใน P1.0-P1.3

3.2.4 ส่วนแสดงผล

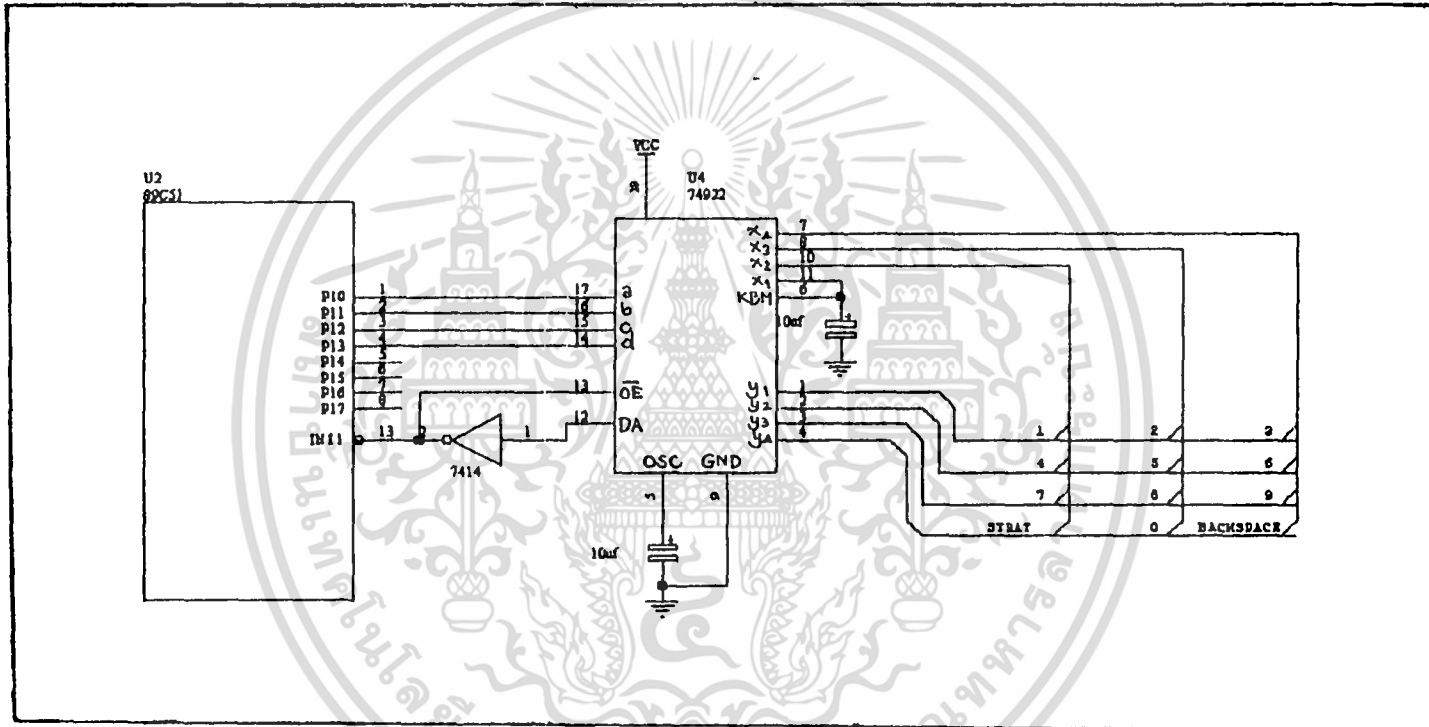
วงจรสำหรับส่วนแสดงผล จะประกอบไปด้วยไอซีเบอร์ 74244 และ 74145 ส่วนที่แสดงผลใช้ 7-segment จำนวน 8 หลัก เป็นแบบ Common Anode

74244 เป็นบัฟเฟอร์สำหรับขับกระแสจาก P0.0-P0.6 ของ 89C51 ไปยังขา a-g ของ 7-segment โดยค่าที่ส่งออกมาจะควบคุมโดยโปรแกรม

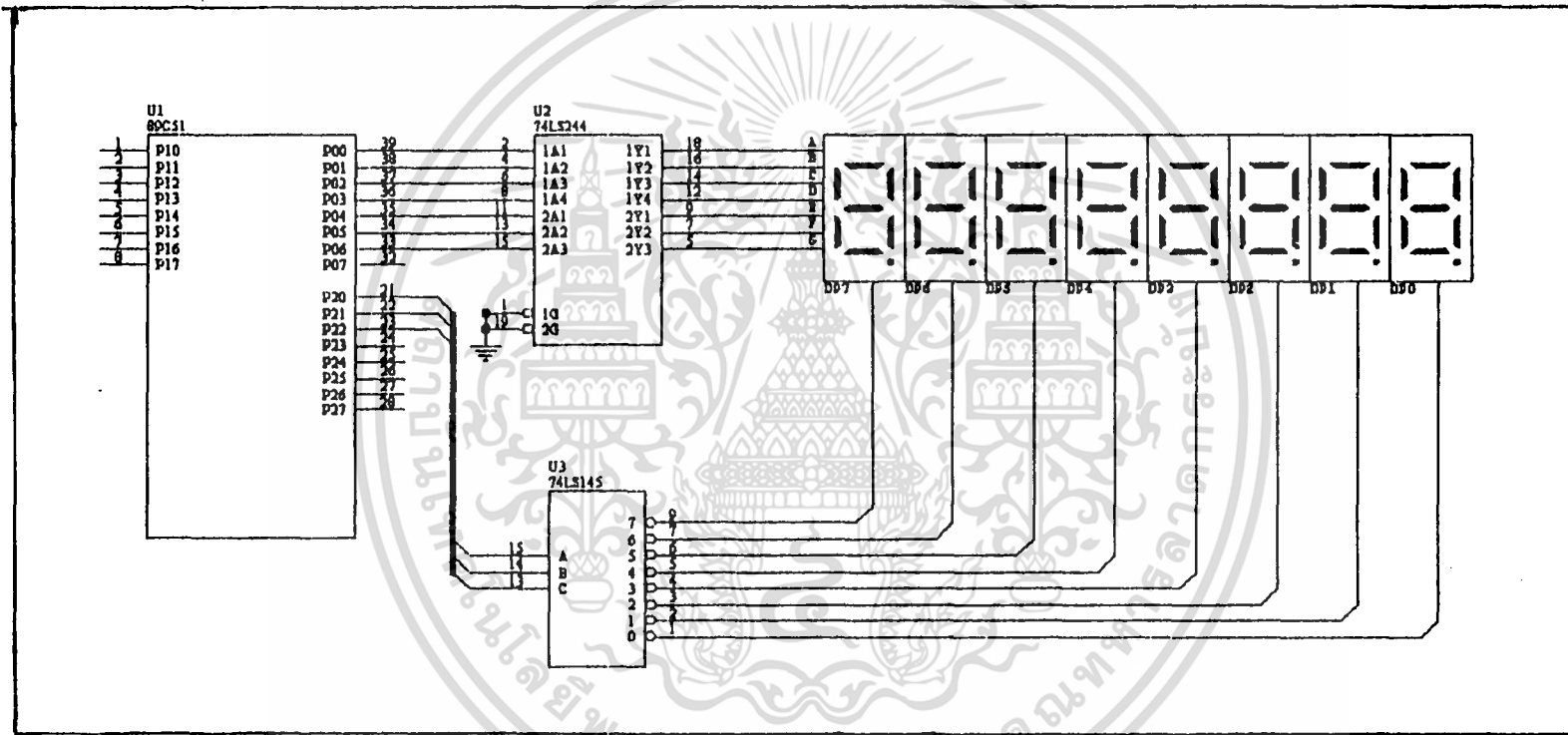
74145 เป็น BCD-to-Decimal decoder สำหรับค่า 0 ถึง 7 จาก P2.0-P2.2 โดยเป็น BCD แล้วเปลี่ยนเป็นลอจิก low กับขาที่ต่อเข้ากับ common ของ 7-segment จึงทำให้ 7-segment หลักนั้นสว่าง ส่วนจะสว่างเป็นค่าอะไรจะต้องใช้โปรแกรมควบคุมผ่านทางไอซี 74244



รูปที่ 3.11 ANT-51



รูปที่ 3.12 Manual Keyboard



รูปที่ 3.13 Display

3.2.5 ส่วนควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (Pulse Width Modulation Control circuit)

ส่วนควบคุมความเร็วนี้ใช้ไอซี TL494 ของ Motorola กำเนิดความถี่ที่คงที่เป็นพัลส์ แต่สามารถปรับค่า duty cycle ได้ ถ้า output ต่อแบบ common emitter จะได้ output ที่มี duty cycle 0-50 % ถ้า output ต่อแบบ common collector จะได้ output ที่มี duty cycle 50-100 % คุณสมบัติพิเศษของ TL494 คือ

1. มีวงจรออสซิลเลเตอร์ในตัว เพียงแต่ต่อ R เข้าที่ขา 6 และต่อ C เข้าที่ขา 5 ก็สามารถกำหนด clock เป็นลักษณะ sawtooth ได้ ความถี่ของ output จะเท่ากับความถี่ของออสซิลเลเตอร์นี้ ในวงจรนี้ใช้ $R = 10 \text{ K}$, $C = 0.1 \mu\text{F}$ จะได้ $f_{\text{osc}} = 1.1 \text{ KHz}$

2. On-Chip Error Amplifier 2 ชุด ซึ่งอยู่ที่ขา 1, 2 และ 15, 16 ซึ่งในวงจรข้างในเป็นแบบ comparator เราจะต่อขา 1 และ 16 ลง GND และขา 2, 15 จะต่ออนุกรมกับ R 33 K เข้ากับ Refout เพราะเราไม่ได้ control feedback

3. On-Chip 5 volt Reference ขา 14 เพื่อใช้อ้างอิงขาต่าง ๆ

4. Dead-time control (ขา 4) สามารถปรับได้ ซึ่งขานี้จะนำไป control ความเร็วของมอเตอร์ โดย volt ที่ตกคร่อมขานี้ จะนำไปเปรียบเทียบกับ f_{osc} จะทำให้ได้ duty cycle ที่ต้องการ แต่ขา Dead time นี้จะต้องไม่เกิน 5.25 volt

5. สามารถนำมาต่อเป็นวงจร Push-full หรือ Single-Ended Operation

6. Undervoltage lock out ถ้า Vcc ต่ำกว่า 5 volt ไอซีจะไม่ทำงาน

เอาท์พุทที่ได้จะไปเข้าวงจร drive motor เป็นลักษณะ switching แรงดันประมาณ 12 volt

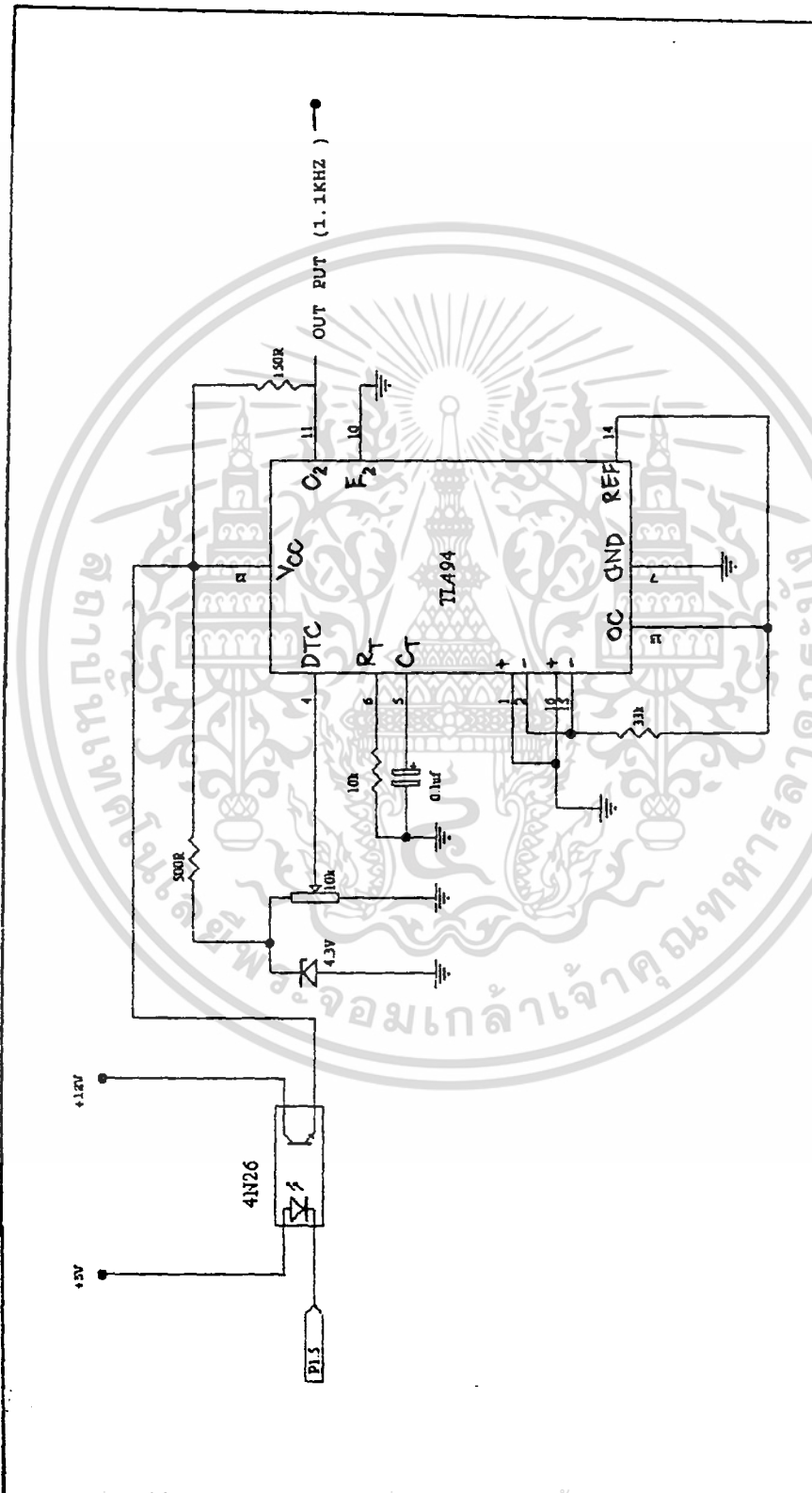
3.2.6 วงจร drive motor

ประกอบด้วย IGBT 4 ตัว ต่อแบบ H-bridge การทำงานของ IGBT จะทำงานทีละ 2 ตัว เพื่อมอเตอร์หมุนให้เดินหน้าหรือถอยหลัง ในการถอยหลังก็คือการ break มอเตอร์

การ bias IGBT ใช้ R 1 K ทำให้วงจรเกิดการ swing 12 volt จาก supply V1, V2 และ V3 ในการ drive มอเตอร์ให้พันขดลวด จะได้รับสัญญาณขับจาก PWM ผ่านตัวเชื่อมต่อทางแสง Opto Isolate 4N26 การใช้ Opto Isolate เพื่อจะแยกสัญญาณโวลต์เตจ โดย IGBT ที่ทำงาน คือตัวที่ 2 และตัวที่ 3 ส่วนการ break IGBT ที่งานคือตัวที่ 1 และ 4

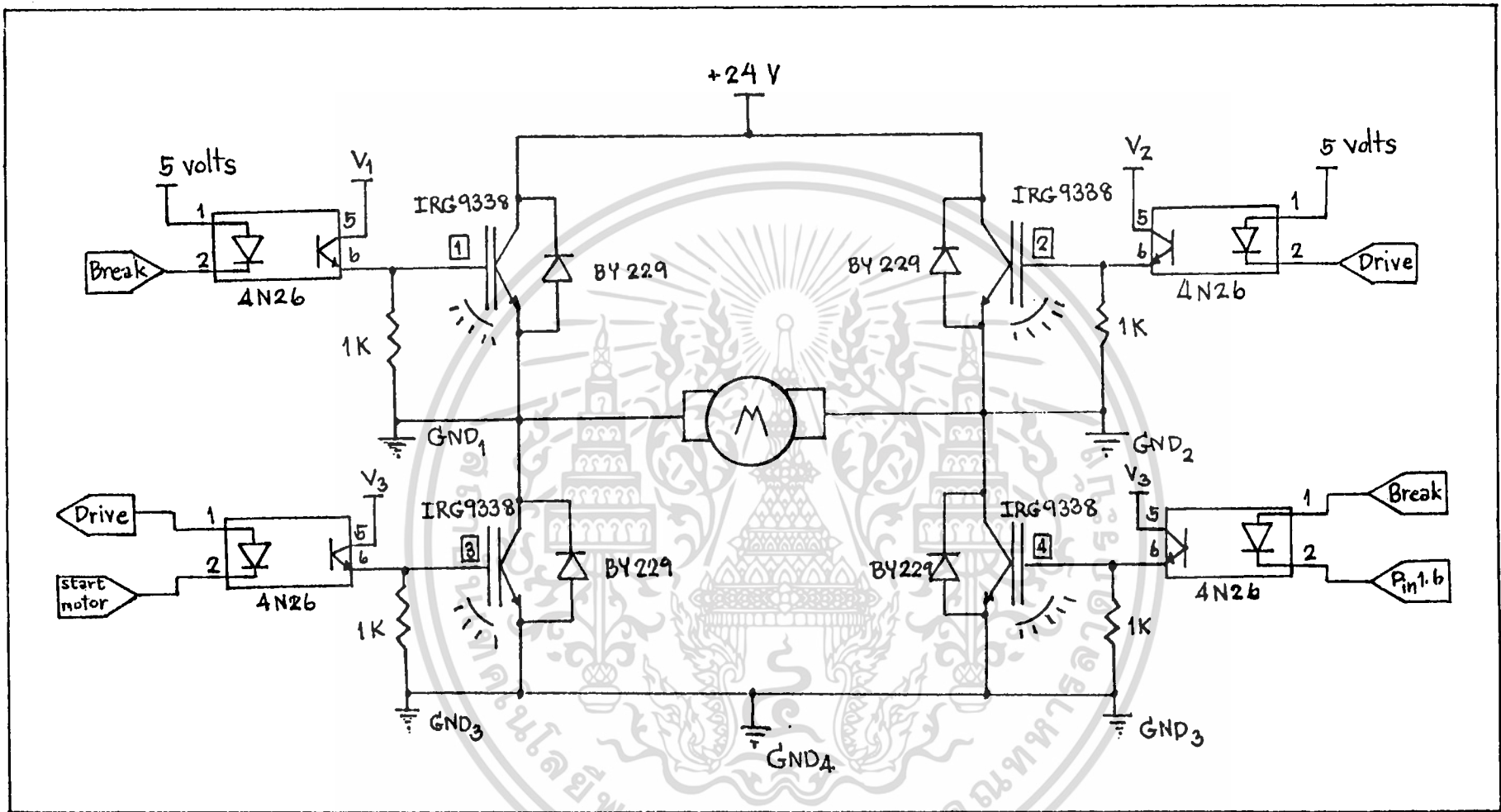
IGBT เมื่อนำไปขับ Load ที่เป็นขดลวด (motor) จะต้องมีไดโอดเคลมประหว่างขา collector และ emitter หรือเคลมประหว่างขา drain กับ source ในที่นี้ใช้ ultra fast recovery diode เบอร์ BY 229

สรุปแล้ววงจรนี้จะใช้ power supply 3 ชุด คือ V1, V2, V3 ชุดละ 12 โวลท์ GND แยกออกจากกัน กระแสที่ไหลจะไหลอยู่ภายในวงจรของมันเอง ไม่เกี่ยวข้องกับ และ supply อีกชุดคือ 24 โวลท์ ใช้ขับมอเตอร์

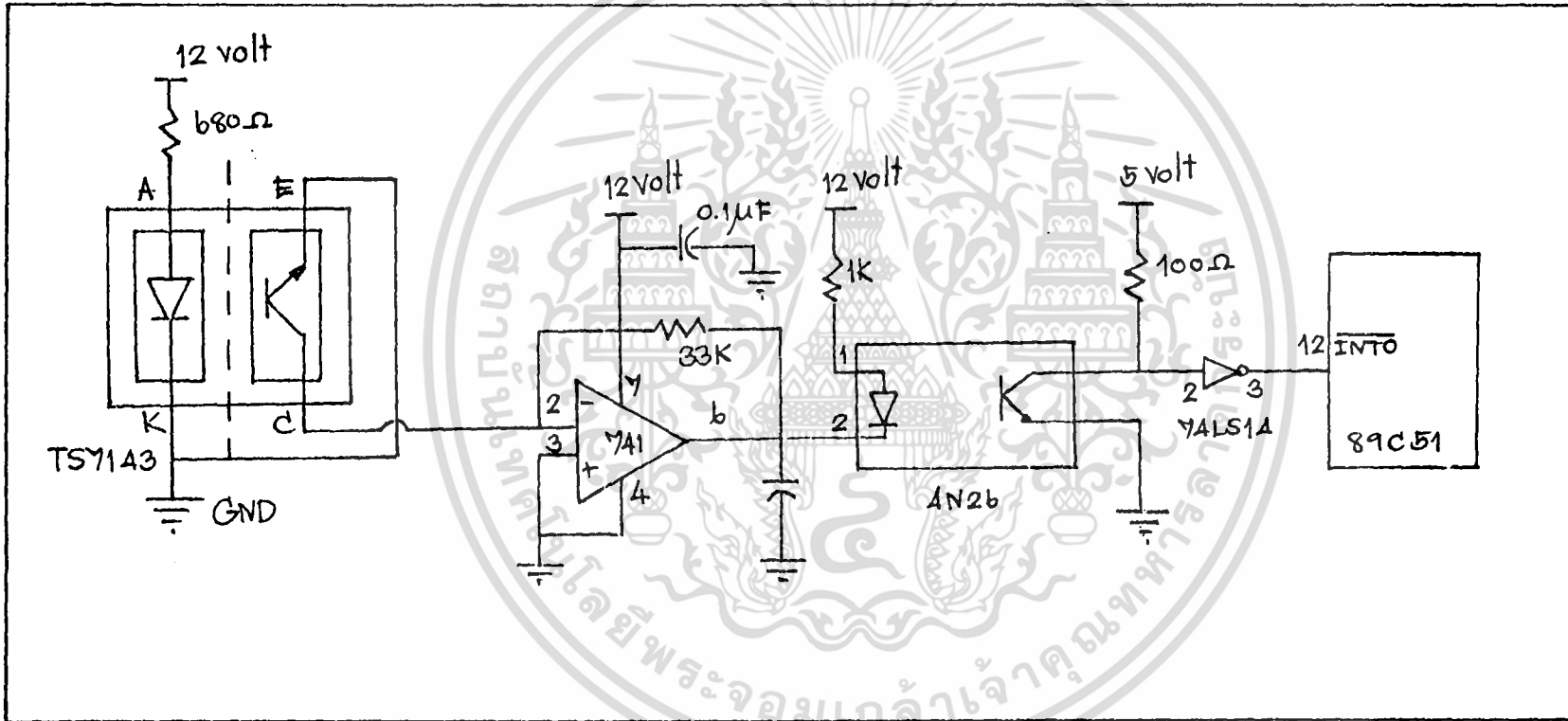


รูปที่ 3.14 PWM Control Speed

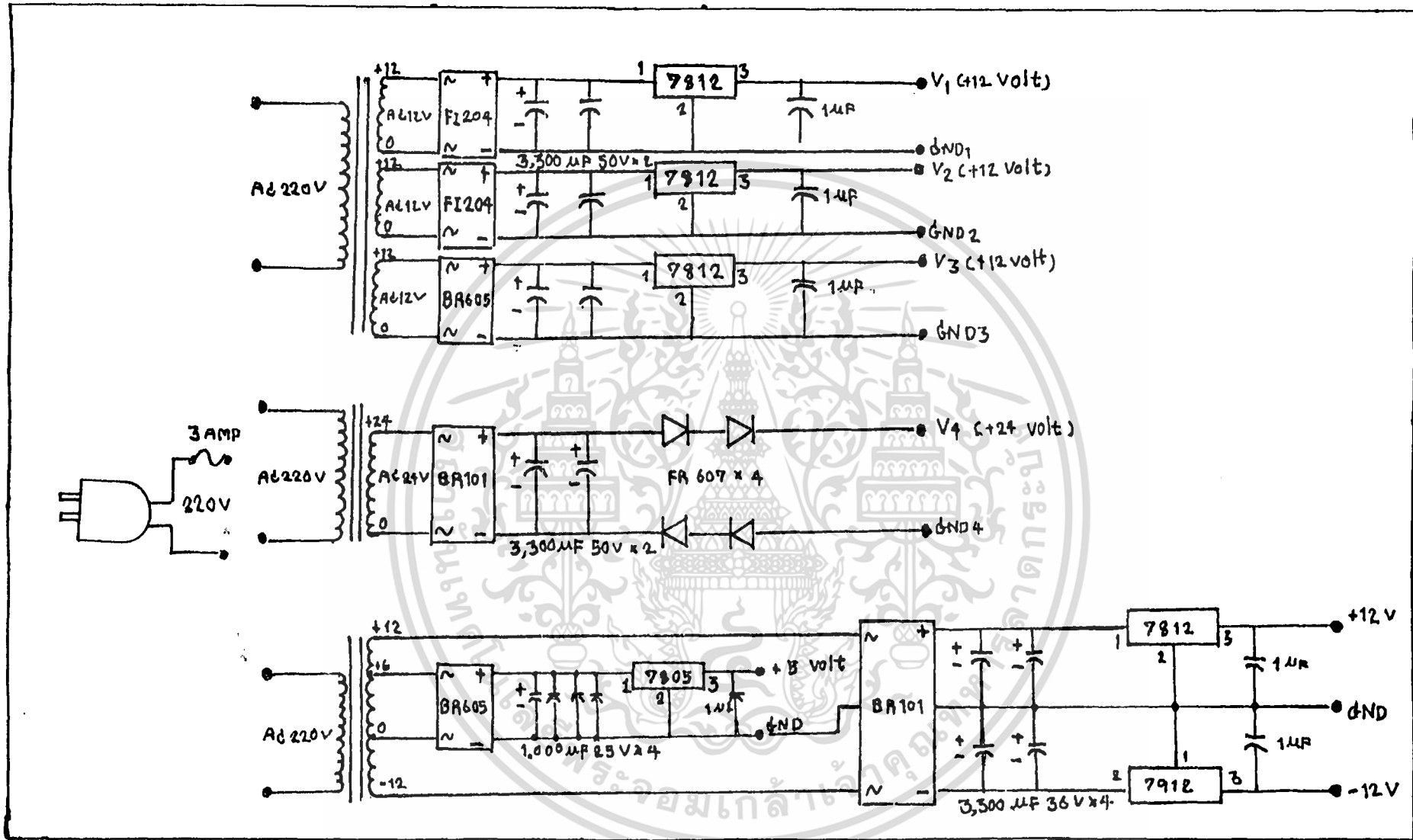
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเตเตหนาเบไซบระโยชนดานการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 Drive Motor
 Start motor from output PWM
 break motor from uC Pin 6



รูปที่ 3.16 Speed Sensor



รูปที่ 3.17 Power Supply

3.2.7 Speed Sensor

ในการตรวจสอบความเร็วนั้น จะใช้การตรวจสอบทางแสงโดยใช้ TS7143 ซึ่งประกอบด้วยตัวส่งเป็นไดโอด ให้แสงอุลตราไวโอเล็ต ตัวรับเป็น photo transistor ถ้ามีแสงมาตกกระทบ จะทำให้มีกระแสรั่วไหลออกมาประมาณ -0.2 mA ถ้าไม่มีแสงมาตกกระทบก็จะมีกระแสไหลในวงจร โดยเราจะมีเฟลตบั้งแสงตัดกับแกนหมุนขดลวด เพื่อเป็นการตรวจสอบรอบ กระแสที่ไหลออกมาจะนำไปเข้า วงจร Current to Voltage Converter

$$\begin{aligned} \text{โดย } V_0 &= -IR_f \\ &= -(-0.2 \text{ mA})(33 \text{ K}) \\ &= 6.6 \text{ V} && \text{เมื่อมีแสงตกกระทบบตัวรับ} \\ V_0 &= -(0)(33 \text{ K}) \\ &= 0 \text{ V} && \text{เมื่อไม่มีแสงตกกระทบบตัวรับ} \end{aligned}$$

เอาท์พุทที่ออกจากขา 6 ของออปแอมป์ 741 จะไปผ่านตัวเชื่อมโยทางแสง 4N26 เพื่อปรับระดับสัญญาณให้ได้ 0-5 V เพื่อนำไปเข้าขา P3.2 ของ 89C51 และนำไป check จำนวน โดยพัลส์ 1 ลูกแทนรอบ 1 รอบ

3.3 ส่วนซอฟต์แวร์

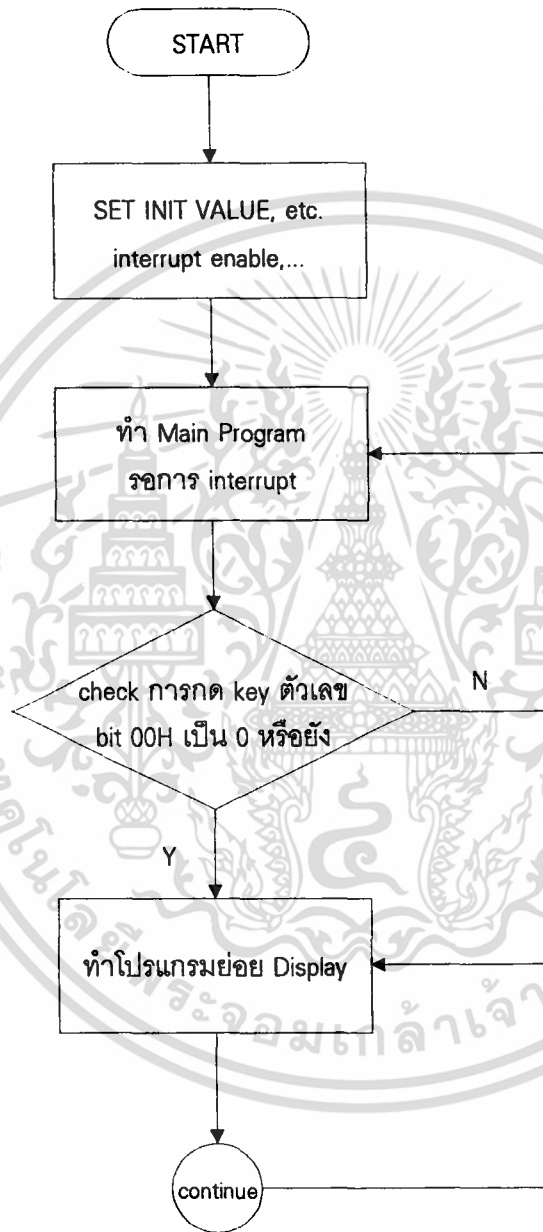
หลักการทำงานของส่วนซอฟต์แวร์ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมหลัก (Main) จะทำงานเมื่อเริ่มเปิดเครื่อง มีการเซตค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เช่น เซตการทำงานของอินเตอร์รัพท์ให้เป็น enable เป็นต้น
2. โปรแกรมอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Routine) ในโปรแกรมนี้อมีการใช้งานอินเตอร์รัพท์ภายนอกทั้ง 2 เบอร์ คือ อินเตอร์รัพท์ 0 และ อินเตอร์รัพท์ 1 ซึ่งแต่ละ interrupt routine มีการทำงานดังนี้

2.1 โปรแกรมอินเตอร์รัพท์ 0 มีชื่อว่า CHK_ROUND ซึ่งจะเริ่มทำงานเมื่อเกิดอินเตอร์รัพท์ 0 คือ เมื่อมีสัญญาณจาก Opto-Isolate โปรแกรมนี้จะทำหน้าที่นับและตรวจสอบสัญญาณที่เข้ามาแต่ละครั้งว่าครบตามจำนวนรอบที่ป้อนไว้ในตอนแรกหรือยัง ถ้าครบแล้วจะเรียกโปรแกรมย่อย BREAK ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่เบรคมอเตอร์

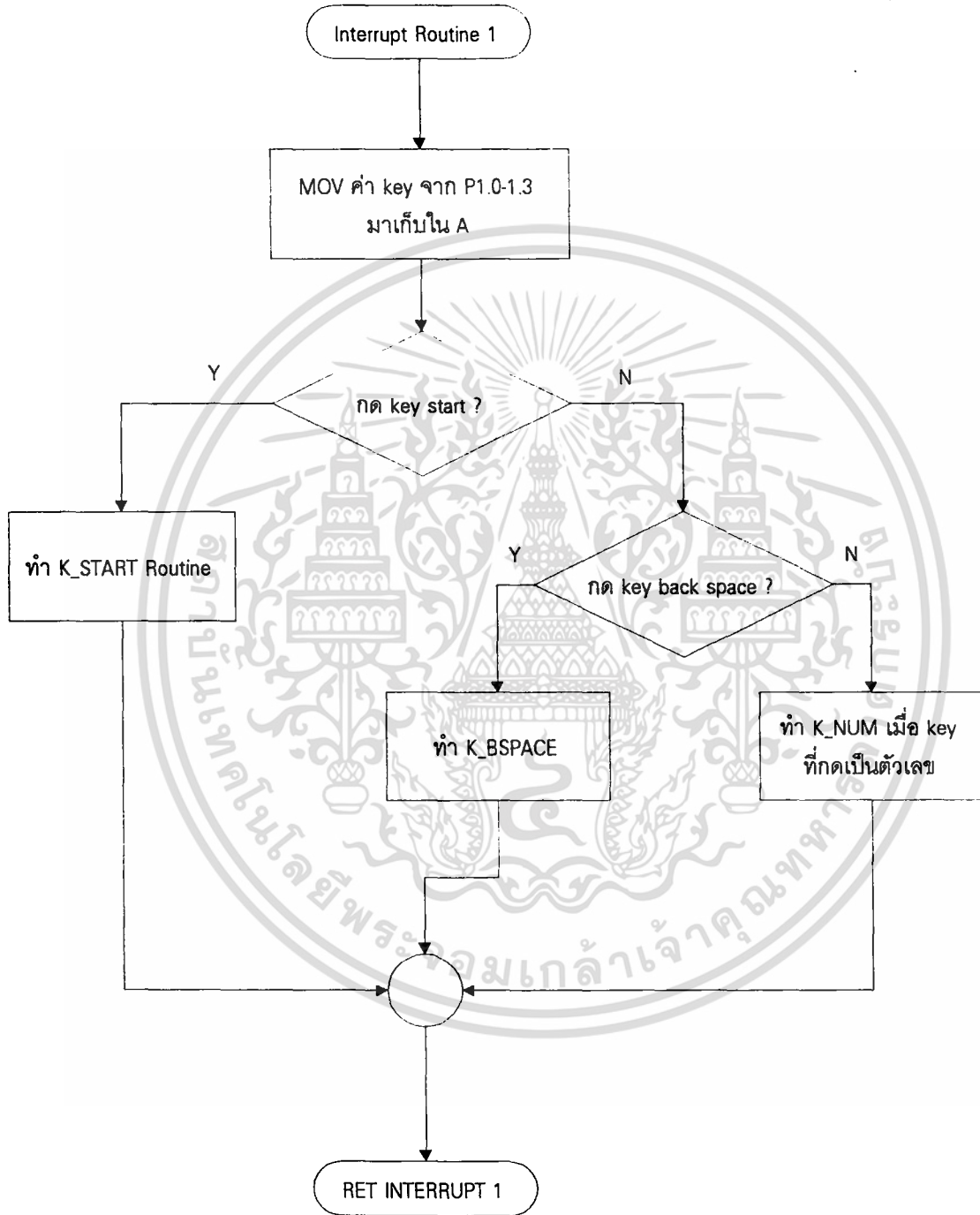
2.2 โปรแกรมอินเตอร์รัพท์ 1 มีชื่อว่า K_NML ซึ่งจะเริ่มทำงานเมื่อเกิดการอินเตอร์รัพท์ 1 คือ เมื่อมีการกดคีย์ใด ๆ โปรแกรมนี้จะทำหน้าที่รับค่าคีย์บอร์ดที่กดจาก 74922 เข้ามาทาง P1.0-P1.3 แล้วทำการตรวจสอบค่าที่รับเข้ามาว่าเป็นคีย์อะไร ถ้าเป็นคีย์ตัวเลขจะไปทำโปรแกรมย่อย K_NUM ถ้าเป็นคีย์ start จะไปทำโปรแกรมย่อย K_START แต่ถ้าเป็นคีย์ back space ก็จะไปทำโปรแกรมย่อย K_BSPACE

เอกสารนี้เป็นการทำงานโดยรวมของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ด้วย โฟลว์ชาร์ต ดังแสดงในรูป  ขอบข่ายงานการคำนวณและการดำเนินการคำนวณต่าง ๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



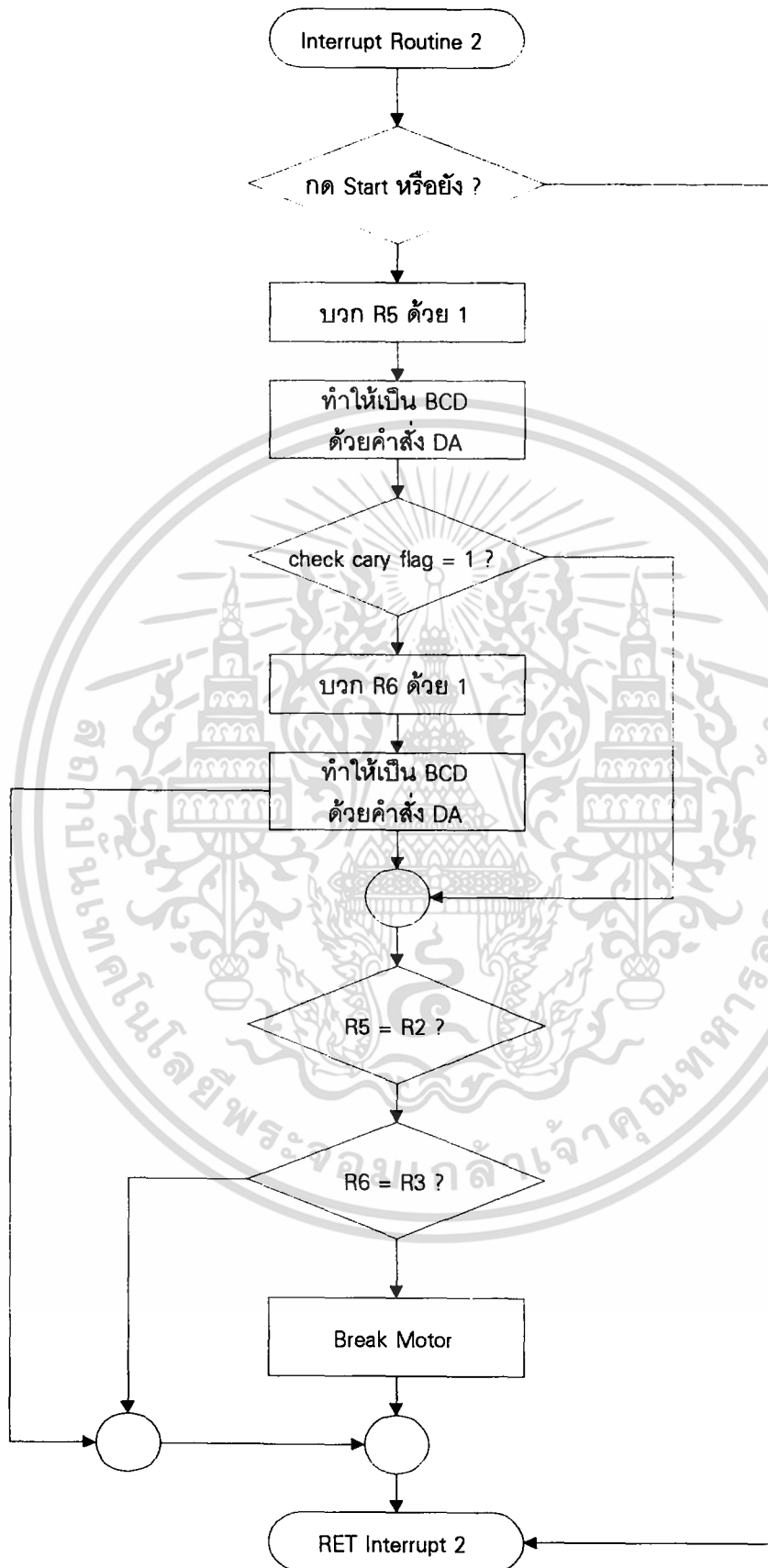
รูปที่ 3.18 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

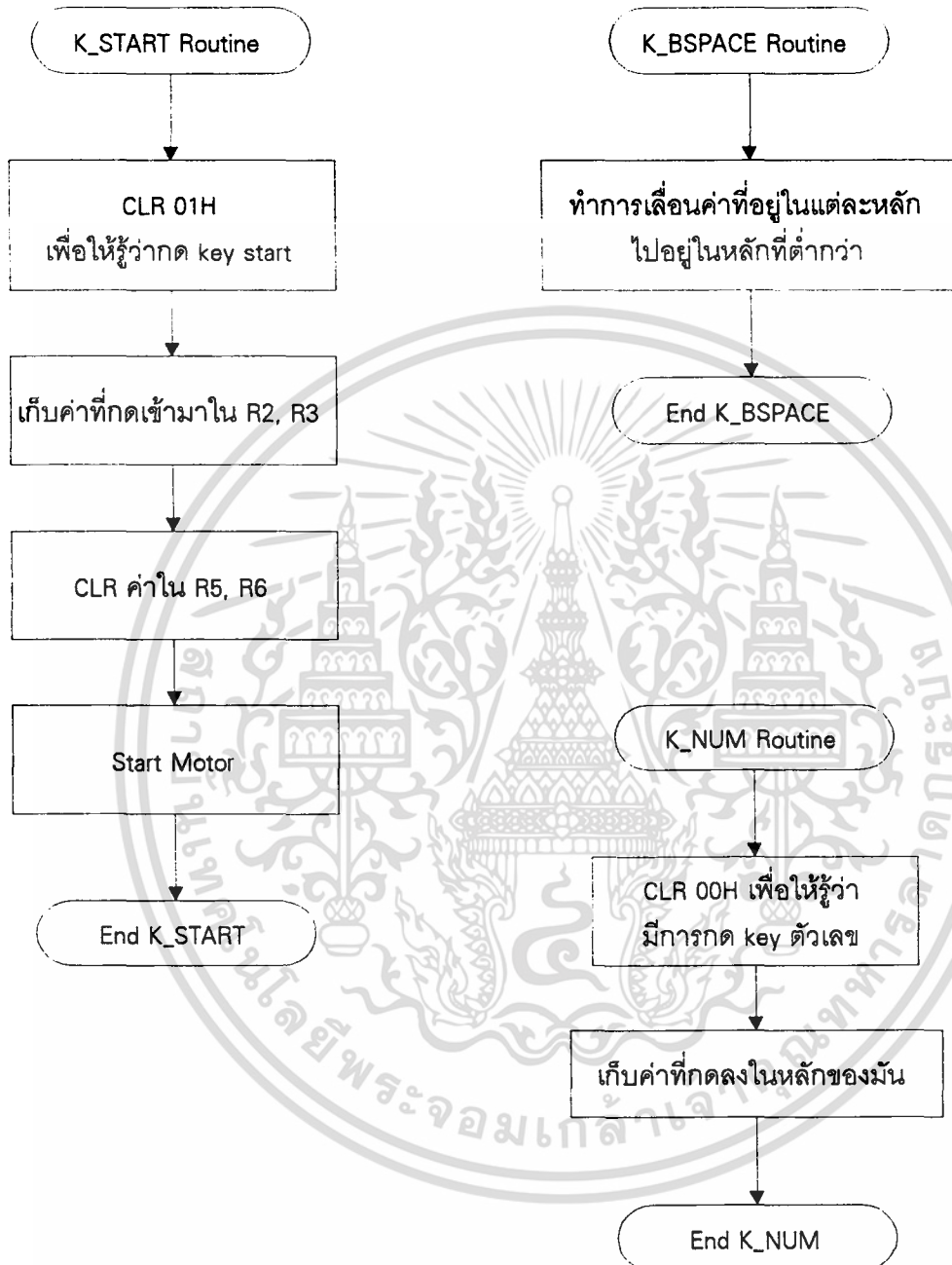


รูปที่ 3.19 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมอินเทอร์รัพท์ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

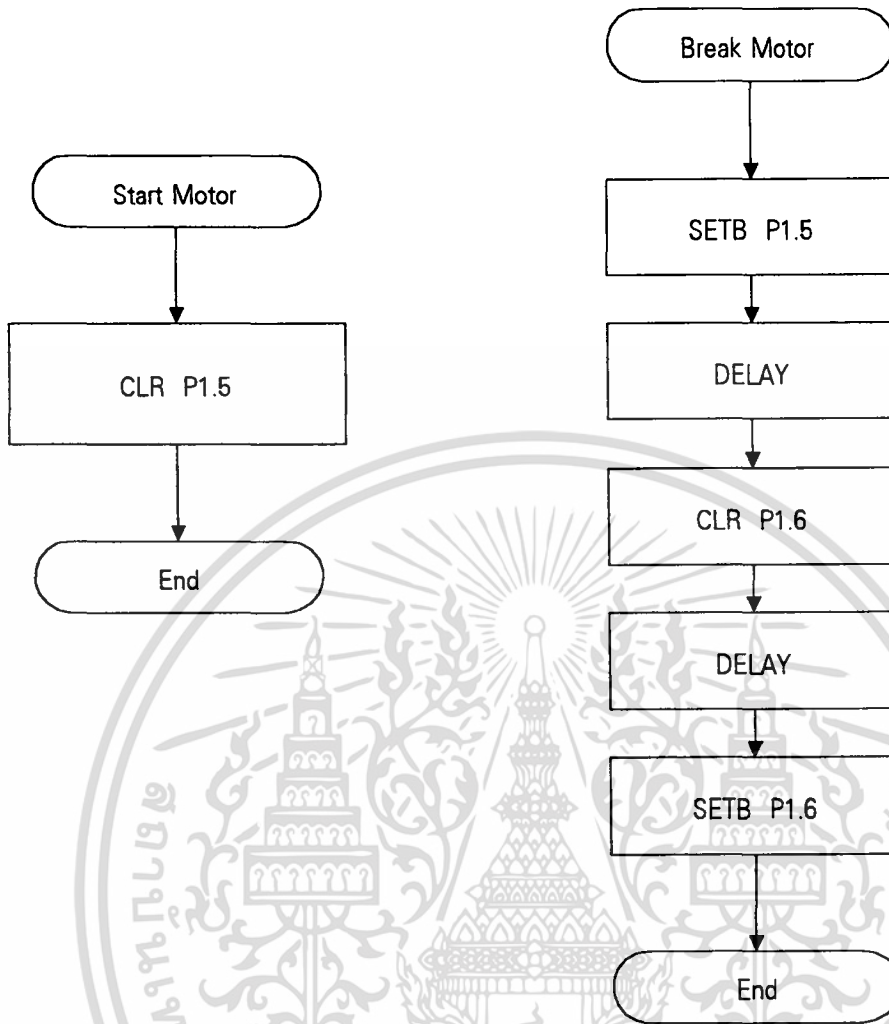


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.20 ไฟล์ชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมอินเทอร์รัพท์ 1 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ไฟล์ชาร์ตแสดงโปรแกรมย่อยเมื่อมีการกดปุ่มตัวเลข START และ BACK SPACE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 โฟลว์ชาร์ตแสดงโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่ START และ BREAK มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปผลและวิจารณ์

โครงการนี้คิดว่าสำเร็จออกมาเป็นรูปร่างได้จะต้องอาศัยความรู้ในหลายด้าน ซึ่งในบางเรื่องได้ศึกษามาแล้วในห้องเรียน ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51, การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, การออกแบบวงจร power supply, การออกแบบวงจร amplifier โดยใช้ op-amp, วงจร digital, transducer ฯลฯ แต่ในบางเรื่องไม่มีสอนในห้องเรียน ฉะนั้นเราจำเป็นต้องมาศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่ DC motor, วิธีการคอนโทรลมอเตอร์ทั้งแบบ open loop และ close loop เป็นต้น

ในการออกแบบโครงการเครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัตินี้เกิดปัญหาขึ้นหลายอย่างและบางอย่างก็สามารถแก้ไขได้ บางอย่างก็ไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งก็ขอให้ผู้ที่สนใจในโครงการนี้นำแนวความคิดดังกล่าวไปใช้พัฒนาโครงการให้เป็นระบบระเบียบมากยิ่งขึ้น

แนวทางการพัฒนาเครื่องพันขดลวดแบบอัตโนมัตินี้จะขอล่าออกเป็นส่วน ๆ ดังนี้

- ส่วนแมคคานิค

เนื่องจากส่วนนี้ประกอบด้วย อุปกรณ์สำหรับวางขดลวด และอุปกรณ์สำหรับพันขดลวด ซึ่งมีทั้ง 2 ตัวนี้ มีน้ำหนักมากทำให้ต้องแยกออกจากกัน เพราะจะทำให้ขนย้ายได้สะดวกขึ้น แนวทางการพัฒนา คือ ต้องออกแบบระบบให้มีขนาดเล็กลง และมีน้ำหนักลดลงแต่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักของขดลวด (Source) ที่นำมาวาง และในส่วนของอุปกรณ์สำหรับพันขดลวดนั้น จะมี DC MOTOR 24 VOLT ติดอยู่แต่เนื่องจากมีขนาดเล็ก จึงไม่เหมาะที่จะพันขดลวดที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถแก้ไข ได้โดยใช้ DC MOTOR ที่มีขนาดใหญ่กว่านี้มีอัตราการทอรอบมาก ๆ

- ส่วนของระบบควบคุม

ในระบบนี้มีความสามารถในการควบคุมความเร็วรอบในการพันขดลวดโดยใช้วิธี Pulse Width Modulate (PWM) และสามารถควบคุมรอบของขดลวดโดยใช้ Opto Isolator ในการ Sensor รอบ แต่ในระบบควบคุมแบบ Close Loop นั้น ยังมีวิธีการที่หน้าสนใจอีกมากมาย เช่น Phase Lock Loop ระบบ PID คอนโทรลด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ,ระบบออกแบบคอนโทรลไฟที่ที่สุดด้วยวิธีการชดเชยโพล และ ซีโร เป็นต้น

หนังสืออ้างอิง

1. โยชิน เปรมปราณีรัชต์ , “ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์” , Japan International Cooperation Agency (JICA), 2533
2. Kenneth J. Ayala, “The 8051 Microcontroller, ARCHITECTURE, PROGRAMMING, and APPLICATIONS”, WEST PUBLISHING COMPANY, 1991
3. AN ENGINEERING HANDBOOK, “ DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEM” , ELECTRO-CRAFT CORPORATION (EC) , 1973
4. Howard M. Berlin, “Design of OP-AMP Circuit with Experiment” ,Scholars Books Co., Ltd. Taipei,Taiwan,1977,pp.51-78.
5. ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ, “ รวมบทความ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” , SE-EDUCATION Public company Limited,1994 ,pp86-92.
6. ชัชวาล โชติวารินทร์. “ รวมบทความ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” , SE-EDUCATION Public company Limited,1994 ,pp93-100.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

==AUTOMATIC COIL-WINDING MACHINE==

=====SOFTWARE BY DONRUDEE=====

```
ORG 000H
LJMP MAIN1
ORG 003H
LJMP CHK_ROUND
ORG 013H
LJMP K_NML

;*****ADDRESS FOR KEEP VALUE*****
;-----
DIGIT_0 EQU 40H
DIGIT_1 EQU 41H
DIGIT_2 EQU 42H
DIGIT_3 EQU 43H
DIGIT_4 EQU 44H

SPEC EQU 3AH
STOCK EQU 3BH

TIME1 EQU 3CH
TIME2 EQU 3DH
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
*****MAIN PROGRAM*****
```

```
;
```

```

                                ORG    100H

MAIN1:    MOV    SP,#50H        ;set stack begin at 50h
          MOV    PSW,#00H      ;select registers bank 0
          LCALL CLR_DIGIT
          MOV    SPEC,#0FFH    ;+ 1 when key press 1 time

          SETB   00H           ;to be cleared when key normal press
          SETB   01H           ;to be cleared when key start press
          SETB   P1.5          ;bit for motor
          SETB   P1.6          ;bit for motor

          SETB   EA           ;enabl all interrupt
          SETB   EX1          ;enable external interrupt 1
          SETB   IT1          ;signal type control bit interrupt 1

          LCALL  RUN1
          LCALL  RUN2

          SJMP   MAIN1        ;JUMP TO MAIN1

```

```
*****RUN BOOMER-LANG DISPLAY*****
```

```
;
```

```

RUN1:    MOV    R0,#50H
          MOV    R5,#08H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R3,#00H
MOV R4,#0FH
LOOP1: MOV A,R3
        LCALL DISPLAY2
        MOV P2,R3
        LCALL DELAY1
        MOV A,R4
        LCALL DISPLAY2
        MOV A,R4
        SUBB A,#08H
        MOV P2,A
        LCALL DELAY1
        DJNZ R0,LOOP1
        MOV R0,#50H
        INC R3
        DEC R4
        DJNZ R5,LOOP1
        MOV R0,#50H
        MOV R5,#08H
        MOV R3,#00H
        MOV R4,#0FH
LOOP2: MOV A,R3
        LCALL DISPLAY2
        MOV A,R4
        SUBB A,#08H
        MOV P2,A
        LCALL DELAY1
        MOV A,R4
        LCALL DISPLAY2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV    P2,R3
LCALL  DELAY1
DJNZ   R0,LOOP2
MOV    R0,#50H
INC    R3
DEC    R4
DJNZ   R5,LOOP2
RET

```

```

;*****RUN "Enter n of round"*****
;-----

```

```

RUN2:  MOV    30H,#23D    ; DISPLAY DIGIT 0
        MOV    31H,#22D    ; DISPLAY DIGIT 1
        MOV    32H,#21D    ; DISPLAY DIGIT 2
        MOV    33H,#20D    ; DISPLAY DIGIT 3
        MOV    34H,#19D    ; DISPLAY DIGIT 4
        MOV    35H,#18D    ; DISPLAY DIGIT 5
        MOV    36H,#17D    ; DISPLAY DIGIT 6
        MOV    37H,#16D    ; DISPLAY DIGIT 7

```

```

SHOW:  MOV    R0,#08H    ; LOOP SHOW 8 ROUND

```

```

SUB_SHOW: MOV    A,30H
        LCALL  DISPLAY2
        MOV    P2,#00H
        LCALL  DELAY2

```

```

        MOV    A,31H
        LCALL  DISPLAY2
        MOV    P2,#01H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,32H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#02H
```

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,33H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#03H
```

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,34H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#04H
```

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,35H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#05H
```

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,36H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#06H
```

```
LCALL DELAY2
```

```
MOV A,37H
```

```
LCALL DISPLAY2
```

```
MOV P2,#07H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LCALL DELAY2

DJNZ R0,SUB_SHOW ; CHECK LOOP SHOW

INC 30H

INC 31H

INC 32H

INC 33H

INC 34H

INC 35H

INC 36H

INC 37H

MOV A,37H

CJNE A,#41D,SHOW

RET

*****DISPLAY & DELAY SEGMENT*****

DISPLAY2: JNB 00H,PRESSED

MOV DPTR,#BOOMER

MOVC A,@A+DPTR

MOV P0,A

SJMP RET3

PRESSED: PUSH PSW

MOV PSW,#10H

LCALL DISPLAY ; when key pressed, display data

POP PSW

SJMP PRESSED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

RET3:      RET
BOOMER:   DB   61H,23H,43H,62H,61H,23H,43H,62H
           DB   4CH,54H,58H,1CH,4CH,54H,58H,1CH
           DB   00H,00H,00H,00H,00H,00H,00H,79H
           DB   54H,78H,58H,50H,00H,54H,00H,5CH
           DB   71H,00H,50H,5CH,1CH,54H,5EH,00H
           DB   00H,00H,00H,00H,00H,00H,00H,00H
           DB   00H,00H,00H,00H,00H,00H,00H,00H

```

```

DELAY1:   MOV   R7,#02H
SUB_DE1:  MOV   R6,#00H
           DJNZ R6,$
           DJNZ R7,SUB_DE1
           RET
DELAY2:   MOV   R7,#06H
SUB_DE2:  MOV   R6,#00H
           DJNZ R6,$
           DJNZ R7,SUB_DE2
           RET

```

```

;*****CLEAR DATA IN DIGITS*****
;-----

```

```

CLR_DIGIT: MOV   DIGIT_0,#00H
           MOV   DIGIT_1,#00H
           MOV   DIGIT_2,#00H
           MOV   DIGIT_3,#00H
           MOV   DIGIT_4,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

RET
;CLEAR REGISTERS
;-----

CLR_REGISTER: MOV    R2,#00H

               MOV    R3,#00H
               MOV    R4,#00H
               MOV    R5,#00H
               MOV    R6,#00H
               MOV    R7,#00H

               RET

;*****INPUT KEY FROM PORT1 TO A*****
;-----
;ENTRY: -
;EXIT:  A

INPUT_KEY: MOV    A,P1
           ANL    A,#0FH
           RET

;*****KEY NUMBER 0-9*****
;-----

K_NML:      PUSH   PSW
           PUSH   ACC
           PUSH   DPL
           PUSH   DPH
           MOV    PSW,#10H      ;select register bank 1
           MOV    A,SPEC

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CJNE  A,#03H,L2
LCALL INPUT_KEY
CJNE  A,#0DH,L1
LCALL K_START
SJMP  L3
L1:   CJNE  A,#0FH,L3
      LCALL K_BSPACE
      SJMP  L3
L2:   LCALL INPUT_KEY
      LCALL K1
L3:   POP  DPH
      POP  DPL
      POP  ACC
      POP  PSW
      RETI
;*****KEY PRESS ROUTINE*****
;-----
;ENTRY: A
K1:   CJNE  A,#0DH,K2
      LCALL K_START
      SJMP  RETURN
K2:   CJNE  A,#0FH,K3
      LCALL K_BSPACE
      SJMP  RETURN
K3:   LCALL K_NUM
RETURN: RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*****KEY NUMBER 0 - 9*****

;ENTRY: A

;EXIT: DIGIT_0-7

```
K_NUM:   CLR    00H
          MOV    B,A
          MOV    A,SPEC
          ADD    A,#01H
          MOV    SPEC,A
          CJNE   A,#00H,K_NUM2
```

```
K_NUM1:  MOV    DIGIT_0,B
          SJMP   RET1
```

```
K_NUM2:  LCALL  SHIFT_DATA1
          SJMP  K_NUM1
```

```
RET1:    RET
```

*****KEY START*****

```
K_START: JB    00H,RET_K_START
          SETB  EX0          ;enable external interrupt 0
          SETB  IT0          ;signal type control bit interrupt 0
          CLR   01H
          CLR   EX1
          CLR   IT1
          PUSH  PSW
          MOV   PSW,#08H
          LCALL CLR_REGISTER
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL CHANGE_VA1
LCALL COMPOSE
LCALL CLR_DIGIT
CLR P1.5 ; START MOTOR
POP PSW
RET_K_START: RET

```

```

;*****KEY BACK-SPACE*****
;-----

```

```

K_BSPACE: JB 00H,RET2
           MOV A,SPEC
           CJNE A,#0FFH,BSPACE
           SETB 00H
           SJMP L2
BSPACE:   LCALL SHIFT_DATA2
           DEC SPEC
RET2:     RET

```

```

;*****SHIFT DATA TO LEFT*****
;-----

```

```

;ENTRY: SPEC

```

```

;EXIT: DIGIT_0-7

```

```

SHIFT_DATA1: MOV A,SPEC
             MOV R2,A
             DEC A
             ADD A,#DIGIT_0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R1,A
SHIFT_LEFT: MOV STOCK,@R1
MOV A,#DIGIT_0
ADD A,R2
MOV R1,A
MOV @R1,STOCK
DEC R1
DEC R1
DJNZ R2,SHIFT_LEFT
RET

;*****SHIFT DATA TO RIGHT*****
;-----
;ENTRY: SPEC,DIGIT_0-7
;EXIT: DIGIT_0-7

SHIFT_DATA2: MOV R2,SPEC
INC R2
MOV R3,#00H
SHIFT_RIGHT: MOV A,#DIGIT_0
ADD A,R3
MOV STOCK,A
INC A
MOV R1,A
MOV A,@R1
CJNE R2,#01H,SHIFT
MOV @R1,#00H

SHIFT: MOV R1,STOCK
MOV @R1,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INC    R3
DJNZ  R2,SHIFT_RIGHT
RET

```

COMPOSE DIGIT DISPLAY -> REGISTERS

;-----

```

COMPOSE:  MOV    R0,#DIGIT_0
           MOV    R1,#0AH      ; LOOP R2, R3, R4
COMP1:    MOV    A,@R0
           MOV    @R1,A
           INC    R0
           MOV    A,@R0
           SWAP  A
           ORL   A,@R1
           MOV    @R1,A
           INC    R0
           INC    R1
           CJNE  R0,#DIGIT_4,COMP1
           RET

```

*****DECOMPOSE REGISTERS -> DISPLAY*****

;-----

```

DE_COMPOSE: MOV    R0,#DIGIT_0
             MOV    R1,#0DH      ; LOOP R5, R6, R7
DE_COMP1:   MOV    A,@R1
             ANL   A,#0FH

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV    @R0,A
MOV    A,@R1
SWAP   A
ANL    A,#0FH
INC    R0
MOV    @R0,A
INC    R0
INC    R1
CJNE   R0,#DIGIT_4,DE_COMP1
RET

; CHANGE DISPLAY -> NUMBER OF ROUND
;-----
CHANGE_VA1:  MOV    R0,#DIGIT_0
C_VA10:     CJNE   @R0,#05H,C_VA11
            MOV    @R0,#04H
            SJMP  C_VA_LOOP1
C_VA11:     CJNE   @R0,#06H,C_VA12
            MOV    @R0,#05H
            SJMP  C_VA_LOOP1
C_VA12:     CJNE   @R0,#07H,C_VA13
            MOV    @R0,#06H
            SJMP  C_VA_LOOP1
C_VA13:     CJNE   @R0,#09H,C_VA14
            MOV    @R0,#07H
            SJMP  C_VA_LOOP1
C_VA14:     CJNE   @R0,#0AH,C_VA15
            MOV    @R0,#08H
            SJMP  C_VA_LOOP1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C_VA15:  CJNE  @R0,#0BH,C_VA16
          MOV   @R0,#09H
          SJMP  C_VA_LOOP1
C_VA16:  CJNE  @R0,#0EH,C_VA_LOOP1
          MOV   @R0,#00H
C_VA_LOOP1: INC  R0
          CJNE  R0,#DIGIT_4,C_VA10
          RET

; CHANGE NUMBER OF ROUND -> DISPLAY
;-----

CHANGE_VA2: MOV  R0,#DIGIT_0
C_VA20:    CJNE  @R0,#04H,C_VA21
          MOV   @R0,#05H
          SJMP  C_VA_LOOP2
C_VA21:    CJNE  @R0,#05H,C_VA22
          MOV   @R0,#06H
          SJMP  C_VA_LOOP2
C_VA22:    CJNE  @R0,#06H,C_VA23
          MOV   @R0,#07H
          SJMP  C_VA_LOOP2
C_VA23:    CJNE  @R0,#07H,C_VA24
          MOV   @R0,#09H
          SJMP  C_VA_LOOP2
C_VA24:    CJNE  @R0,#08H,C_VA25
          MOV   @R0,#0AH
          SJMP  C_VA_LOOP2
C_VA25:    CJNE  @R0,#09H,C_VA26

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV @R0,#0BH
SJMP C_VA_LOOP2
C_VA26: CJNE @R0,#00H,C_VA_LOOP2
MOV @R0,#0EH
C_VA_LOOP2:INC R0
CJNE R0,#DIGIT_4,C_VA20
RET

```

```

;*****DISPLAY*****
;-----

```

```

DISPLAY: MOV TIME1,#0E0H
MOV TIME2,#0FFH
D1: MOV R0,#DIGIT_0
MOV R4,#02H
D2: LCALL OUT_DATA
LCALL OUT_DIGIT
MOV R7,#0CH
D_D: MOV R6,#00H
DJNZ R6,$
DJNZ R7,D_D
DJNZ R7,$
INC R4
INC R0
CJNE R4,#06H,D2
DJNZ TIME2,D1
DJNZ TIME1,D1
RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

;*****OUT DATA & DIGIT*****

;-----

```
OUT_DATA: MOV  DPTR,#CODE_SEVEN
          MOV  A,@R0
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  P0,A
          RET
```

```
OUT_DIGIT: MOV  A,P2
          ANL  A,#0F8H
          ORL  A,R4
          MOV  P2,A
          RET
```

;*****CHECK NUMBER OF ROUND*****

;-----

```
CHK_ROUND: JB   01H,CHK_R2
          PUSH PSW
          PUSH ACC
          PUSH DPL
          PUSH DPH
          MOV  PSW,#08H
          MOV  A,R5
          ADD  A,#01H
          DA   A
          MOV  02H,C
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV    R5,A
JNB    02H,CHK_R1
CLR    C
MOV    A,R6
ADD    A,#01H
DA     A
MOV    02H,C
MOV    R6,A
CHK_R1: LCALL  DE_COMPOSE
        LCALL  CHANGE_VA2
        MOV    A,R5
        CJNE  A,0AH,CHK_R2
        MOV    A,R6
        CJNE  A,0BH,CHK_R2
        LCALL  BREAK
        PUSH  PSW
        MOV    PSW,#10H
        LCALL  DISPLAY
        POP   PSW
        SETB  01H
        SETB  EX1
        SETB  IT1
CHK_R2: POP   DPH
        POP   DPL
        POP   ACC
        POP   PSW
        RETI

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*****BREAK MOTOR*****

```

BREAK:   SETB   P1.5
          LCALL  DELAY
          CLR    P1.6
          LCALL  DELAY
          SETB   P1.6
          RET

```

```

DELAY:   MOV    R7,#50H
SUB_DE:  MOV    R6,#00H
          DJNZ   R6,$
          DJNZ   R7,SUB_DE
          RET

```

*****CODE '0'-'9' OF 7-SEGMENT*****

```

CODE_SEVEN: DB  00H,06H,5BH,4FH ;CODE 0 - 9 SEGMENT
              DB  00H,66H,6DH,7DH
              DB  00H,07H,7FH,6FH
              DB  00H,00H,3FH,00H

```

END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



MM54C922/MM74C922 16-Key Encoder

MM54C923/MM74C923 20-Key Encoder

general description

These CMOS key encoders provide all the necessary logic to fully encode an array of SPST switches. The keyboard scan can be implemented by either an external clock or external capacitor. These encoders also have on chip pull-up devices which permit switches with up to 50 k Ω on resistance to be used. No diodes in the switch array are needed to eliminate ghost switches. The internal debounce circuit needs only a single external capacitor and can be defeated by omitting the capacitor. A Data Available output goes to a high level when a valid keyboard entry has been made. The Data Available output returns to a low level when the entered key is released, even if another key is depressed. The Data Available will return high to indicate acceptance of the new key after a normal debounce period; this two key roll over is provided between any two switches.

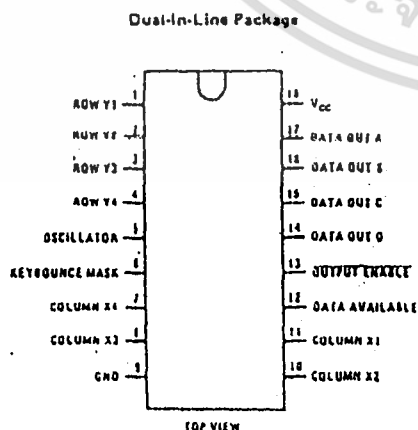
An internal register remembers the last key pressed even after the key is released. The TRI-STATE[®] outputs

provide for easy expansion and bus operation and are LPTTL compatible.

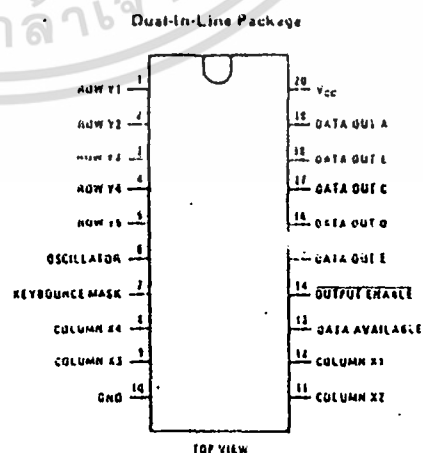
features

- 50 k Ω maximum switch on resistance
- On or off chip clock
- On chip row pull-up devices
- 2 key roll-over
- Keybounce elimination with single capacitor
- Last key register at outputs
- TRI-STATE outputs LPTTL compatible
- Wide supply range 3V to 15V
- Low power consumption

connection diagrams



Order Number MM54C922N
or MM74C922N
See Package 20



Order Number MM54C923N
or MM74C923N
See Package 20A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

absolute maximum ratings

Voltage at Any Pin	V _{CC} - 0.3V to V _{CC} + 0.3V	Package Dissipation	500 mW
Operating Temperature Range		Operating V _{CC} Range	3V to 15V
MM54C922, MM54C923	-55°C to +125°C	V _{CC}	18V
MM74C922, MM74C923	-40°C to +85°C	Lead Temperature (Soldering, 10 sec. units)	300°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C		

dc electrical characteristics Min./max limits apply across temperature range unless otherwise noted

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
CMOS TO CMOS						
V _{T+}	Positive-Going Threshold Voltage at Osc and KBM Inputs	V _{CC} = 5V, I _{IN} ≥ 0.7 mA V _{CC} = 10V, I _{IN} ≥ 1.4 mA V _{CC} = 15V, I _{IN} ≥ 2.1 mA	3 6 9	3.6 6.8 10	4.3 8.6 12.9	V
V _{T-}	Negative-Going Threshold Voltage at Osc and KBM Inputs	V _{CC} = 5V, I _{IN} ≥ 0.7 mA V _{CC} = 10V, I _{IN} ≥ 1.4 mA V _{CC} = 15V, I _{IN} ≥ 2.1 mA	0.7 1.4 2.1	1.4 3.2 5	2 4 6	V
V _{IN(1)}	Logical "1" Input Voltage, Except Osc and KBM Inputs	V _{CC} = 5V V _{CC} = 10V V _{CC} = 15V	3.5 8 12.5	4.5 9 13.5		V
V _{IN(0)}	Logical "0" Input Voltage, Except Osc and KBM Inputs	V _{CC} = 5V V _{CC} = 10V V _{CC} = 15V		0.5 1 1.5	1.5 2 2.5	V
I _p	Row Pull-Up Current at Y1, Y2, Y3, Y4 and Y5 Inputs	V _{CC} = 5V, V _{IN} = 0.1 V _{CC} V _{CC} = 10V V _{CC} = 15V		-2 -10 -22	5 20 45	μA
V _{OUT(1)}	Logical "1" Output Voltage	V _{CC} = 5V, I _O = -10μA V _{CC} = 10V, I _O = -10μA V _{CC} = 15V, I _O = -10μA	4.5 9 13.5			V
V _{OUT(0)}	Logical "0" Output Voltage	V _{CC} = 5V, I _O = 10μA V _{CC} = 10V, I _O = 10μA V _{CC} = 15V, I _O = 10μA			0.5 1 1.5	V
R _{on}	Column "ON" Resistance at X1, X2, X3 and X4 Outputs	V _{CC} = 5V, V _O = 0.5V V _{CC} = 10V, V _O = 1V V _{CC} = 15V, V _O = 1.5V		500 300 200	1400 700 500	Ω
I _{CC}	Supply Current	V _{CC} = 5V, Osc at 0V V _{CC} = 10V V _{CC} = 15V		0.55 1.1 1.7	1.1 1.9 2.6	mA
I _{IN(1)}	Logical "1" Input Current at Output Enable	V _{CC} = 15V, V _{IN} = 15V		0.005	1.0	μA
I _{IN(0)}	Logical "0" Input Current at Output Enable	V _{CC} = 15V, V _{IN} = 0V	1.0	-0.005		μA
CMOS/LPTTL INTERFACE						
V _{IN(1)}	Logical "1" Input Voltage, Except Osc and KBM Inputs	54C, V _{CC} = 4.5V 74C, V _{CC} = 4.75V	V _{CC} / 5 V _{CC} / 5			V
V _{IN(0)}	Logical "0" Input Voltage, Except Osc and KBM Inputs	54C, V _{CC} = 4.5V 74C, V _{CC} = 4.75V			0.8 0.8	V
V _{OUT(1)}	Logical "1" Output Voltage	54C, V _{CC} = 4.5V, I _O = -360μA 74C, V _{CC} = 4.75V, I _O = -360μA	2.4 2.4			V
V _{OUT(0)}	Logical "0" Output Voltage	54C, V _{CC} = 4.5V, I _O = -360μA 74C, V _{CC} = 4.75V, I _O = -360μA			0.4 0.4	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dc electrical characteristics (con't)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OUTPUT DRIVE (See 54C/74C Family Characteristics Data Sheet)					
I _{SOURCE} Output Source Current (P-Channel)	V _{CC} = 5V, V _{OUT} = 0V, T _A = 25°C	-1.75	-3.3		mA
I _{SOURCE} Output Source Current (P-Channel)	V _{CC} = 10V, V _{OUT} = 0V, T _A = 25°C	-8	-15		mA
I _{SINK} Output Sink Current (N-Channel)	V _{CC} = 5V, V _{OUT} = V _{CC} , T _A = 25°C	1.75	3.6		mA
I _{SINK} Output Sink Current (N-Channel)	V _{CC} = 10V, V _{OUT} = V _{CC} , T _A = 25°C	8	16		mA

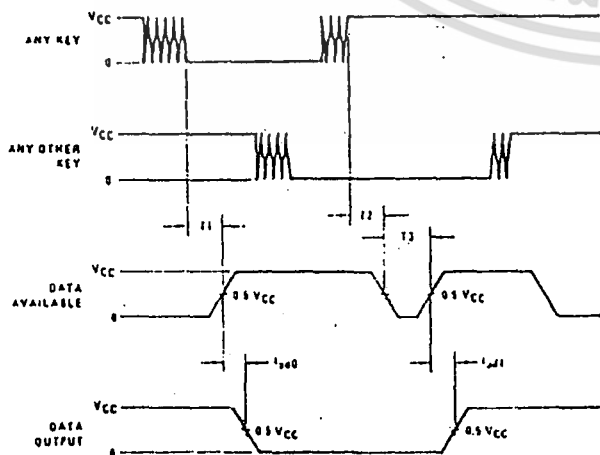
ac electrical characteristics T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t _{pd0} , t _{pd1} Propagation Delay Time to Logical "0" or Logical "1" from D.A.	C _L = 50 pF, (Figure 1) V _{CC} = 5V V _{CC} = 10V V _{CC} = 15V		60 35 25	150 80 60	nS
t _{OH} , t _{LH} Propagation Delay Time from Logical "0" or Logical "1" into High Impedance State	R _L = 10k, C _L = 5 pF, (Figure 2) V _{CC} = 5V R _L = 10k V _{CC} = 10V C _L = 10 pF V _{CC} = 15V		80 65 50	200 150 110	nS
t _{HO} , t _{HL} Propagation Delay Time from High Impedance State to a Logical "0" or Logical "1"	R _L = 10k, C _L = 50 pF, (Figure 2) V _{CC} = 5V R _L = 10k V _{CC} = 10V C _L = 50 pF V _{CC} = 15V		100 55 40	250 125 90	nS
C _{IN} Input Capacitance	Any Input, (Note 2)		5	7.5	pF
C _{OUT} TRI-STATE Output Capacitance	Any Output, (Note 2)		10		pF

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. Except for "Operating Temperature Range" they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: Capacitance is guaranteed by periodic testing.

switching time waveforms



T₁ = T₂ = RC, T₃ = 0.7 RC where R > 10k and C is external capacitor at KBM input.

FIGURE 1

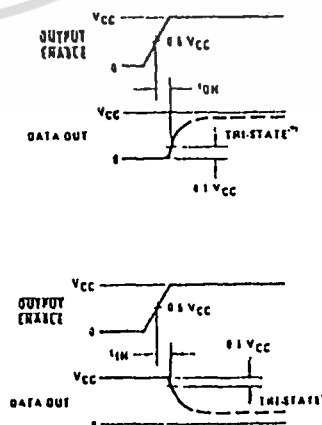
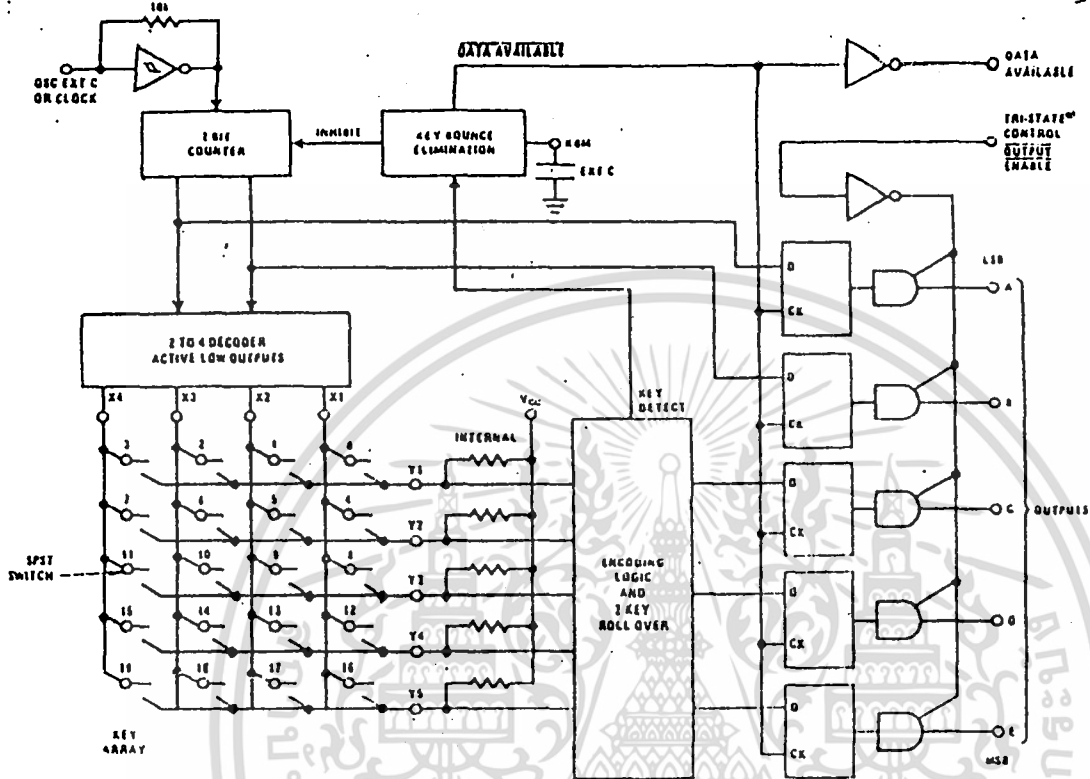


FIGURE 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

block diagram

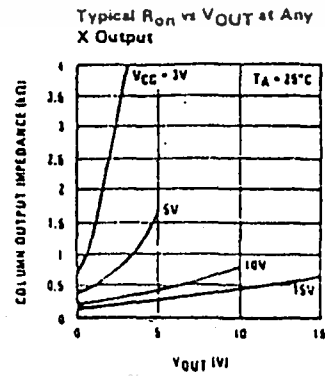
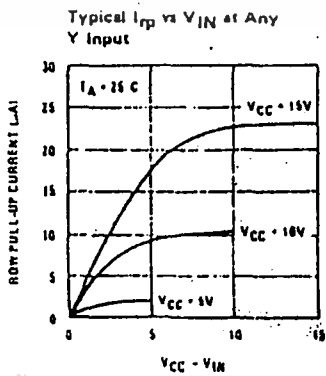


truth table

SWITCH POSITION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Y1 X1	Y1 X2	Y1 X3	Y1 X4	Y2 X1	Y2 X2	Y2 X3	Y2 X4	Y3 X1	Y3 X2	Y3 X3	Y3 X4	Y4 X1	Y4 X2	Y4 X3	Y4 X4	Y5 X1	Y5 X2	Y5 X3	Y5 X4
D	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
A	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
B	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
E*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

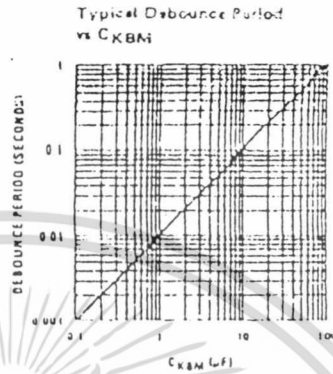
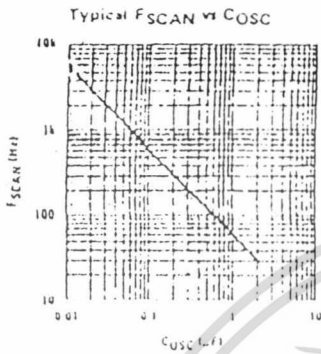
*Omit for MM54C922/MM74C922

typical performance characteristics



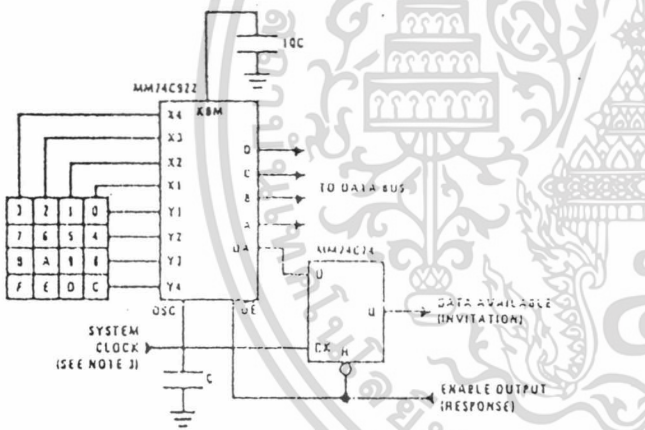
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

typical performance characteristics (con't)

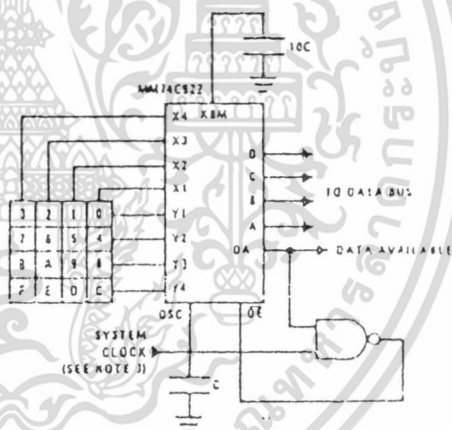


typical applications

Synchronous Handshake (MM74C922)

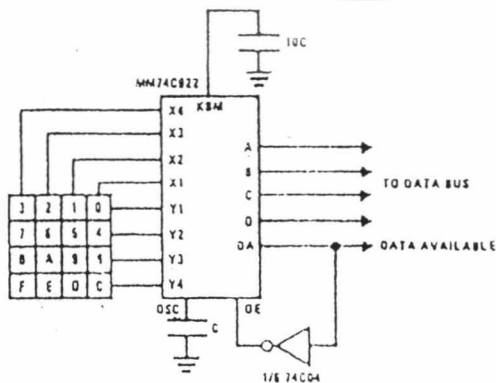


Synchronous Data Entry Onto Bus (MM74C922)



Outputs are enabled when valid entry is made and go into TRI-STATE when key is released.

Asynchronous Data Entry Onto Bus (MM74C922)



Outputs are in TRI-STATE until key is pressed, then data is placed on bus. When key is released, outputs return to TRI-STATE.

Keyboard Suppliers
Mini Key Series KL
Digitran Company
Pasadena, California
Computronics Engineering
7235 Hollywood Blvd
Hollywood, California 90046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Note 3: The keyboard may be synchronously scanned by omitting the capacitor at osc. and driving osc. directly if the system clock rate is lower than 10 kHz.

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUITS

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUITS

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for Switchmode power supply control. This device features:

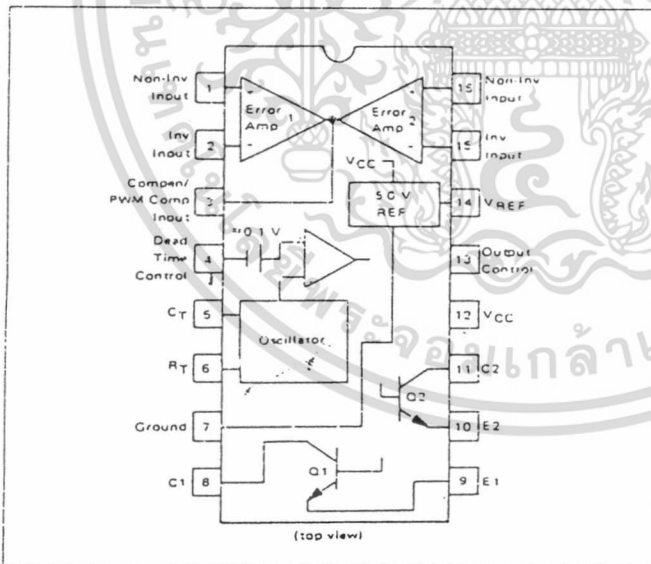
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout



J SUFFIX CERAMIC PACKAGE CASE 620



N SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 648



The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
TL494CN	0° to +70°C	Plastic DIP
TL494CJ		Ceramic DIP
TL494IN	-25° to +85°C	Plastic DIP
TL494IJ		Ceramic DIP
TL494MJ	-55° to +125°C	Ceramic DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

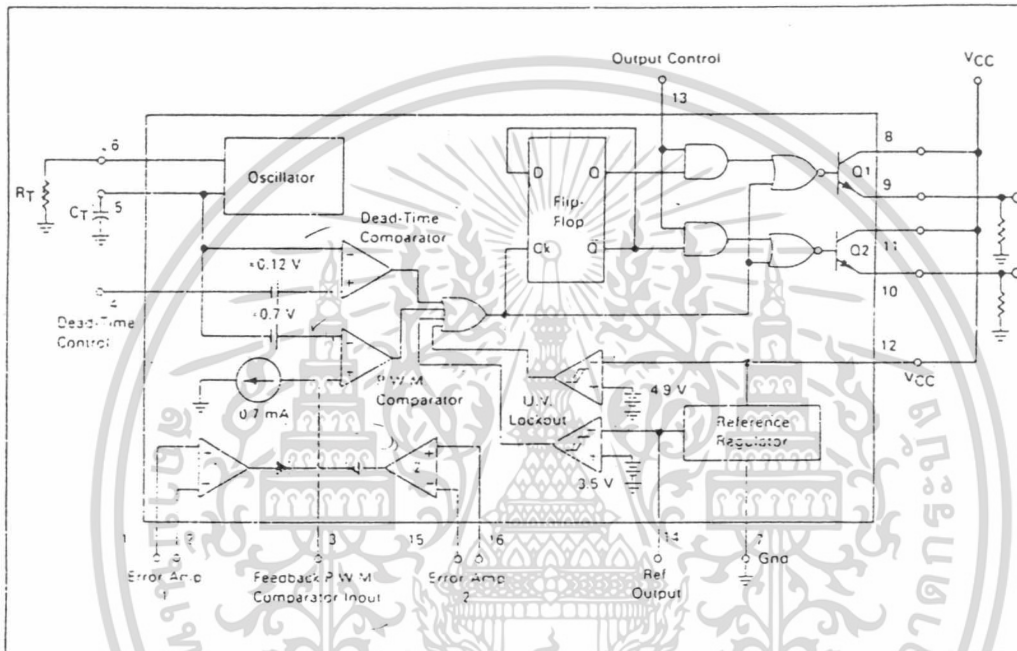
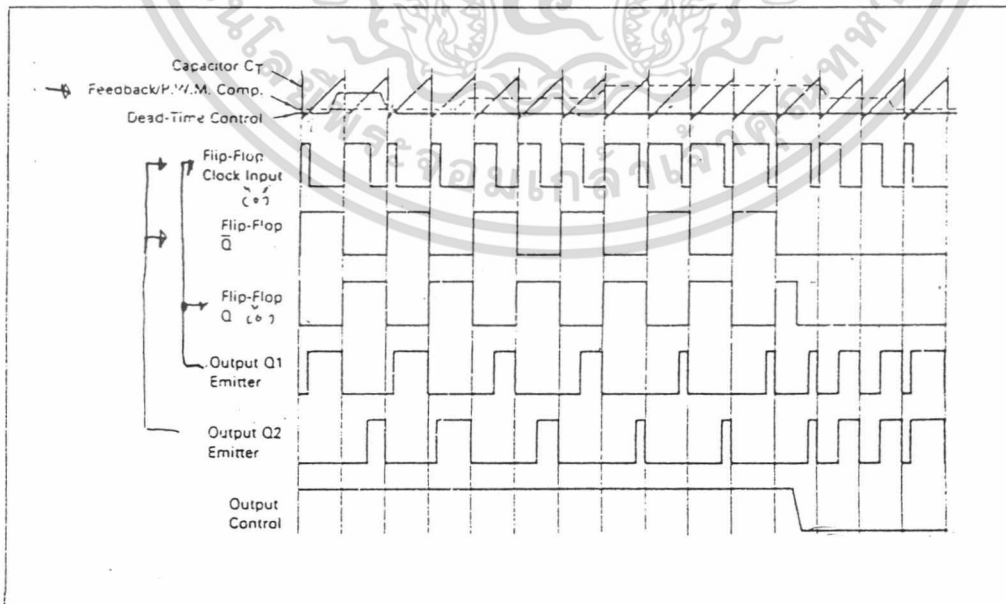


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 4.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signal. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead-time control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead-time control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the dead time control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 to 3.5 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to ($V_{CC} - 2$ V), and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead-time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and initiates the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 5.0\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

Input	Output Function	$f_{out} = f_{osc}$
Output Control Grounded	Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2	1
At V_{ref}	Push-pull operation	0.5

TL494

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	TL494M	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	42	42	42	V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	42	42	42	V
Collector Output Current (each transistor) (1)	I _{C1} , I _{C2}	500	500	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V _{IR}	-0.3 to 42	-0.3 to 42	-0.3 to 42	V
Power Dissipation (in T _A ≤ 45°C)	P _D	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T _J				°C
Plastic Package		125	125	—	
Ceramic Package		150	150	150	
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to 70	-25 to 85	-55 to 125	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}				°C
Plastic Package		-55 to 125	-55 to 125	—	
Ceramic Package		-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	

NOTE 1: Maximum thermal limits must be observed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	N Suffix Plastic Package	J Suffix Ceramic Package	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	80	100	°C/W
Derating Ambient Temperature	T _A	45	50	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Condition/Value	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage	V _{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V _{C1} , V _{C2}	—	30	40	V
Collector Output Current (each transistor)	I _{C1} , I _{C2}	—	—	200	mA
Amplifier Input Voltage	V _{in}	0.3	—	V _{CC} - 2.0	V
Current Into Feedback Terminal	I _b	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I _{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R _T	1.8	30	500	kΩ
Timing Capacitor	C _T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f _{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	

REFERENCE SECTION

Reference Voltage (I _O = 1.0 mA)	V _{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation (V _{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg _{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation (I _O = 1.0 mA to 10 mA)	Reg _{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V)	I _{SC}	15	35	75	15	35	75	mA

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$, $R_T = 12\ \text{k}\Omega$) unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494CJ			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OUTPUT SECTION								
Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(off)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0\text{ V}$)	$I_{E(off)}$	—	—	100	—	—	150	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter ($V_E = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{SAT(C)}$	—	1.1	1.3	—	1.1	1.5	V
Emitter-Follower ($V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$)	$V_{SAT(E)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} = 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	—	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns
Emitter-Follower (See Figure 14)		—	40	100	—	40	100	ns

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
ERROR AMPLIFIER SECTIONS					
Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	—	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	—	0.1	10	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	-0.3 to $V_{CC} - 2.0$	—	—	V
Open-Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	f_c	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg.
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$)	PSRR	—	100	—	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_O	0.3	0.7	—	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O^+}	2.0	4.0	—	mA

NOTE 2: Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperatures as possible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ unless otherwise noted.)
 For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Threshold Voltage (Zero duty cycle)	V _{TH}	—	3.5	4.5	V
Input Sink Current (V _{Pin 3} = 0.7 V)	I _I	0.3	0.7	—	mA
DEAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Bias Current (Pin 4) (V _{Pin 4} = 0 V, T _A = 25°C)	I _{IB (DT)}	—	-2.0	-10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ) (V _{Pin 4} = 0 V, C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	DC _{max}	45	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V _{TH}	0	2.8	3.3	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	f _{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* (C _T = 0.001 μF, R _T = 30 kΩ)	σ _{fosc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage (V _{CC} = 7.0 V to 40 V, T _A = 25°C)	Δf _{osc} (ΔV)	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature (ΔT _A = T _{low} to T _{high}) (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ)	Δf _{osc} (ΔT)	—	—	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V _{CC} Increasing, I _{ref} = 1.0 mA)	V _{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V _{ref} , All Other Inputs and Outputs Open) (V _{CC} = 15 V) (V _{CC} = 40 V)	I _{CC}	—	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current (V _{Pin 4} = 2.0 V) (See Figure 12) (C _T = 0.01 μF, R _T = 12 kΩ, V _{CC} = 15 V)	—	—	7.0	—	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula...

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

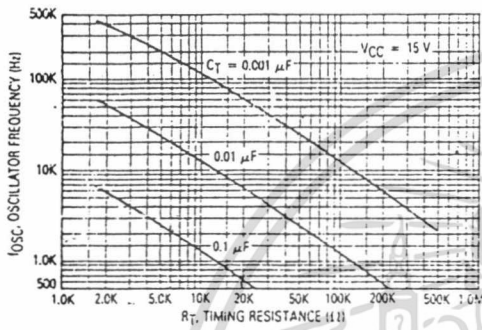


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

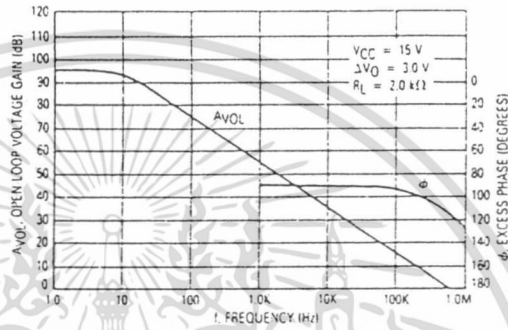


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

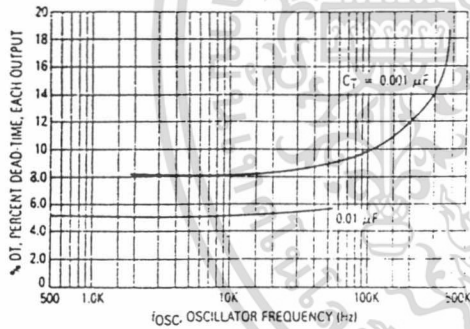


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

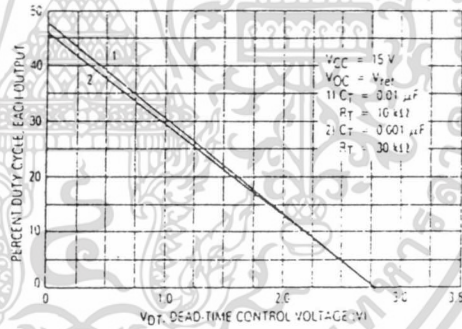


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

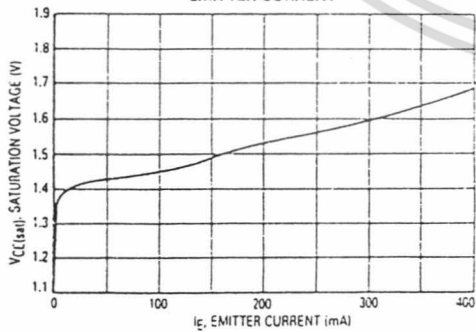
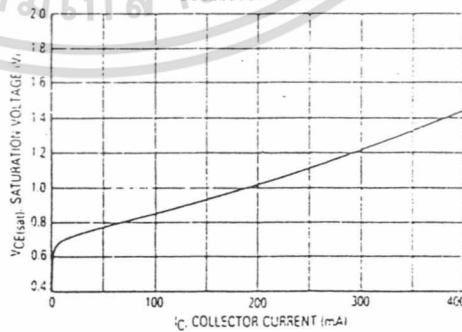


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 10 — STANDBY SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE

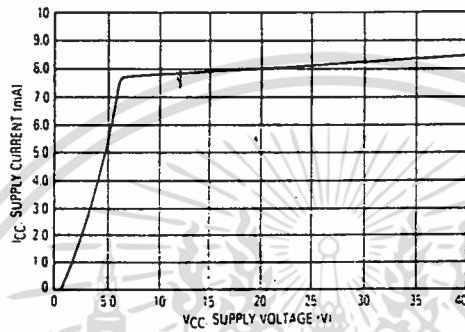


FIGURE 11 — ERROR AMPLIFIER CHARACTERISTICS

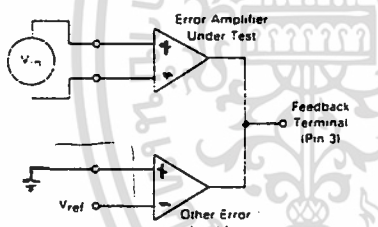


FIGURE 12 — DEAD-TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT

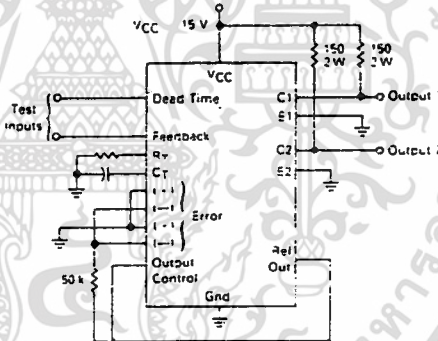


FIGURE 13 — COMMON-EMITTER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

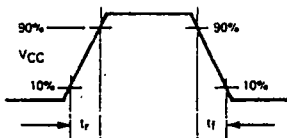
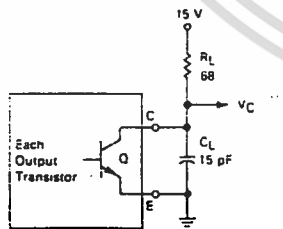
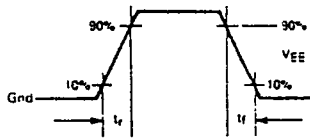
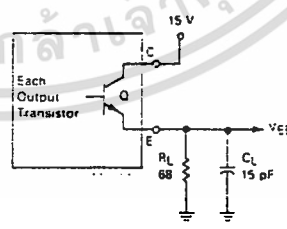


FIGURE 14 — EMITTER-FOLLOWER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494

FIGURE 15 — ERROR-AMPLIFIER SENSING TECHNIQUES

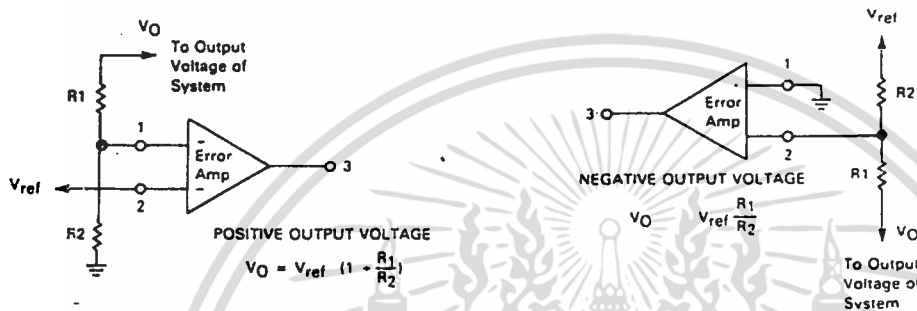


FIGURE 16 — DEAD-TIME CONTROL CIRCUIT

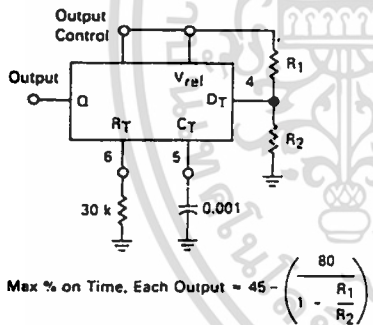


FIGURE 17 — SOFT-START CIRCUIT

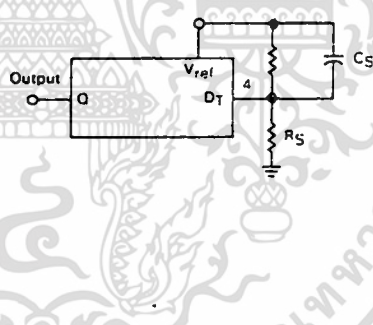


FIGURE 18 — OUTPUT CONNECTIONS FOR SINGLE-ENDED AND PUSH-PULL CONFIGURATIONS*

