สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา

HEMATOCRIT CENTRIFUGE

โดย

นายวัฒนชัย เพ็ญอัมพรกุล

นายวัลลพ สกุลอิ่มทรัพย์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 46265
วัน, เดือน, ปี..... 21 ธ.ค. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา

HEMATOCRIT CENTRIFUGE

โดย

นายวัฒนชัย เพ็ญอัมพรกุล 42015193

นายวัลลพ สกุลอิ่มทรัพย์ 42015234

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.กิติพล ชิตสกุล

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา

ผู้จัดทำ

1. นายวัฒนชัย เพ็ญอัมพรกุล 42015193
2. นายวัลลพ สกุลอิ่มทรัพย์ 42015234

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. กิตติพล ชิตสกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา

Hematocrit Centrifuge

นายวัฒนชัย	เพ็ญอัมพรกุล	42015193	3R/1
นายวัลลพ	สกุลอิ่มทรัพย์	42015234	3R/2

โครงงานนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบได้

.....

(ดร. กิติพล ชิตสกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา

นายวัฒนชัย เพ็ญอัมพรกุล
นายวัลลพ สกุลอิ่มทรัพย์
ดร.กิติพล ชิตสกุล (อาจารย์ที่ปรึกษา)
ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา ซึ่งเป็นเครื่องมือทางการแพทย์ชนิดหนึ่ง มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ มอเตอร์ความเร็วสูงและชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่สามารถเลือกความเร็วได้ตามต้องการคือ 3,000 รอบต่อนาทีใช้สำหรับปั่นให้เลือดตกตะกอน และ 12,000 รอบต่อนาทีใช้สำหรับปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา ซึ่งจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์, วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอะนาล็อก, วงจร PWM และวงจรสับไฟ (Shopper circuit)

เป็นการนำเอาหลักการของแรงหนีศูนย์กลางมาใช้ในการแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาโดยใช้มอเตอร์ความเร็วสูง ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89S8252 มาเป็นตัวควบคุมระบบของเครื่องปั่นฯ ได้แก่ควบคุมชุดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอะนาล็อก ให้ส่งเอาท์พุทไปคอนโทรลชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามค่าความเร็วที่ต้องการ และมีชุดป้อนกลับที่จะทำการป้อนกลับค่าความเร็วมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง เพื่อที่จะควบคุมให้ความเร็วของมอเตอร์นั้นคงที่ นอกจากนี้ยังมีชุดระบบความปลอดภัยที่ป้องกันไม่ให้เครื่องทำงานก่อนการปิดฝาเครื่อง และป้องกันการเปิดฝาเครื่องก่อนที่เครื่องจะหยุดทำงาน และยังมีชุดแสดงผลทางจอ แอลซีดีไว้แสดงรายการต่าง ๆ ของเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEMATOCRIT CENTRIFUGE

Mr.Wallop Sakulimsup

Mr.Wattanachai Penumpornkul

Dr. Kitiphol Chitsakul (Advisor)

2nd Semester Academic year 2001

Abstract

This thesis presents the development of a Hematocrit Centrifuge, which is a medical apparatus. This apparatus consists of a universal motor and a control circuit for stirring the blood filled tubes at variable speed of 3,000 rpm for Centrifuge and 12,000 rpm for Hematocrit. It is a study of Micro controller, Digital to Analog circuit, PWM circuit and Shopper circuit.

We use principle of centrifugal forces in order to separate red blood from plasma by using high-speed motor. We use a micro controller family MCS-51, the AT89S8252, to control the system such as digital-to-analog converter (DAC), a universal motor and the feedback part to stabilize the speed corresponding to a set reference value. In addition, the unit is equipped with protection system such as the sensor of the opening of the cover before starting the machine and the lock of the cover during the motor functions. A LCD display is also included for monitoring the menu function.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ทางผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กิติพล ชิตสกุล ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ขั้นตอนในการทำงาน รวมทั้งอาจารย์ในภาควิชา นอกภาควิชาทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ขอขอบคุณหัวหน้าแผนกเวชศาสตร์ชันสูตร โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องข้อมูลตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ได้บริจาคเพื่อการศึกษา ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

Abstract II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน 1

1.2 โครงสร้างของโครงงาน 1

1.3 โครงสร้างของรายงาน 2

บทที่ 2 อุปกรณ์ขับเคลื่อน 3

2.1 ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor) 3

2.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 3

2.1.2 การทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 5

2.1.3 การกลับทางหมุน 5

บทที่ 3 การออกแบบภาคขับมอเตอร์ 6

3.1 ทรานซิสเตอร์กำลัง 6

3.1.1 การเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง 6

3.1.2 คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์กำลัง 6

3.1.3 คำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์ 7

3.1.4 ความสัมพันธ์กับโหลดความเหนี่ยวนำ 8

3.1.5 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัว 8

3.1.6 เทคนิคการขับเบสสำหรับทรานซิสเตอร์ 10

3.1.7 ปรากฏการณ์ Secondary Breakdown ของทรานซิสเตอร์ 14

3.2 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซี 19

3.2.1 ชนิดของวงจรสับไฟฟ้า 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การควบคุมภาคขับมอเตอร์ 24
4.1 พัลส์วิดมอดดูเลชั่น (Pulse Width Modulation : PWM) 24
4.1.1 ลักษณะของ PWM โดยทั่วไป 24
4.1.2 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM 25
4.1.3 การทำงานของไอซี 26
4.1.4 การใช้ IC TL494 ร่วมกับทรานซิสเตอร์ภายนอก 28
4.2 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์ 29
4.2.1 การออกแบบวงจร 33
4.2.2 ลำดับขั้นในการออกแบบ 33
บทที่ 5 การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 35
5.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 36
5.2 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 38
5.3 ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 41
5.3.1 การทำงานเป็นไทเมอร์ 41
5.3.2 การทำงานเป็นเคาน์เตอร์ 41
5.3.3 รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1 42
5.3.4 โหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1 45
5.4 อินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 47
5.4.1 การจัดการอินเตอร์รัปต์ 47
5.4.2 การเขียนโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัปต์ 47
5.4.3 รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการบริการอินเตอร์รัปต์ 48
5.4.4 แหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ 50
5.4.5 ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์ 50
5.5 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD Module) 51
5.5.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD 51
5.5.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD 51
5.5.3 โมดูล LCD ขนาด 24 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 24x2) 52
5.5.4 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD 53
5.5.5 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD 56
5.5.6 จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุทด้วยอุปกรณ์ระบบบัส I^2C 58
5.6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C 58
5.6.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C 58
5.6.3 หลักการของบัส I^2C 59
5.6.4 สภาวะที่เกิดขึ้นบนบัส I^2C 60
5.6.5 การทำงานบนบัส I^2C 61
5.6.6 อุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อแบบบัส I^2C 63
5.6.7 การต่ออุปกรณ์ระบบบัส I^2C กับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 63
5.6.8 การเขียนโปรแกรมติดต่อบัส I^2C 65
5.6.9 การขยายจำนวนพอร์ตอินพุทเอาท์พุทด้วยไอซี PCF8574A 66
5.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอกแบบ R-2R 69
5.7.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวงจร DAC แบบ R-2R 69
5.7.2 การต่อวงจร DAC แบบ R-2R เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 71
บทที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 72
6.1 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงาน 73
6.2 ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน และค่าการทำงานตามการใช้งาน 75
6.3 ขั้นตอนการทำงานของโหมดที่ได้เลือกไว้ 76
6.4 ขั้นตอนการจบการทำงาน 79
บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง 81
7.1 การทดลองภาคควบคุมการขับมอเตอร์ 81
7.2 การทดลองภาคขับมอเตอร์ 83
7.3 การทดลองชุดตรวจจับกระแสเกิน 85
7.4 การทดลองวัดแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ เทียบกับความเร็วรอบที่ได้ 85
7.5 การทดลองปั่นเลือดจริงของเครื่องที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องที่โรงพยาบาลใช้อยู่ 89
บทที่ 8 บทสรุป 93
บรรณานุกรม 95
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสม่า 2
รูปที่ 2.1 ลักษณะของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 3
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 4
รูปที่ 2.4 การทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ 5
รูปที่ 2.5 การกลับทางหมุน 5
รูปที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ 7
รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นของทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง 8
รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันกับกระแสของทรานซิสเตอร์เมื่อขับโหลดความเหนี่ยวนำ 8
รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัว 9
รูปที่ 3.5 วงจรขับเบสโดยใช้หม้อแปลง 11
รูปที่ 3.6 วงจรขับโดยใช้หม้อแปลงเป็นตัวเชื่อมต่อ โดยสร้างการขับเบสย้อนกลับ 12
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรขับเบสโดยใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกระบบทางไฟฟ้า 13
รูปที่ 3.8 วงจรขับเบสโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวเชื่อมต่อโดยตรง 14
รูปที่ 3.9 แสดง SOA ของทรานซิสเตอร์ 14
รูปที่ 3.10 การป้องกัน Secondary breakdown โดยการต่อ JFET อนุกรมกับเบส 15
รูปที่ 3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ 16
รูปที่ 3.12 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA 17
รูปที่ 3.13 วงจรสนับเบอร์ต่อคร่อมทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง 17
รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการปิดเปิดไฟฟ้าดีซีเป็นจังหวะ 20
รูปที่ 3.15 วงจรสับไฟฟ้าลดค่าลง 21
รูปที่ 3.16 วงจรสับไฟฟ้ายกค่าขึ้น 23
รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทของพัลส์วิดมอดดูเลชั่น 24
รูปที่ 4.2 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาไอซี TL494 25
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_T ,C_T ในการกำหนดความถี่ 26
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นลักษณะการทำงาน IC#TL494 27
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุทของ TL494 28
รูปที่ 4.6 การใช้ TL494 กับทรานซิสเตอร์ภายนอก 28

เอกสารนี้ใช้ในการสืบค้นได้สำหรับเพื่อใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 การทำงานของวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์ 30
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ได้จากวงจรอินทิเกรเตอร์ 32
รูปที่ 4.9 การลดอัตราขยายของวงจร 32
รูปที่ 5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM 35
รูปที่ 5.1 รูปแบบของการเชื่อมต่อของ SPI อย่างง่าย 37
รูปที่ 5.2 การจัดขามาตราฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 40
รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD แบบอักขระ 51
รูปที่ 5.4 ผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนระบบบัส I^2C 58
รูปที่ 5.5 ไดอะแกรมเวลาแสดงสถานะต่าง ๆ ในบัส I^2C 61
รูปที่ 5.6 รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเดรสที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต 62
รูปที่ 5.7 วงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 กับอุปกรณ์ระบบบัส I^2C 64
รูปที่ 5.8 การจัดขาของไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุท PCF8574/PCF8574A 67
รูปที่ 5.9 วงจรภายในขาพอร์ตของไอซี PCF8574/PCF8574A 68
รูปที่ 5.10 พื้นฐานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอกแบบ R-2R 70
รูปที่ 5.11 วงจร DAC แบบ R-2R ที่มีการใช้ออปแอมป์ในการแปลงค่ากระแสเป็นแรงดัน 70
รูปที่ 5.12 การต่อวงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์ โดยใช้ I^2C ขยายพอร์ต 71
รูปที่ 6.1 โฟลวชาร์ตแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 73
รูปที่ 6.2 โฟลวชาร์ตของขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงาน 74
รูปที่ 6.3 โฟลวชาร์ตของขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน 75
รูปที่ 6.4 โฟลวชาร์ตขั้นตอนการทำงานตามโหมดที่เลือกไว้ 77
รูปที่ 6.5 โฟลวชาร์ตโปรแกรมย่อยและโปรแกรมอินเตอร์รัปต์ของตัวตั้งเวลา 78
รูปที่ 6.6 โฟลวชาร์ตโปรแกรมย่อยการตรวจสอบความเร็วรอบ 79
รูปที่ 6.7 โฟลวชาร์ตขั้นตอนการจบการทำงาน 80
รูปที่ 7.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM 81
รูปที่ 7.2 รูปสัญญาณที่ขา 5 ของ TL494 82
รูปที่ 7.3 สัญญาณที่ Output ของ TL494 82
รูปที่ 7.4 วงจรภาคควบคุมและภาคขับมอเตอร์ 84
รูปที่ 7.5 รูปสัญญาณที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ 85
รูปที่ 7.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงดันของมอเตอร์ 86
รูปที่ 7.7 กราฟความสัมพันธ์การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 3,500 rpm 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 12,000 rpm 88
รูปที่ 7.9 แสดงหลอดเลือดก่อนทำการปั่น 89
รูปที่ 7.10 แสดงหลอดเลือดหลังทำการปั่น 89
รูปที่ 7.11 แสดงการอ่านค่าหลอดเลือดที่ถูกปั่นโดยเครื่องของโรงพยาบาล 90
รูปที่ 7.12 แสดงการอ่านค่าหลอดเลือดที่ถูกปั่นโดยเครื่องที่สร้างขึ้น 90
รูปที่ 7.13 แสดงรูปชิ้นงานจริงของวงจรส่วนควบคุมและขับมอเตอร์ 91
รูปที่ 7.14 แสดงรูปภายนอกของตัวเครื่อง 91
รูปที่ 7.15 หัวหน้าแผนกเวชศาสตร์ชันสูตรและผู้จัดทำ 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

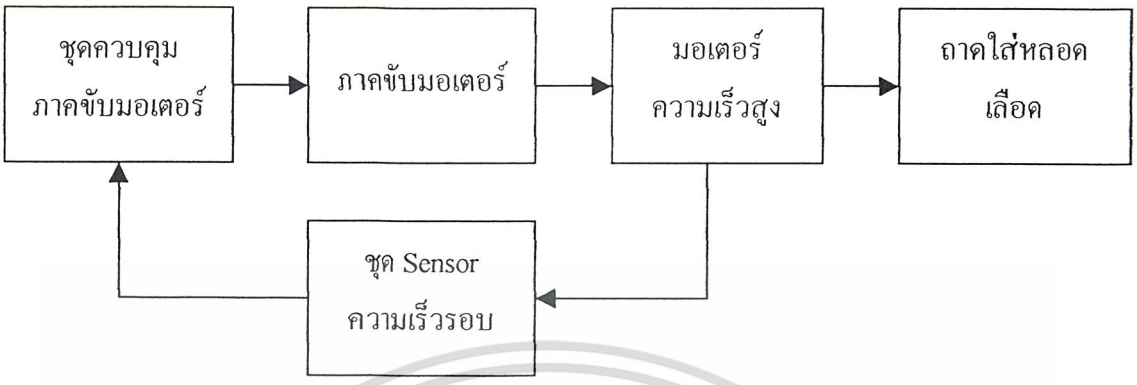
เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา เป็นเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่จำเป็นในการตรวจวินิจฉัย มีราคาค่อนข้างสูง เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้องเสียงบประมาณเพิ่มขึ้นทั้งที่ตัวเครื่องนั้นก็ไม่ได้มีอะไรยุ่งยากมากนัก เพียงแต่ใช้การปั่นด้วยความเร็วสูงบวกกับเวลาที่เหมาะสมในการปั่นแต่ละครั้ง จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้ผู้จัดทำรู้สึกว่าเราควรจะสร้างขึ้นใช้เองได้ จึงจัดทำโครงงานนี้ขึ้น และมีความคิดอีกว่า ที่จะทำเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา ซึ่งใช้ความเร็วสูงรวมเป็นเครื่องเดียวกับเครื่องปั่นให้เลือดตกตะกอนและเป็นเครื่องปั่นยูรีนด้วย ซึ่งใช้ความเร็วต่ำกว่า จะทำให้สามารถประหยัดงบประมาณไปได้อีก เพราะถ้าโครงงานนี้สำเร็จและมีความเที่ยงตรงสูงพอ เราก็สามารถนำมาใช้งานจริงได้ แล้วยังเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องมือชนิดอื่น ๆ ได้อีกด้วย

จากการศึกษาตัวเครื่องที่ใช้งานในปัจจุบันยังเป็นระบบธรรมดาที่ยังไม่มีการนำเอาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์รวมทั้งระบบคอมพิวเตอร์มาควบคุมการทำงาน ทำให้ผู้จัดทำโครงงานนี้ได้วางแนวทางไว้ว่า ในช่วงแรกจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้ได้ โดยใช้หลักการควบคุมด้วย PWM สามารถตั้งเวลาได้ตามต้องการ หลังจากนั้นก็จะทำการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการทำงานทั้งความเร็วและเวลาพร้อมทั้งระบบเซ็นเซอร์ ต่าง ๆ อัตโนมัติ โดยจะแสดงผลออกทางจอแอลซีดี

1.2 โครงสร้างของโครงงาน

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา ใช้หลักการของแรงหนีศูนย์กลาง เมื่อวางหลอดบรรจุเลือดตามแนวรัศมีของจานกลมที่หมุนรอบจุดศูนย์กลาง เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมาขนาดเล็กจะใช้มอเตอร์ความเร็วสูงเป็นต้นกำลัง ให้จานหมุนมีความเร็วคงที่ในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งการควบคุมความเร็วนั้นจะใช้หลักการของ PWM มาช่วย โดยแรงดันอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมให้ภาค PWM ทำงานเพื่อจ่ายพัลส์ไปให้ภาคขับมอเตอร์ ได้จากการสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอกโดยใช้ I^2C เป็นตัวขยายพอร์ตและต่อร่วมกับวงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์ ซึ่งขั้นตอนการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้เบอร์ AT89S8252 เนื่องจากมีคุณสมบัติในการใช้งานที่สะดวกในการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความภายในตัว Chip IC ตามหลักการเบื้องต้นนี้ เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสม่าจะมีโครงสร้างพื้นฐานตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา

1.3 โครงสร้างของรายงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและทดลองตลอดปีการศึกษา เพื่อออกแบบสร้างเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดออกจากพลาสมา ซึ่งเนื้อหานั้นจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ แยกเป็นบท ๆ ไปดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและลักษณะของโครงงาน

บทที่ 2 กล่าวถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนถาดใส่หลอดเลือดที่ความเร็วสูง

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบภาคขับมอเตอร์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวขับ

บทที่ 4 กล่าวถึง การสร้างวงจรควบคุมภาคขับมอเตอร์ โดยใช้หลักการ PWM

บทที่ 5 กล่าวถึง การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 6 กล่าวถึง ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 7 กล่าวถึง การทดลองและผลที่ได้จากการทดลอง

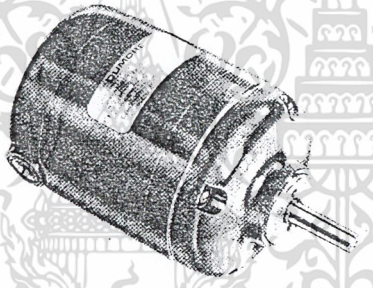
บทที่ 8 บทสรุปและวิจารณ์เกี่ยวกับการทดลองของโครงงานนี้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
อุปกรณ์ขับเคลื่อน

2.1 ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)

ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ (ชนิด 1 เฟส) ฉะนั้นบางแห่งก็เรียกว่ามอเตอร์ กระแสพันธุ์ทางมอเตอร์ชนิดนี้จะมีขนาดตั้งแต่ $\frac{1}{200}$ กำลังม้าถึง $\frac{1}{3}$ กำลังม้า คุณสมบัติพิเศษของมอเตอร์ชนิดนี้ก็คือแรงเริ่มหมุนสูง (หมุนได้ตั้งแต่ 3000 รอบต่อนาทีขึ้นไป) และยังสามารถลดความเร็วได้ ดังนั้นจึงมักนำไป สร้างเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น เครื่องบดอาหารไฟฟ้า กรรไกรตัดผมไฟฟ้า มีดโกนหนวดไฟฟ้า เครื่องนวดไฟฟ้า ปั๊มน้ำขนาดเล็ก ๆ สว่านเจาะโลหะและหมุนจักรเย็บผ้าเป็นต้น ดูรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

2.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์มีดังนี้

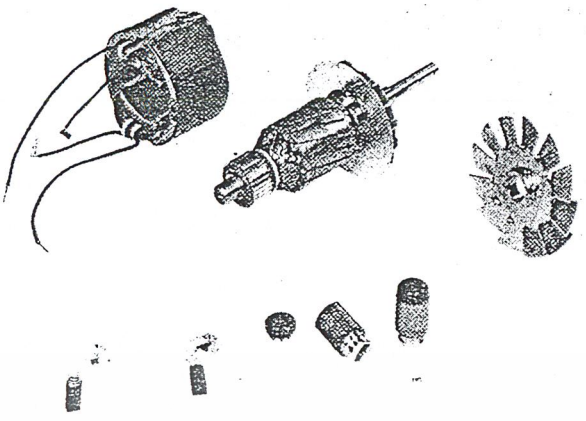
1. โครง (Frame)
2. ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Core)
3. อาเมเจอร์ (Armature)
4. ฝาครอบ (End plate)
5. แปรงถ่าน (Brush)

โครง (Frame) สร้างด้วยเหล็กเหนียว (Steel) อลูมิเนียม (Aluminum) หรือเหล็กหล่อ (Cast Iron) ทำหน้าที่สำหรับยึดขั้วสนามแม่เหล็ก

ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Core) ประกอบด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ (Laminated Iron Core) แล้วนำมาย้ำให้เป็นปึกติดกันหมดและมักสร้างให้มี 2 ขั้ว เพื่อต้องการให้มีรอบหมุนเร็ว ดูรูปที่ 2.3

อาเมเจอร์ (Armature) มีลักษณะคล้ายกันกับอาเมเจอร์ขนาดเล็ก ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดูรูปที่ 2.2

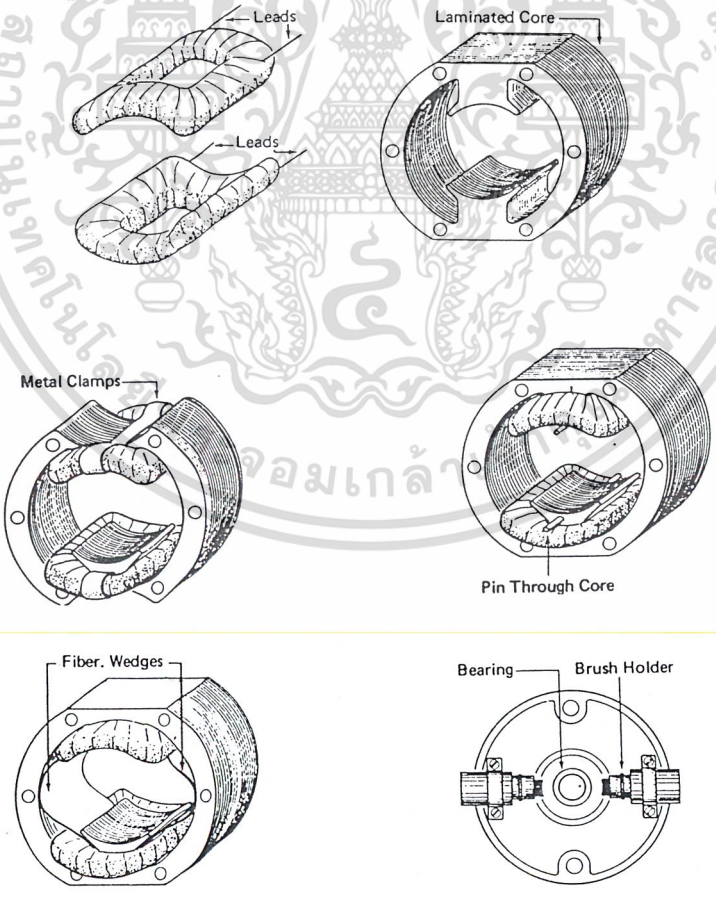
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

ฝาครอบ (End plate) คือ ฝาครอบหัวท้ายของมอเตอร์ ดูรูปที่ 2.1

แปรงถ่าน (Brush) แปรงถ่านต้องพอดีกับซองถ่านอย่าให้หลวมหรือแน่นจนเกินไป แปรงถ่านมีหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟ ดูรูปที่ 2.2 และ 2.3

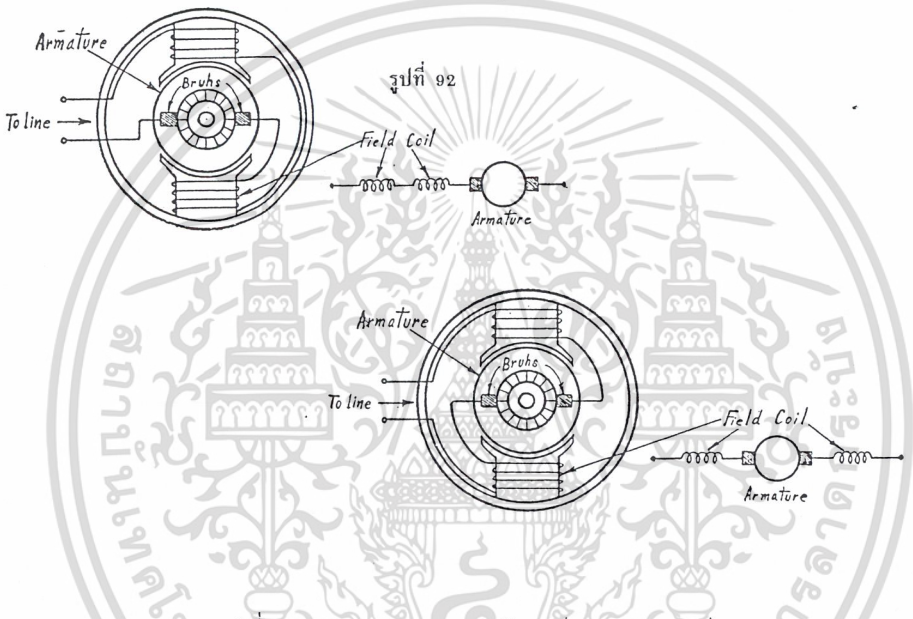


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

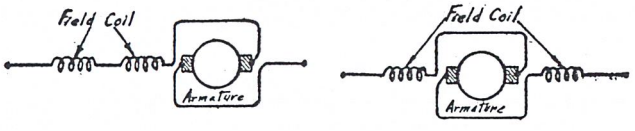
มอเตอร์แบบนี้อาเมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็ก (Fieldcoil) ต่ออันดับกัน ดังนั้นเมื่อเราสับสวิตช์ กระแสก็จะไหลผ่านทั้งทางอาเมเจอร์ และขดลวดสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ส่วนคือทางอาเมเจอร์ และขดลวดสนามแม่เหล็กมาผลักซึ่งกันและกัน อาเมเจอร์จึงเคลื่อนตัวหมุนไปได้ ดูรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์

2.1.3 การกลับทางหมุน

ให้เราปฏิบัติดังนี้ คือ ให้กลับที่ปลายขดลวดสนามแม่เหล็ก ที่จะต่อเข้ากับแปรงถ่านทั้ง 2 ข้างโดยไขว้กัน ดูรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกลับทางหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบภาคขับมอเตอร์

3.1 ทรานซิสเตอร์กำลัง

3.1.1 การเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง

พารามิเตอร์พื้นฐานของทรานซิสเตอร์สำหรับการออกแบบ CONVERTER คือ

1) ความสามารถในการทนแรงดันขณะเปิดวงจร
2) ความสามารถในการทนกระแสขณะปิดวงจร

พารามิเตอร์ทั้งสองจะขึ้นอยู่กับชนิดของ CONVERTER ด้วยอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์นั้นได้แก่ ทรานซิสเตอร์ และมอสเฟท ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองชนิดนั้นต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ในปัจจุบันทรานซิสเตอร์จะมีราคาที่ถูกกว่ามอสเฟท ในขณะที่มอสเฟทนั้นมีการใช้งานที่ง่ายกว่าทรานซิสเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบวงจรขับเกทไม่มีความซับซ้อนมากเกินไปเมื่อเทียบกับวงจรขับเบสของทรานซิสเตอร์ และอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญมากก็คือการทำงานของทรานซิสเตอร์นั้นถูกจำกัดด้วยความถี่คัทออฟ (Cut off) ของตัวมันเอง (ประมาณ 500 kHz) แต่มอสเฟทกลับสามารถทำงานได้ด้วยความถี่สูง ๆ ถึง 200 kHz ทีเดียว และแน่นอนว่าการทำงานที่ความถี่สูง ๆ ขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ย่อมมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นข้อดีในการลดขนาดของแหล่งจ่ายไฟตรงสวิตชิ่งในตัว

3.1.2 คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์กำลัง

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้กระแสในการขับเบสเพื่อควบคุมจำนวนการไหลของกระแสคอลเลคเตอร์ โดยจำนวนการไหลของกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ตามความสัมพันธ์

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \qquad (3.1)$$

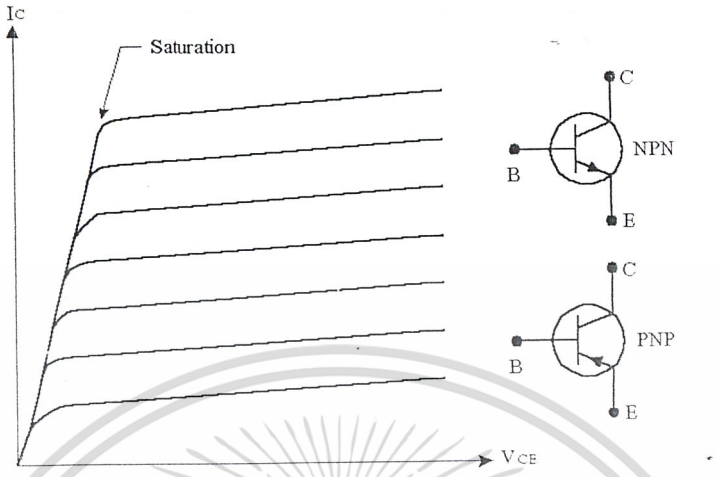
เมื่อ I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์, A

I_B คือ กระแสเบส, A

การทำงานของทรานซิสเตอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 2 สภาวะ

1) สภาวะเชิงเส้น (Linear) มักใช้ในงานด้านวงจรขยาย
2) สภาวะอิ่มตัว (Saturation) มักใช้ในงานเป็นสวิตช์ปิด – เปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

ในรูปที่ 3.1 แสดงกราฟลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสของทรานซิสเตอร์ จากกราฟแสดงถึงบริเวณอิ่มตัว ซึ่ง ณ ที่บริเวณนี้จะพบว่ากระแสเบสจำนวนหนึ่งสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจร (นำกระแสเต็มที่) เกิดกระแสคอลเลคเตอร์จำนวนมากไหลผ่านในขณะที่แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์มีค่าต่ำมาก

ในความเป็นจริงแล้วการนำทรานซิสเตอร์มาทำเป็นสวิตช์นั้นสามารถควบคุมได้ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ โดยใช้กระแสขับที่ขาเบสเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจร และถ้ากลับทิศทางของกระแสเบสก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร

3.1.3 คำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับทรานซิสเตอร์ (โหดชนิดความต้านทาน)

พิจารณารูป 3.2 เป็นรูปสัญญาณแรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ (V_{BE}) และคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของทรานซิสเตอร์ NPN โดยควบคุมที่ I_B

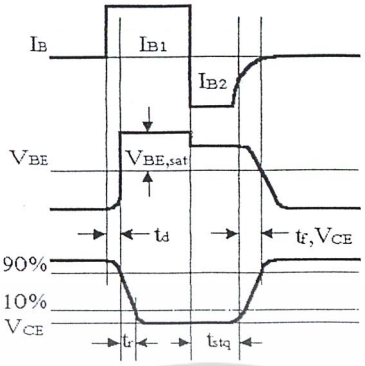
เวลาหน่วง (Delay Time, t_d) คือ ช่วงเวลาจากการจ่ายกระแสเบส I_{B1} ไปยังจุดที่ทำให้ V_{CE} ตกลงถึง 90% ของค่าแรงดันเริ่มต้น

เวลาขอบขาขึ้น (Rise Time, t_r) คือ ช่วงเวลาเมื่อ V_{CE} ตกลงถึง 10% ของค่าแรงดันเมื่อ 90%

เวลาสะสม (Storage Time, t_{stg}) คือ ช่วงเวลาเริ่มจากการกลับทิศทางของกระแส I_{B2} เป็นผลทำให้ขนาดของแรงดัน V_{CE} เพิ่มขึ้น 10% ของค่าแรงดันครั้งสุดท้ายที่ OFF

เวลาขอบขาลง (Fall Time, $t_{f,VCE}$) คือ ช่วงเวลาเมื่อแรงดัน V_{CE} ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10% จนถึง 90%

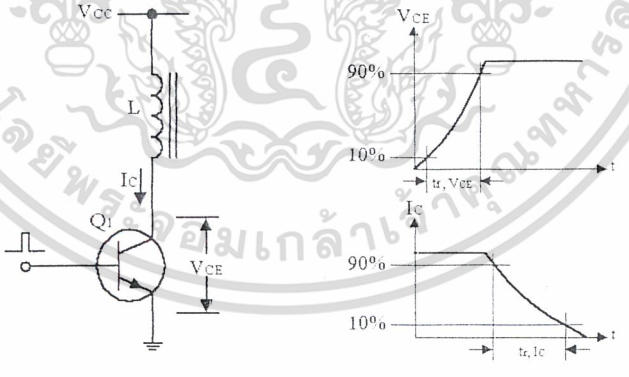
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นของทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง

3.1.4 ความสัมพันธ์กับโหลดความเหนี่ยวนำ (Inductive load)

จากที่กล่าวมาแล้วในเรื่องของคำจำกัดความต่าง ๆ ของช่วงเวลาในการสวิตชิ่งของทรานซิสเตอร์ในเทอมของแรงดัน V_{CE} เมื่อโหลดที่ใช้นั้นเป็นความต้านทาน อย่างไรก็ดี เมื่อนำทรานซิสเตอร์ไปขับโหลดที่เป็นความเหนี่ยวนำ รูปสัญญาณที่ได้นั้นย่อมแตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติของความเหนี่ยวนำที่ถึงแม้จะจ่ายแรงดันให้กับความเหนี่ยวนำแล้วก็ตาม กระแสก็ยังไม่สามารถไหลได้ในทันทีทันใด ดังนั้นในช่วงที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร เราจะพบว่าแรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายก่อนที่กระแสจะลดลงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันกับกระแสของทรานซิสเตอร์เมื่อขับโหลดความเหนี่ยวนำ

3.1.5 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัว

การอิ่มตัวและการเกิดช่วงเวลาสะสมจะมีผลทำให้ความเร็วในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ลดลง ดังนั้นวิธีหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งนั่นเอง

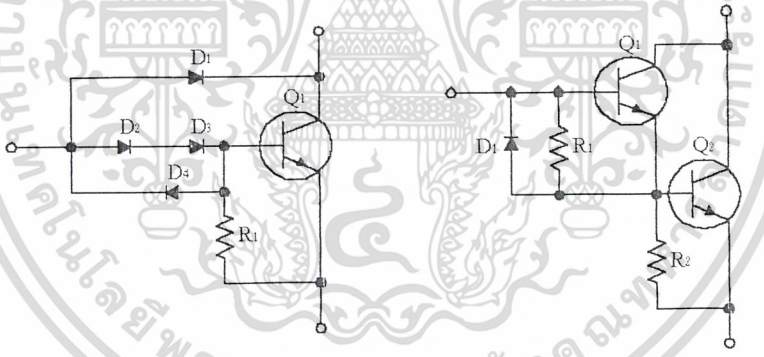
จากรูปที่ 3.4 (ก) แสดงการใช้ไดโอดป้องกันการอิ่มตัว (ANTISATURATION DIODES) หรือบางตำราเรียกว่าไดโอด BAKER CLAMP เมื่อทรานซิสเตอร์ปิดวงจรจะเห็นว่าที่ขาเบสนั้นมี

เอกสารนี้ย่อมเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด D_2 , D_3 ต่ออนุกรมอยู่ สมมติทุกตัวมีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสเท่ากับ 0.7 V ดังนั้น แรงดันที่ขาเบสจะต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันอินพุท 1.4 V แต่เนื่องจากที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์นั้นยังมีไดโอด D_1 ต่ออยู่อีกหนึ่งตัวก็จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสอีก 0.7V ทำให้แรงดันคอลเลคเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันอินพุท 0.7 V ด้วย เพราะฉะนั้นแรงดันที่คอลเลคเตอร์จะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาเบสเท่ากับ 1.4 – 0.7 = 0.7 V ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะที่ไม่มีโอกาสอิ่มตัวได้เลย

ไดโอดป้องกันการอิ่มตัวนี้ จำเป็นจะต้องใช้ชนิดที่มีความเร็วสูง เช่น ชนิด Fast recovery เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์นั้นมีความเร็วสูงตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป ไดโอด D_2 และ D_3 ควรมีแรงดัน Reverse blocking rating ต่ำ ๆ แต่สำหรับไดโอด D_1 จะต้องมีค่าแรงดันไม่ต่ำกว่า 2 V_{CE} โดยทั่วไปใช้ประมาณ 800 V PIV

ส่วนไดโอด D_4 เป็นไดโอดประเภท " Wrap – around " มีหน้าที่ดึงกระแสเบสของทรานซิสเตอร์เปิดวงจร โดยเป็นตัวคายประจุของค่าเก็บประจุระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ ทำให้ช่วงเวลาสะสมลดลง



(ก) (ข)

รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์อิ่มตัว

ก) ไดโอดป้องกันการอิ่มตัวของ Q_1

ข) การใช้วงจรดาร์ลิงตันป้องกัน Q_2 อิ่มตัว

สำหรับในรูป 3.4 (ข) แสดงการใช้เทคนิคของวงจรดาร์ลิงตัน (darlington) โดยมีหลักการทำงานคล้ายกับเทคนิคแรก คือ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเป็นตัวป้องกันมิให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 เกิดการอิ่มตัว แต่มีข้อแม้คือ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะต้องเปิดวงจรก่อนทรานซิสเตอร์ Q_2 ไดโอด D_1 มีหน้าที่ลดอิมพีแดนซ์ให้กับกระแสเบสย้อนกลับของ Q_2 เพื่อเปิดวงจร ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

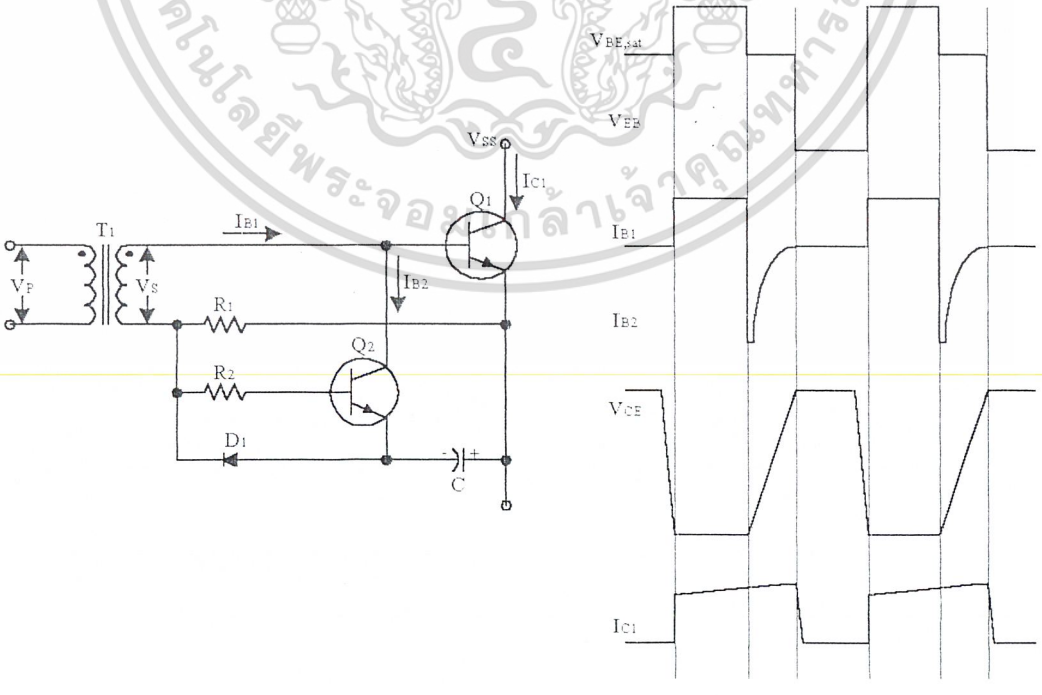
3.1.6 เทคนิคการขับเบสสำหรับทรานซิสเตอร์

วงจรขับกระแสคงที่ (Constant Drive Current Circuits)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เกี่ยวกับข้อจำกัดต่าง ๆ ของการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ ทำให้พอที่จะทราบถึงวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงมิให้เกิดการอิ่มตัว โดยการควบคุมให้กระแส I_{B1} มีขนาดที่พอเพียงและลดช่วงเวลาสะสมให้น้อยที่สุด เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสวิตชิ่ง และควบคุมกระแสย้อนกลับ I_{B2} ให้มีขนาดที่เพียงพอเช่นเดียวกัน

สังเกตพบว่าเมื่อกระแส I_{B2} มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่วงเวลาสะสมและช่วงเวลาขาลงนั้นลดลง ทำให้แรงดัน V_{EB} เพิ่มขึ้นด้วย ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะทำให้พลังงาน reverse-bias secondary break down หรือ E_{SB} นั้นลดลงด้วย และสำหรับการออกแบบวงจรขับจะต้องคำนึงถึงเรื่องกระแสย้อนกลับเป็นพิเศษมิฉะนั้นจะเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์สวิตชิ่งได้ เมื่อทำงานในโหมด Secondary breakdown ในหัวข้อ 3.1.7 จะกล่าวถึงรายละเอียดของ Reverese-bias Secondary breakdown อีกครั้ง

ในทางปฏิบัตินั้นวงจรขับกระแสย้อนกลับควรมีความต้านทานแหล่งจ่าย (Source Impedance) ต่ำ เพื่อที่จะเพิ่ม I_{B2} และลด V_{EB} ในดาต้าชีท (Data Sheet) นั้นทางผู้ผลิตจะบอกค่าจำกัดของแรงดันไบแอสย้อนกลับระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสได้ โดยในทางปฏิบัติจะใช้ V_{EB} ระหว่าง –2V ถึง –5V



รูปที่ 3.5 วงจรขับเบสโดยใช้หม้อแปลงขับ Q_1 และรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขับเบสที่นิยมใช้แสดงในรูป 3.5 โดยที่วงจรมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อช่วงบวกของแรงดันพัลส์ V_S ปรากฏที่หม้อแปลงด้านทุติยภูมิทำให้เกิดกระแสเบสตรง I_{B1} ไหลเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจร ตัวต้านทาน R_1 เป็นตัวจำกัดกระแส ค่ากระแสนี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราการขยาย ในทางปฏิบัติแล้วอัตราการขยายจะอยู่ระหว่าง 8 และ 10

ซึ่งการคำนวณหาค่ากระแสคอลเลคเตอร์หาได้จากกำลังเอาท์พุท และชนิดของ CONVERTER ที่ใช้และกระแสเบสหาได้จากสมการ 1

แรงดันเก็บประจุตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$V_C = V_S - V_{BE} - V_D \qquad (3.2)$$

เมื่อ V_S คือ แอมปลิจูดของแรงดันหม้อแปลงขดทุติยภูมิ

V_{BE} คือ แรงดันอิ่มตัวระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของ Q_1

V_D คือ แรงดันไบแอสตรงของไดโอด D

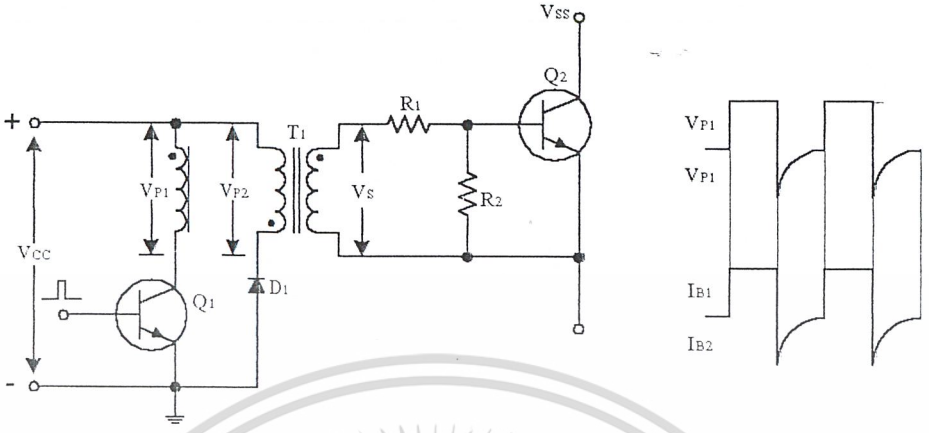
ถ้าสมมติให้ $V_{BE} = V_D = 0.7$ ดังนั้นจากสมการ 4.2 จะได้

$$V_C = V_S - 0.7 \qquad (3.3)$$

เมื่อแรงดันที่ขดปฐมภูมิเท่ากับศูนย์ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมขดทุติยภูมิ ก็ย่อมมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยเช่นกัน ซึ่งขณะนี้ตัวเก็บประจุ C นั้นมีการเก็บประจุจนเต็มที่ทำหน้าที่เป็นตัวไบแอสตรงกับเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็นผลทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ปิดวงจร สังเกตว่าขณะนี้ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 จะมีศักย์แรงดันเป็นลบเกิดกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} (กระแสนี้เกิดจากขั้วของตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมระหว่างรอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์) ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจรในที่สุด โดยขนาดของกระแส I_{B2} นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุ ความต้านทานของวงจร และคุณลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2

อีกเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟตรงสวิตชิ่งแสดงดังรูป 3.6 ซึ่งจุดเด่นของวงจรนี้คือ ใช้อุปกรณ์น้อยชิ้น การทำงานของวงจรมีดังนี้ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจร หม้อแปลงขับด้านปฐมภูมิจะต่อกับแรงดันของแหล่งจ่าย V_{CC} และสะสมพลังงานเกิดเป็นแรงดันพัลส์ปฐมภูมิ V_{P1} แรงดันพัลส์นี้จะถูกเหนี่ยวนำไปยังขดทุติยภูมิ (สังเกตหม้อแปลงมีขั้วของการพันขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิที่เหมือนกัน) เกิดแรงดันพัลส์บวกที่ขดทุติยภูมิ V_S ขับให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรขับโดยใช้หม้อแปลงเป็นตัวเชื่อมต่อ โดยสร้างการขับเบสย้อนกลับจากขดลวดตติยภูมิ

ตัวต้านทาน R_1 เป็นตัวต้านทานจำกัดกระแสเบส ถูกออกแบบให้มีจุดประสงค์ เพื่อขับให้ I_{B1} มีขนาดพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ปิดวงจรโดยปราศจากการโอเวอร์ไดรว์ (Overdrive) และการอิ่มตัวจนเกินไป

สำหรับตัวต้านทาน R_2 เป็นตัวกำหนดกระแสรั่วไหลสำหรับรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 โดยในทางปฏิบัติจะเป็นตัวต้านทานค่าต่ำ ๆ ประมาณ 50 Ω ถึง 100 Ω

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจร พลังงานที่เก็บสะสมในหม้อแปลงจะกลับมาเป็น V_{CC} โดยเกิดจากขดตติยภูมิ (Tertiary) และไดโอด D_1 (สังเกตว่าขั้วการพันของขดลวดตติยภูมินี้จะตรงกันข้ามกับขดปฐมภูมิ) ทำให้แรงดันพัลส์ V_{P2} ที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงขั้ว และเหนี่ยวนำเป็นพัลส์ลบปรากฏยังขดทุติยภูมิเป็นผลทำให้เกิดกระแสย้อนกลับ I_{B2} ตามต้องการเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 เปิดวงจรหยุดนำกระแสนั่นเอง

หัวใจของวงจรนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบหม้อแปลง สัดส่วนการพันระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิจะต้องเลือกไม่ให้แรงดันที่ได้มากเกินกว่าแรงดันของ V_{BE} และ V_{EB} โดยปกติแล้วขดปฐมภูมิและขดตติยภูมิจะมีจำนวนรอบที่เท่ากัน

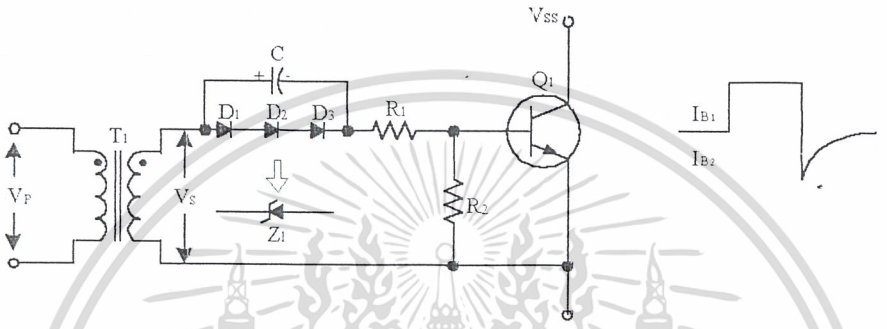
ในทางปฏิบัติแล้วในการพันขดลวดระหว่างขดปฐมภูมิกับขดตติยภูมิจะต้องพันให้แน่น เพื่อหลีกเลี่ยงแรงดันสไปรก์ (Spike) ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะต้องให้แรงดันคอลเลคเตอร์ขณะเปิดวงจรมีค่าอย่างน้อยที่สุด $2\ V_{CC}$

สำหรับวงจรในรูป 3.7 เป็นการพัฒนาจากวงจรที่ผ่านมามีการทำงานดังนี้คือ เมื่อแรงดันพัลส์ V_P เป็นบวกก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นพัลส์ V_S ขับให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจรเกิดการเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่ C โดยมีขั้วแรงดันดังรูป 3.7 แรงดันที่ตัวเก็บประจุขณะนี้จะมีค่าประมาณ 2.1 V. โดยเกิดจากแรงดันตกคร่อมไดโอด D_1, D_2และ D_3 ซึ่งไดโอดทั้งสามตัวนี้ทำหน้าที่เหมือนซีเนอร์ไดโอด

เมื่อแรงดันขดปฐมภูมิมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ขดทุติยภูมิจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย ขณะนี้แรงดันประจุที่สะสมที่ตัวเก็บประจุ C ที่ต่อคร่อมระหว่างรอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจร เพื่อลดเวลาสะสมที่เกิดขึ้น



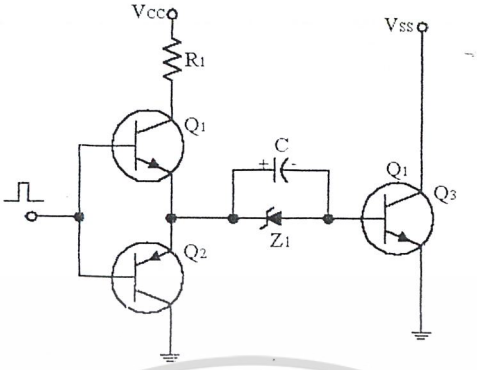
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรขับเบสโดยใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกระบบทางไฟฟ้า และสร้างพัลส์ขับให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจร โดยใช้ตัวเก็บประจุสร้างแรงดันลบทำให้ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร

จากวงจรในรูป 3.7 ทำให้พบว่าสามารถนำไปขับเบสของทรานซิสเตอร์กำลังได้โดยตรงดังรูป 3.8 ซึ่งทรานซิสเตอร์ Q_1 กับ Q_2 นั้นจะทำการสวิตช์ตรงกันข้ามสลับกัน สร้างแรงดัน V_{CC} กับกราวนด์ให้กับเบสของทรานซิสเตอร์ Q_3 เป็นผลทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_3 เปิดวงจร

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจรทำให้ Q_3 ปิดวงจรด้วย ขณะเดียวกันนั้นตัวเก็บประจุ C ก็จะเก็บประจุโดยมีซีเนอร์ไดโอด Z_1 เป็นตัวจำกัดแรงดันประจุของ C ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แรงดัน V_Z เท่ากับ 4.3 V. และตัวต้านทาน R_1 จะเป็นตัวกำหนดกระแสเบสตรง I_{B1}

จนกระทั่งทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจร และ Q_2 ปิดวงจร แรงดันประจุของตัวเก็บประจุ C ที่ต่อคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3 นั้นมีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} โดยที่ขนาดของกระแส I_{B2} นี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการขยาย (gain) ของทรานซิสเตอร์ Q_3 ประจุของตัวเก็บประจุ C และความต้านทานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

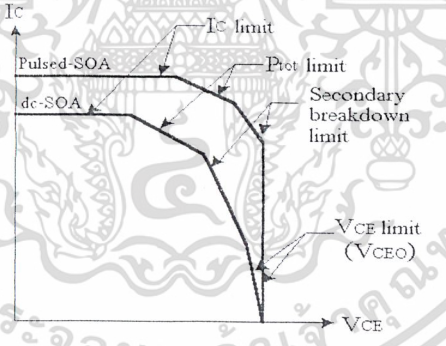


รูปที่ 3.8 วงจรขับเบสโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวเชื่อมต่อโดยตรง

3.1.7 ปรากฏการณ์ Secondary Breakdown ของทรานซิสเตอร์

(1.) Secondary Breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง

โดยปกติแล้วทางโรงงานหรือผู้ผลิตนั้นจะกำหนดกราฟในลักษณะของพื้นที่ทำงานที่ปลอดภัย (Safe Operating Area, SOA) ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C กับแรงดัน V_{CE} ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดง SOA ของทรานซิสเตอร์

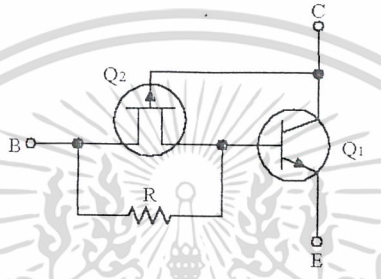
ซึ่งพื้นที่ในกราฟนั้นจะบอกให้ผู้ออกแบบทราบว่าขอบเขตในการทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์มีข้อจำกัดสูงสุดในย่านใดบ้าง กราฟนี้จะใช้พิจารณาเมื่อเส้น load line ขณะได้รับไบแอสตรงอยู่ในพื้นที่ SOA จึงจะปลอดภัย

ปรากฏการณ์ Secondary Breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรง จะเกิดเมื่อผู้ออกแบบกำหนดจุดการทำงานของทรานซิสเตอร์เกินนอกเหนือจากขอบเขตพื้นที่ SOA ทำให้ความร้อนที่ตัวทรานซิสเตอร์กำลังสูงขึ้น สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์เป็นลบ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดกำลังสูญเสียสูงขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเบรกดาวน์ระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นลบด้วย ถ้าปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ยังไม่มีการแก้ไขจะทำให้รอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์พังทลายส่งผลให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขีดจำกัด

จากผลเสียที่ได้ของปรากฏการณ์ Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสตรงดังที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้มีผู้คิดค้นวิธีจะหลีกเลี่ยงมิให้เกิดขึ้น เช่น โรงงาน National Semiconductor ได้ปรับปรุงขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์ให้สามารถทำงานที่ระดับกำลังงานและแรงดันคอลเลคเตอร์สูงสุดโดยไม่เกิดความเสียหาย ในรูปที่ 3.10 แสดงวงจรภายในของทรานซิสเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.10 การป้องกัน Secondary breakdown โดยการต่อ JFET อนุกรมกับเบสของทรานซิสเตอร์

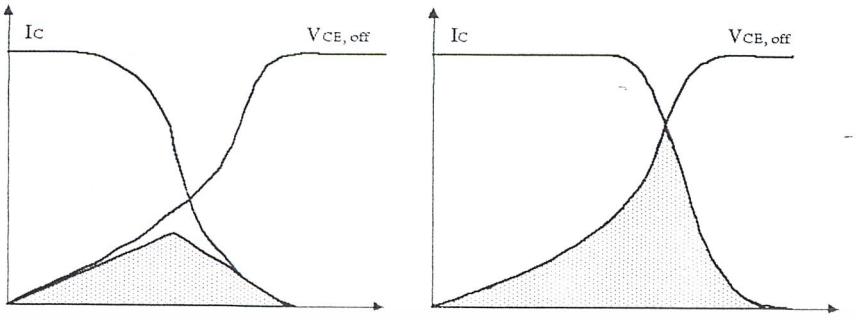
เทคนิคในการแก้ไขนี้จะเพิ่ม JFET อนุกรมกับเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง โดยที่ JFET จะทำหน้าที่เหมือนกับ ballast resister ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นคงที่ อุณหภูมิที่ตัวทรานซิสเตอร์จึงไม่สูงขึ้น

(2.) Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในเรื่องช่วงเวลาสะสม และค่าสูญเสียเมื่อนำทรานซิสเตอร์กำลังไปใช้ในงานสวิตชิ่งนั้น ถ้าหากช่วงเวลาสะสมมีค่ามากเกินไปจะทำให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัว เป็นผลให้ย่านการเรกกูเลตถูกจำกัดให้แคบลง

สำหรับค่าสูญเสียในการสวิตชิ่งย่อมจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของแหล่งจ่าย ทำให้ผู้ออกแบบที่ต้องการแหล่งจ่ายประสิทธิภาพสูง ต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทั้งสองด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ I_C และ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์

ก) เมื่อโหลดแบบความต้านทาน

ข) เมื่อโหลดแบบความเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์กำลังที่แรงดันสูงขณะเปิดวงจรเมื่อใช้กับโหลดความต้านทาน และโหลดความเหนี่ยวนำ สังเกตพบว่าเมื่อโหลดที่ใช้เป็นโหลดความเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดพลังงาน (Energy) สูงกว่า เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทาน (พิจารณาพื้นที่แรเงา แสดงถึงพลังงานที่เกิดขึ้นนั่นเอง) ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ Secondary breakdown ได้

กำลังงานขณะเกิด Secondary breakdown เมื่อป้อนไบแอสกลับ (E_{SB}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{SB} = \frac{1}{2} L_{eff} I_c^2 \qquad (3.4)$$

เมื่อ $$L_{eff} = \frac{V_{CEX}}{V_{CEX} - V_{CC}} \qquad (3.5)$$

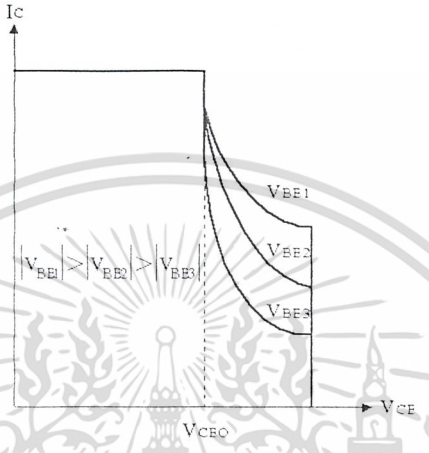
โดยที่ E_{SB} มีหน่วยเป็นจูล (Joule) ซึ่งในการทดสอบทรานซิสเตอร์จะปลดขาเบสออกหรือเพิ่มความต้านทานขาเบสให้สูง ๆ และกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทำงานใกล้กับแรงดัน break-down, V_{CEX} เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ E_{SB} (E_{SB} จะมีย่านกว้างมากระหว่างมิลลิจูลถึงจูล)

พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ (Reverse-Bias Safe Operating Area RBSOA) แสดงในรูป 3.12 คล้ายกับที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของกราฟ SOA สำหรับกราฟของ RBSOA แสดงเมื่อแรงดัน V_{CE} ต่ำกว่าแรงดัน V_{CEO} เป็นพื้นที่ที่ปลอดภัยจากแรงดันไบแอสกลับ V_{EB} แต่ก็ยังถูกจำกัดด้วยอัตราทนกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ของตัวทรานซิสเตอร์เอง เมื่อใดที่แรงดัน V_{CE} มีค่าสูงเกินกว่าแรงดัน V_{CEO} พบว่ากระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงอย่างสัมพันธ์กับแรงดันไบแอสกลับที่ป้อนเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าแรงดันไบแอสกลับ V_{EE} ที่มีค่าสูง ๆ จะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ขณะเปิดวงจร ผู้ออกแบบมักจะใช้ไดโอด หรือวงจรสนับเบอร์ (snubber) เป็นตัวป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าว

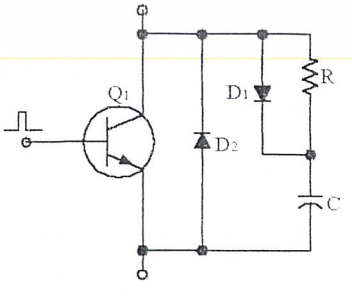


รูปที่ 3.12 พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัยเมื่อป้อนไบแอสกลับ RBSOA

ย้อนกลับมาพิจารณาวงจรขับเบสอีกครั้ง โดยปกติแล้วกระแสเบสย้อนกลับ I_{B2} นั้นถ้ายิ่งมีค่ามากเท่าใด ก็จะทำให้ช่วงเวลาสะสมน้อยลงเท่านั้น แต่การที่ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับมีค่ามาก ๆ นั้น ย่อมส่งผลอันตรายโดยตรงกับทรานซิสเตอร์ โดยเฉพาะการพังทลายของรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ได้ ในทางปฏิบัติแล้วมีวิธีป้องกันมิให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ได้โดย

1) ใช้ค่าแรงดัน V_{CE} ต่ำ ๆ ขณะที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร

2) ลดกระแสคอลเลคเตอร์ ขณะที่แรงดันคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้วิธีที่ 2 เป็นวิธีป้องกันมากกว่าเพราะสามารถออกแบบวงจรป้องกันได้โดยไม่ยุ่งยากนัก ซึ่งวงจรในการแก้ปัญหานั้นก็คือวงจรสนับเบอร์ ดังแสดงในรูป 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสนับเบอร์ต่อคร่อมทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46265

จากรูปที่ 3.13 แสดงการใช้วงจร RC สนับเบอร์เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์สวิตชิ่งเสียหายเมื่อเปิดวงจร การทำงานมีดังนี้ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 เปิดวงจรตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุผ่านไดโอด D_1 ค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ $V_{CC} - V_D$

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ปิดวงจรตัวเก็บประจุ C จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ทำให้พลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนจึงเกิดขึ้นที่วงจรสนับเบอร์แทนทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง ทำให้ทรานซิสเตอร์ปลอดภัยจากความเสียหายได้

ในการออกแบบวงจรสนับเบอร์ทางปฏิบัตินั้นจะใช้รูป 3.11 (ข) เป็นรูปอ้างอิงสมการของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจรสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \frac{CV_{CE}^2}{2} = \frac{I_C V_{CE}(t_r + t_f)}{V_{CE}} \qquad (3.6)$$

เมื่อ I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์ I_C สูงสุด, A

V_{CE} คือ แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์สูงสุด, V

t_r คือ เวลาขอบขาขึ้น, μS

t_f คือ เวลาขอบขาลง, μS

แก้สมการ 4.7 เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ C จะได้

$$C = \frac{I_C(t_r + t_f)}{V_{CE}} \qquad (3.7)$$

เนื่องจากตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุ ขณะที่ทรานซิสเตอร์เปิดวงจร และคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ขณะช่วงเวลาทรานซิสเตอร์ปิดวงจร (t_{on}) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเขียนได้ดังนี้

$$V = V_{CE} \cdot \exp(-\frac{t_{on}}{RC}) \qquad (3.8)$$

ในทฤษฎีจะถือว่าเมื่อตัวเก็บประจุได้เก็บประจุจนเต็มที่นั้นจะมีแรงดันใกล้เคียงกับแรงดัน V_{CE} ดังนั้นจึงต้องเลือกค่า $-(\frac{t_{on}}{RC})$ มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งมักจะเลือกค่า RC โดยให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุ ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดของการปิดวงจร (t_{on})

จากในการแก้ปัญหาวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น เราทราบว่าสามารถแทนช่วงเวลาคงที่ 5τ สำหรับตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุจนหมดผ่านตัวต้านทานโดย $\tau = RC$ สมมติว่าในกรณีนี้ตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุ เมื่อสิ้นสุด 3τ

ดังนั้นค่าความต้านทานสูงสุดที่ใช้ในการคายประจุหาได้จาก

$$R = \frac{t_{on}}{3C} \qquad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทาน R ที่คำนวณได้จากสมการ 9 สามารถนำมาหากระแสขณะคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์ขณะปิดวงจร โดยจำกัดค่ามิให้เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของกระแสคอลเลคเตอร์ 0.25 I_{CC} โดยหาจากสมการ

$$I_{dis} = \frac{V_{CE}}{R} \tag{3.10}$$

ถ้าค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีค่าต่ำเกินไป ทำให้กระแส I_{dis} มีค่าสูงกว่า 0.25 I_C ดังนั้นค่าความต้านทาน R จะต้องเลือกอีกครั้ง เพื่อให้เหมาะสมตรงกับเงื่อนไข

ขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหากำลังไฟฟ้าของตัวต้านทาน

$$P_R = \frac{1}{2} C V_{CE}^2 f \tag{3.11}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่ใช้งานของ CONVERTER, kHz

3.2 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซี

เนื่องจากสวิตช์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ สามารถทำการเปิดกระแสและทำการปิดกระแสได้ทั้งสองอย่าง จึงสามารถนำไปใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีได้ด้วยการปิดเปิดสวิตช์ซ้ำ ๆ กันเป็นจังหวะที่เหมาะสม แรงเคลื่อนไฟฟ้าดีซีที่ส่งไปยังภาระจะขาดออกเป็นห้วง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งเราสามารถควบคุมค่าเฉลี่ยของแรงดันเลี้ยงวงจรให้สูงหรือต่ำลงด้วยการควบคุมเวลาเปิด (= t_{on}), เวลาเปิด (= t_{off}) หรือคาบของเวลาปิดเปิด ($T = t_{on} + t_{off}$) ให้แปรค่าต่าง ๆ เป็นจังหวะซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V(t) = \begin{cases} E & \text{เมื่อ } t = t_{on} \\ 0 & \text{เมื่อ } t = t_{off} \end{cases} \tag{3.12}$$

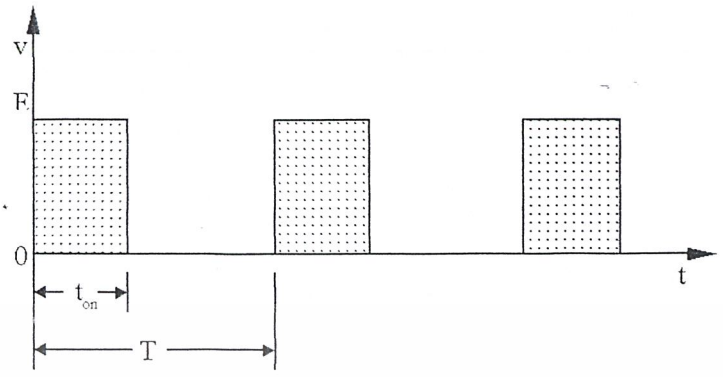
เมื่อกระจายออกเป็นอนุกรม Fourier เราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์

$$a_o = \frac{1}{T/2}\int_0^T E\,dt = 2\frac{t_{on}}{T}E \tag{3.13}$$

$$a_n = \frac{1}{T/2}\int_0^T E\cos\left(\frac{n\pi t}{T/2}\right)dt = \frac{2E}{T}\left[\int_0^{t_{on}} \cos\frac{2n\pi t}{T}\,dt + \int_{on}^T (0).\cos\frac{2n\pi t}{T}\,dt\right]$$

$$= \frac{E}{n\pi}\sin\frac{2n\pi t_{on}}{T},\ n = 1, 2, 3,\ldots \tag{3.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการปิดเปิดไฟฟ้าดีซีเป็นจังหวะหรือของวงจรสับไฟฟ้า

และ

$$b_n = \frac{1}{T/2}\int_0^T E\sin\left(\frac{n\pi t}{T/2}\right)dt = \frac{2E}{T}\left[\int_0^{t_{on}} \sin\frac{2n\pi t}{T}\,dt + \int_{on}^{T}(0).\sin\frac{2n\pi t}{T}\,dt\right]$$

$$= \frac{E}{n\pi}\left(1-\cos\frac{2n\pi t_{on}}{T}\right),\quad n = 1, 2, 3,\ldots \qquad (3.15)$$

ทำให้เราได้อนุกรม Fourier ดังนี้

$$V(t) = E\left[\frac{t_{on}}{T} + \frac{1}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left\{\left(\sin\frac{2n\pi t_{on}}{T}\right)\left(\cos\frac{2n\pi t}{T}\right) + \left(1-\cos\frac{2n\pi t_{on}}{T}\right)\left(\sin\frac{2n\pi t}{T}\right)\right\}\right] \qquad (3.16)$$

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเฉลี่ยได้ดังนี้

$$V_{VAG} = \frac{t_{on}}{T}E = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}E \qquad (3.17)$$

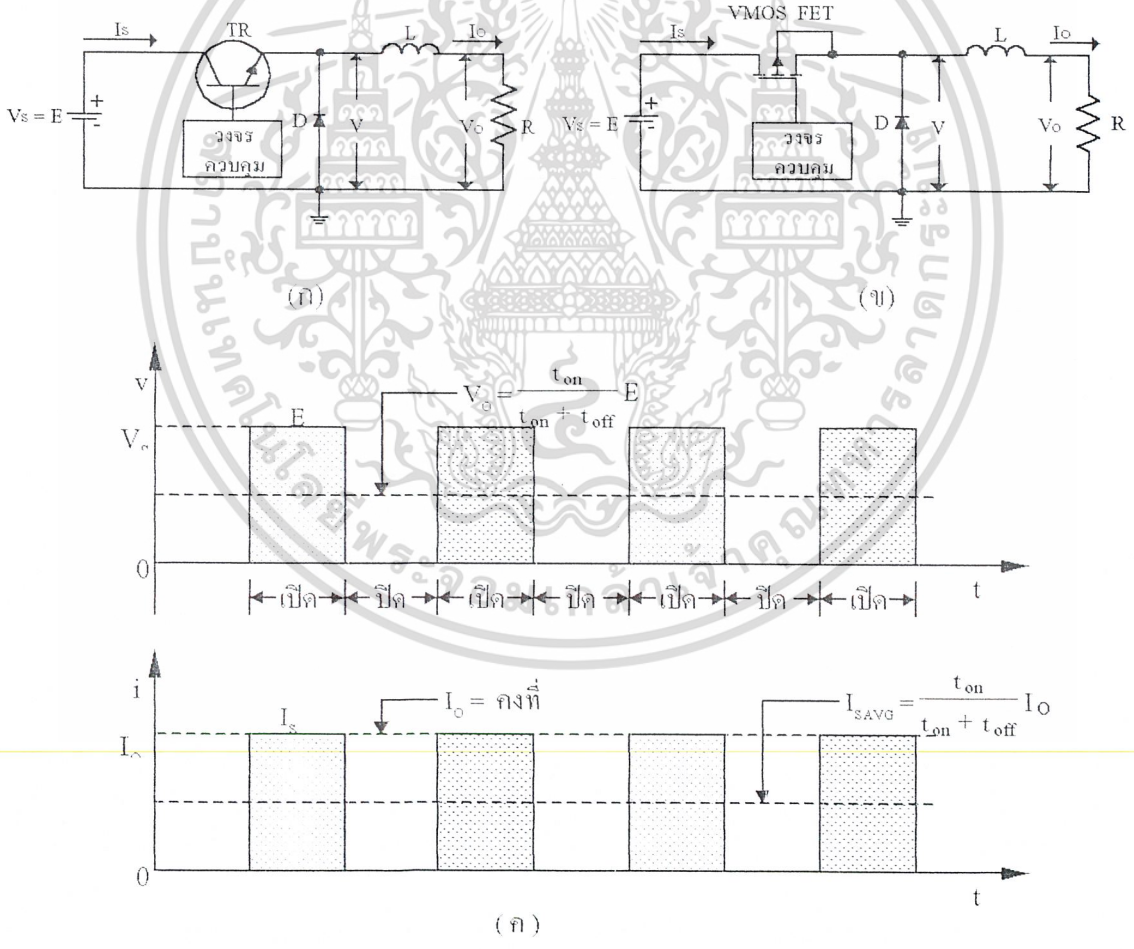
วงจรที่จะสามารถให้แรงดันขาดตอนเป็นห้วง ๆ ที่สามารถเปลี่ยนค่าแรงดันเฉลี่ยได้ดังรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 3.15 นี้ เป็นวงจรที่เรียกว่า "วงจรสับไฟฟ้า" (chopper) ซึ่งทำขึ้นได้หลายแบบ วงจรแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นวงจรที่ใช้ไธริสเตอร์เป็นส่วนประกอบสำคัญ แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรแบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์และเฟทกำลังชนิดวีมอสเป็นส่วนประกอบสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ชนิดของวงจรสับไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. วงจรสับไฟฟ้าลดค่าลง (step-down chopper)

โดยการนำเอาทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์หรือเฟทกำลังชนิดวีมอสเข้าต่อในวงจรเป็นอนุกรมคั่นกลางระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับภาระดังกล่าวในรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทรานซิสเตอร์กำลังหรือเฟทกำลังทำงานปิดเปิดกระแสจะทำให้ได้แรงดันและกระแสมีรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ค) การปรับเปลี่ยนแรงดันเฉลี่ยทำได้ด้วยการควบคุมวงจรเบสของทรานซิสเตอร์กำลังหรือวงจรจุดชนวนเกตของเฟทกำลังให้ทำงานปิดเปิดวงจรเป็นจังหวะโดยการแปรเวลาปิด เวลาเปิด หรือทั้งคู่ แรงดันเฉลี่ยที่ได้รับจะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันเลี้ยงวงจรเสมอ จึงเรียกวงจรนี้ว่า "วงจรสับไฟฟ้าลดค่าลง"



รูปที่ 3.15 (ก) วงจรสับไฟฟ้าลดค่าลงโดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์
(ข) วงจรสับไฟฟ้าลดค่าลงโดยใช้เฟทกำลังชนิดวีมอส
(ค) รูปคลื่นแรงดันและกระแสของ (ก) และ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) ตัวเหนี่ยวนำ L ทำหน้าที่จัดรูปคลื่นแรงเอาท์พุทให้ราบเรียบลง ฟรีวีลลิงไดโอดD ทำหน้าที่เป็นเส้นทางให้กระแสภาระไหลในระหว่างที่ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์หรือเฟทกำลังชนิดวีมอสปิดกระแส ถึงแม้ว่า วงจรนี้จะทำให้แรงดันเฉลี่ยลดค่าลง แต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะจ่ายกระแส I_s ที่มียอดสูงสุดที่ค่าเท่ากับกระแสภาระ I_O ดังนั้นกระแสเฉลี่ยจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า I_{SAVG} จะมีค่าน้อยกว่ากระแสภาระซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.18)

$$I_{SAVG} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} I_O \qquad (3.18)$$

โดยที่กระแสภาระ I_O มีค่าคงที่ เมื่อเราแปรเวลาปิด เวลาเปิด หรือทั้งคู่ จะทำให้เราสามารถปรับค่ากระแสเฉลี่ยให้สูงขึ้นขณะที่แรงดันเฉลี่ยลดค่าลง

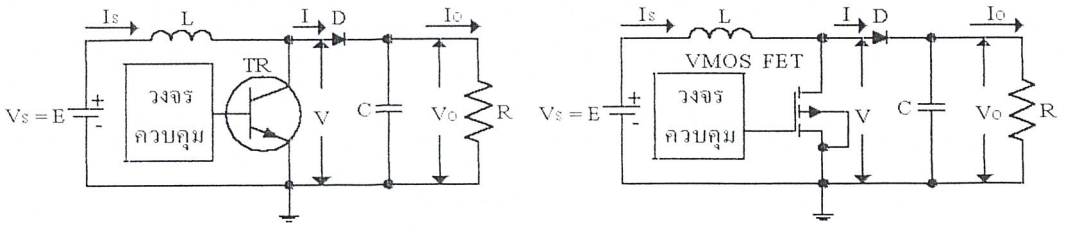
2. วงจรสับไฟฟ้ายกค่าขึ้น (step-up chopper)

โดยการเปลี่ยนแปลงวงจรในรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) ด้วยการนำเอาตัวเหนี่ยวนำ L มาต่อติดกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอนุกรม และนำเอาทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์หรือเฟทกำลังชนิดวีมอสซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์มาต่อลงในวงจรแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับเมื่อทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์หรือเฟทกำลังชนิดวีมอสนี้ทำหน้าที่ปิดเปิดกระแสเป็นจังหวะจะให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ค) โดยขณะที่สวิตช์เปิดกระแส ตัวเหนี่ยวนำ L จะกักเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็ก ครั้นเมื่อสวิตช์ปิดกระแส ตัวเหนี่ยวนำ L จะปล่อยพลังงานที่กักเก็บไว้ออกแล้วทำให้เกิดมีแรงดันขึ้นบวกเพิ่มเข้ากับแรงดันเลี้ยงวงจรป้อนเข้าสู่ภาระผ่านไดโอด โดยที่กระแส I_s จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าคงที่ และพลังงานมีค่าคงที่ขณะที่สวิตช์ปิดกระแส ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการได้ดังข้างล่าง

$$V_O t_{off} = E(t_{on} + t_{off}) \qquad (3.19)$$

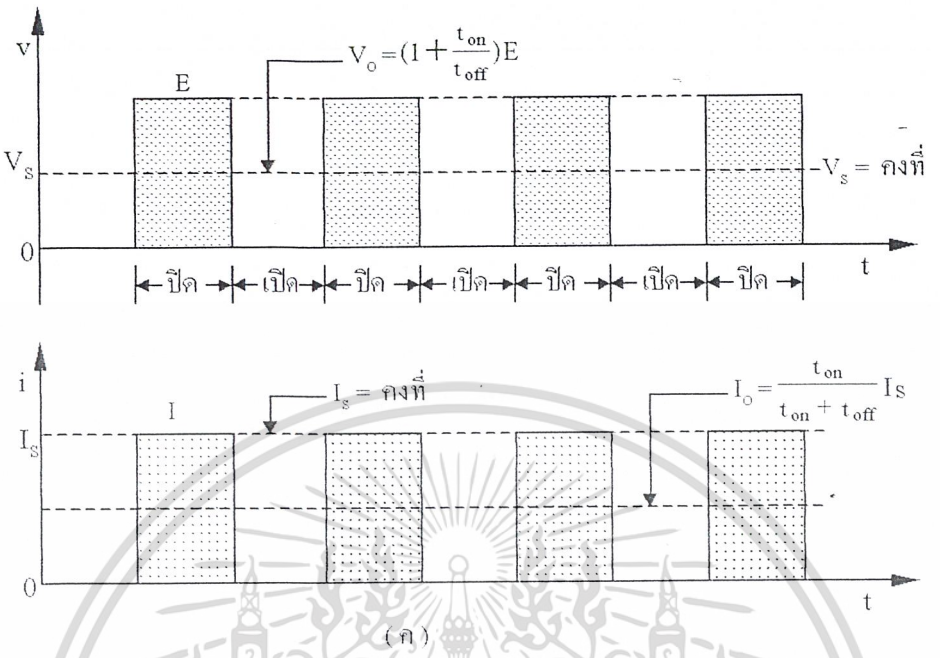
เพราะฉะนั้นทำให้เราได้ความสัมพันธ์

$$V_O = (1 + \frac{t_{on}}{t_{off}})E \qquad (3.20)$$



(ก) (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.16 (ก) วงจรสับไฟฟ้ายกค่าขึ้นโดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์
(ข) วงจรสับไฟฟ้ายกค่าขึ้นโดยใช้เฟทกำลังชนิดวีมอส
(ค) รูปคลื่นกระแสและแรงดันของ (ก) และ (ข)

ซึ่งแสดงว่า เราอาจปรับค่าแรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยให้สูงขึ้นได้ แต่กระแสภาระเฉลี่ยมีค่าลดลงตามสมการข้างล่างนี้

$$I_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} I_S \qquad (3.21)$$

สังเกตว่า L ทำหน้าที่เฉลี่ยค่าแรงดัน ขณะที่ C ทำหน้าที่เฉลี่ยกระแส ถ้าหากว่า L และ C มีค่าใหญ่ทั้งคู่จะทำให้รูปคลื่นที่ได้รับมีลักษณะราบเรียบอย่างสมบูรณ์ เราอาจลดขนาดของ L และ C ให้เล็กลงได้โดยการเพิ่มความถี่ในการปฏิบัติงานของวงจรสับไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดมีกำลังสูญเพิ่มขึ้นในการปิดเปิดของสวิตช์เพราะฉะนั้นเราต้องออกแบบวงจรให้ใช้ความถี่สูงพอประมาณที่ไม่ให้กำลังสูญเกิดขึ้นมากเกินไป

โดยคำอธิบายข้างบนนี้ วงจรสับไฟฟ้าจะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถลดแรงดันลงหรือยกแรงดันให้สูงขึ้น ด้วยการปรับเปลี่ยน เวลาปิด เวลาเปิด หรือทั้งคู่ ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนที่ง่ายกว่าการเปลี่ยนจำนวนรอบ (turn ratio) ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป

เรานิยมใช้วงจรสับไฟฟ้านี้ในการควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ดีซีที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนของยานพาหนะขนาดเล็ก เช่น รถยนต์ไฟฟ้า รถไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นกอล์ฟ รถยกของแบบล้อยาง เป็นต้น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การควบคุมภาคขับมอเตอร์

4.1 พัลส์วิดมอดดูเลชั่น (Pulse Width Modulation : PWM)

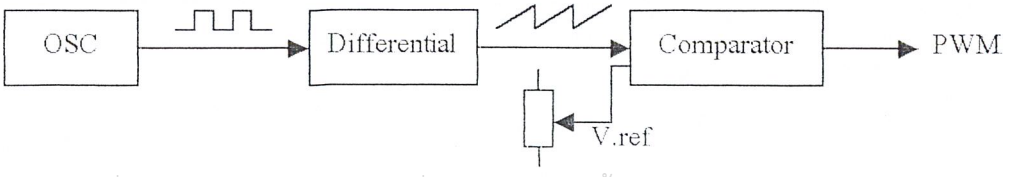
ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่หรือวงจรสวิตชิ่งซัพพลายที่ควบคุมแรงดันคงที่ นิยมใช้เทคนิคการควบคุมความกว้างของพัลส์ (PWM) ซึ่งเป็นการควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์, เพาเวอร์มอสเฟท, ไอจีบีที (IGBT) หรืออื่น ๆ นั้นนำกระแส

4.1.1 ลักษณะของ PWM โดยทั่วไปมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

1. เปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และความกว้างของพัลส์ (Variation of both frequency and pulse width)
2. เปลี่ยนความถี่ โดยความกว้างของพัลส์คงที่ (Constant pulse width with variable frequency)
3. เปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ โดยความถี่คงที่ (Constant frequency with variable pulse width)

การทำงานทั้ง 3 ลักษณะมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป การทำงานในลักษณะที่ 2 และลักษณะที่ 3 จะดีกว่าลักษณะที่ 1 เนื่องจากสามารถกำหนดความถี่หรือช่วงเวลา t_{off} ที่ทำให้สวิตชิ่งหรืออุปกรณ์ควบคุมทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่แบบที่ 1 นั้นความถี่และความกว้างของพัลส์ กำหนดขึ้นจากวงจรจึงอาจไม่ใช่ความถี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานก็ได้ ดังนั้นวงจร PWM ส่วนใหญ่จึงใช้การทำงานในลักษณะที่ 2 หรือลักษณะที่ 3 เสียเป็นส่วนใหญ่ ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตไอซีในงาน PWM ออกมาจำหน่ายโดยได้พัฒนาให้เป็นวงจรสำเร็จรูปใน IC ตัวเดียว เหมาะสำหรับใช้งานในด้านแหล่งจ่ายไฟตรงโดยเฉพาะ ซึ่งการใช้งานของไอซีเหล่านี้สามารถใช้งานได้ง่าย โดยต่ออุปกรณ์เพิ่มเติมภายนอกเพียงเล็กน้อย เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดจุดการทำงานของไอซี PWM นั้น ๆ เพื่อให้การทำงานของวงจรมีความสมบูรณ์ขึ้น อาจมีการเพิ่มเติมวงจรสำหรับระบบต่าง ๆ เช่น วงจรเปรียบเทียบสำหรับป้องกันกระแส หรือแรงดัน

หลักการเบื้องต้นของพัลส์วิดมอดดูเลชั่น



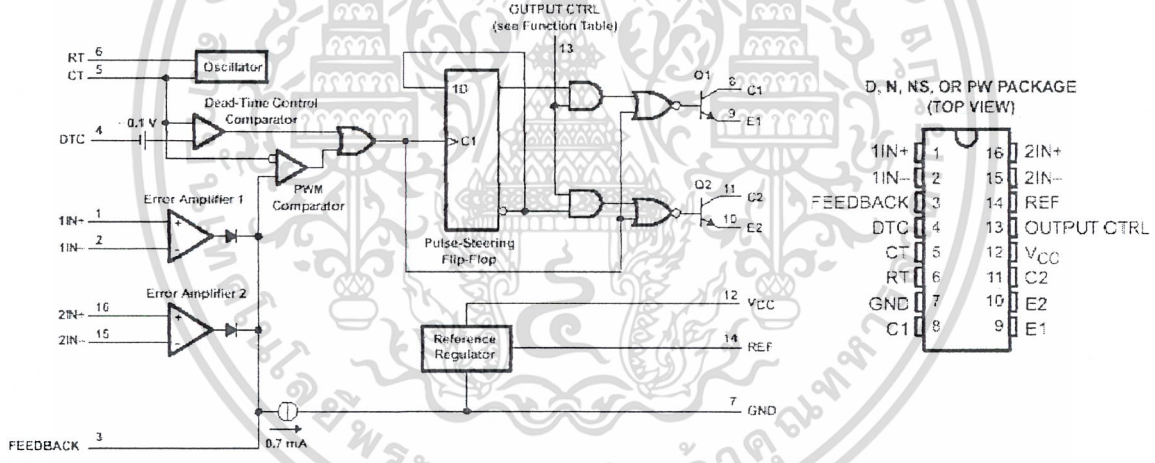
รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทของพัลส์วิดมอดดูเลชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่และควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ตามที่ค่าคำสั่งจ่ายให้กับวงจร จากรูปกำหนดค่าคำสั่งเท่ากับ V_{in} ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปฟันเลื่อยที่ถูกสร้างขึ้นภายในวงจร PWM หน้าที่ของวงจร PWM คือ สร้างสัญญาณรูปฟันเลื่อย และเปรียบเทียบสัญญาณรูปฟันเลื่อยกับระดับแรงดัน V_{in} ซึ่งจะได้เอาท์พุทเป็นสัญญาณพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงค่า DUTY CYCLE ตามผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทนี้จะนำไปผ่านวงจรขับมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป ส่วนสัญญาณ Dead time control ที่เห็นในรูปเป็นสัญญาณอินพุทอีกขาหนึ่ง IC#TL494 มีไว้ในกรณีที่ต้องการควบคุม dead time โดยมีคุณสมบัติเดียวกันกับขา V_{in}

4.1.2 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

ไอซีเบอร์ TL494 ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ โดยทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดัน มีโครงสร้างดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขา ไอซี TL494

การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจร TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของพัลส์กำหนดโดยค่าของ RT และ CT จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี คาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

Single-ended $$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (4.1)$$

Push-pull $$f_{osc} = \frac{1.1}{2R_T C_T} \quad (4.2)$$

กำหนดให้ f_{osc} เท่ากับ ความถี่ของสัญญาณพัลส์

R_T, C_T เท่ากับ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

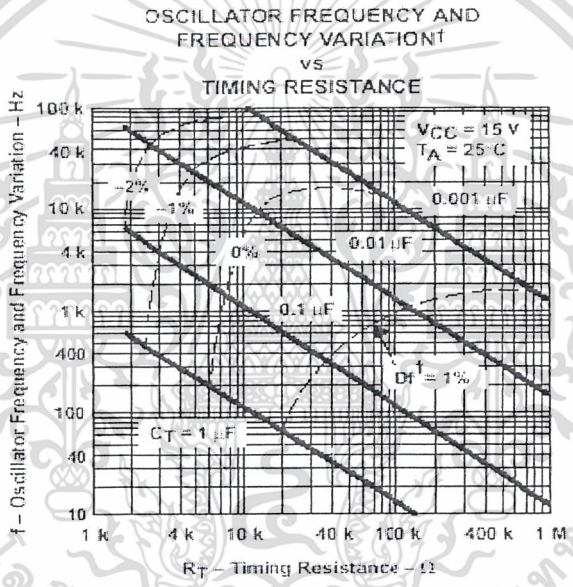
การหาค่า R_T , C_T หาได้ดังนี้

ความถี่ที่ใช้ในการขับมอเตอร์ จะเลือกใช้ที่ 10 kHz เหตุผลในการเลือกความถี่ในย่านนี้เพื่อต้องการให้กระแสของมอเตอร์มีริปเปิ้ลน้อย เราสามารถเลือกความถี่ให้มีค่ามากกว่านี้ แต่ผลตามมาจะมีสัญญาณรบกวนมาก จากคู่มือของ IC TL494 จะหาค่า R_T และค่า C_T จากสูตรดังนี้

$$R_T = \frac{1.1}{f_{osc} C_T} \qquad (4.3)$$

พิจารณาเลือก C = 1 nF และความถี่ที่ 10 kHz จะได้ R_T มีค่า

$$R_T = 110\ k\Omega$$



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_T , C_T ในการกำหนดความถี่

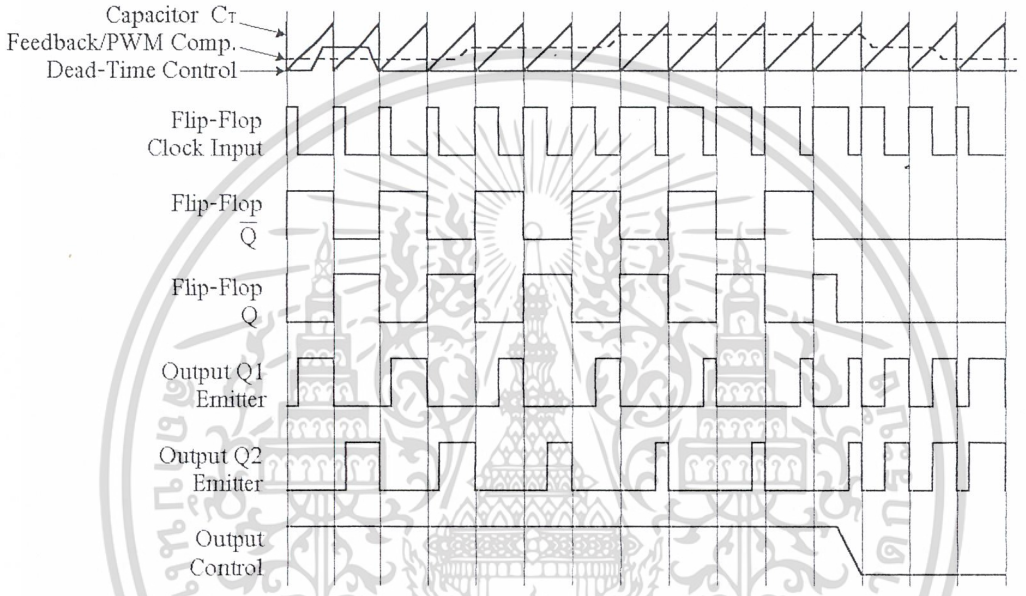
4.1.3 การทำงานของไอซี

ความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของไอซีจะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกทที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาท์พุท Q_1 และ Q_2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C_k ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ Low เท่านั้น ซึ่ง C_k จะเป็น Low ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัวนั้น คือ แรงดันป้อนกลับจากเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูง ความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของไอซีจะลดลง ในทางกลับกัน แรงดันป้อนกลับหากมีค่าลดลงความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของไอซีนี้สามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลท์ จนถึง 3.5 โวลท์ ส่วน Error Amp ทั้งสองตัวจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีช่วงของอินพุท คอมมอนโหมด ตั้งแต่ –0.3 ถึง (V_{CC} – 2) โวลท์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือกระแสที่เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาท์พุทในสถานะ High (Active High) โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาท์พุทพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาท์พุทพัลส์ของไอซี



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นลักษณะการทำงาน IC#TL494

การกำหนดค่าเวลาเผื่อ t_d (dead time)

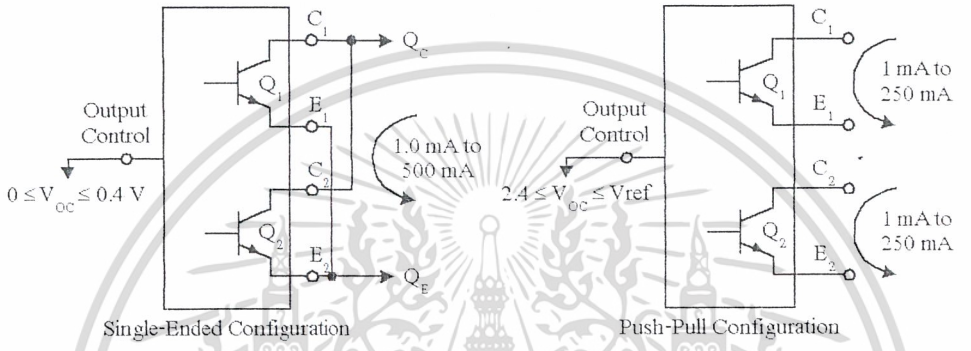
TL494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเผื่อ t_d ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลท์ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลท์ ค่าเวลาเผื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลท์ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นช่วงเวลา t_{on} สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 48% ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (Output control) เข้ากับขา 14 (+5 V_{ref}) และมีค่าเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์

การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาท์พุทของไอซี

เอาท์พุท Q_1 และ Q_2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกัน หรือ สลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (Output Control) โดยขณะที่ C_1 ดิสชาร์จเอาท์พุทของ Dead-Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา C_k จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High โดยการต่อเข้ากับขา 4 (+5V_{ref}) Q_1 และ Q_2

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสลับการทำงานของ Flip-Flop เพื่อให้ขับคอนเวอร์เตอร์แบบ พุช-พูล ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของค่าคาบเวลาสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น Low โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิก Flip-Flop) Q_1 และ Q_2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้นำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี (ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา)

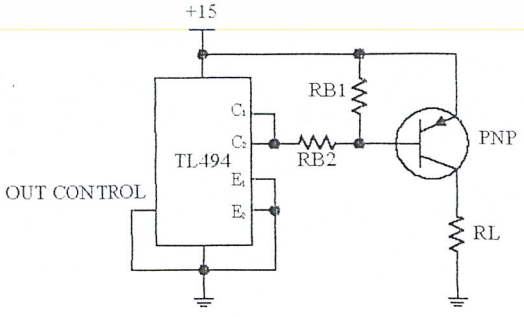


รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุทของ TL494

TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง $7 \leq V_{CC} \leq 40$ โวลท์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน $V_{ref} = 5$ โวลท์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง $\pm 1.5\%$ ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลท์ เมื่อทำงานในช่วง 0° ถึง 70°

4.1.4 การใช้ IC TL494 ร่วมกับทรานซิสเตอร์ภายนอก

การใช้ IC TL494 ในงานสวิตชิ่งที่ต้องการกระแสสูง ๆ โดยทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ภายนอก สังเกตุว่าทรานซิสเตอร์ภายนอกที่ใช้ในวงจรจะใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP, NPN ถ้าเป็นชนิด PNP โดยมีตัวต้านทาน R_{B1} , R_{B2} เป็นส่วนไบแอส ซึ่งทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายใน IC TL494 จะทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ต่อระหว่างขาเบสของทรานซิสเตอร์กับกราวด์และเปิดวงจร



รูปที่ 4.6 การใช้ TL494 กับทรานซิสเตอร์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทรานซิสเตอร์ภายในเปิดวงจรก็ไม่มีกระแสไหลเข้าไปยังตัวต้านทานไบแอสทำให้ทรานซิสเตอร์ภายนอกเปิดวงจรด้วย แต่ถ้าทรานซิสเตอร์ภายในปิดวงจรทำให้ตัวต้านทาน R_{B2} ถูกต่อลงกราวด์ และเกิดกระแสไหลผ่านตัวต้านทานทั้งสอง (R_{B1} , R_{B2}) เกิดเป็นวงจรแบบแรงดันและทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในที่สุด

ในการออกแบบค่าตัวต้านทาน R_{B1} , R_{B2} นั้นจะสมมุติให้กระแส $I_{B\ leader}$ ไหลผ่าน R_{B1} และรวมกับกระแสเบสของทรานซิสเตอร์สวิตชิ่งผ่าน R_{B2} (สามารถเลือกกระแส $I_{B\ leader}$ ได้ประมาณ 1 ใน 10 ของกระแสเบสทรานซิสเตอร์สวิตชิ่ง)

สำหรับการเลือกกระแสเบสของทรานซิสเตอร์จะใช้กระแสค่าสูงสุดของคอลเลคเตอร์ I_{Cmax} และค่าอัตราขยาย β น้อยที่สุดของทรานซิสเตอร์ หาได้จาก DATASHEET, β_{min} สมการในการหากระแสเบส

$$I_{B\,min} = \frac{I_{C\,max}}{\beta_{min}} \qquad (4.4)$$

แรงดันตกคร่อม R_{B1} $V_{BE} = 0.7$ V เพื่อให้แน่ใจว่าทรานซิสเตอร์นำกระแส กระแสที่ไหลผ่าน R_{B1} คือกระแส $I_{B\,leader}$ หา R_{B1} ได้ดังนี้

$$R_{B1} = \frac{V_{BE}}{I_{B\,leader}} \qquad (4.5)$$

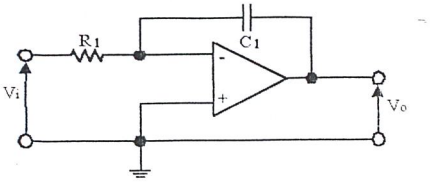
ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ค่า R_{B1} ที่มากกว่าจากการคำนวณเพื่อให้แน่ใจว่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสกับอิมิตเตอร์อย่างน้อยที่ 0.7 V สมการคำนวณหาค่า R_{B2}

$$R_{B2} = \frac{V_{D\,C\,supply} - V_{BE} - V_{sat}}{I_{B\,leader} + I_{B\,min}} \qquad (4.6)$$

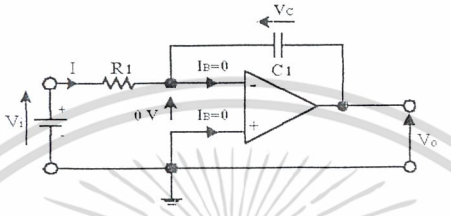
4.2 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์

วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรที่มีสัญญาณเอาท์พุทเป็นผลรวมของสัญญาณอินพุท การทำงานของวงจรจะตรงกับการกระทำทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การอินทิกรัล สำหรับวงจรอินทิเกรเตอร์ที่จะกล่าวถึงเป็นวงจรที่ใช้ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์ จากรูปที่ 4.6 เป็นการทำงานของวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์

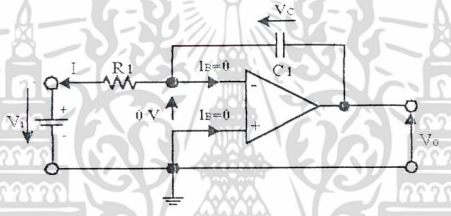
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



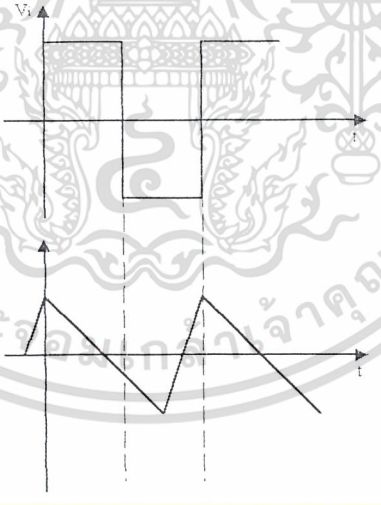
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 การทำงานของวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์

จากวงจรขาบวกของออปแอมป์ถูกต่อกับกราวด์ดังนั้นขาลบของออปแอมป์จะต่อกับกราวด์ด้วย (กราวด์เสมือน) เนื่องจากแรงดันระหว่างขาอินพุทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0 V ถ้าสัญญาณอินพุทเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ที่มีขนาดแรงดัน V_1) จะเกิดแรงดันตกคร่อม R เท่ากับ V_1 และมีกระแส I ไหลผ่าน R_1 เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{V_1}{R_1} \tag{4.7}$$

เนื่องจากค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่ามากจึงประมาณว่ากระแสไหลเข้าหรือออกมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นกระแส I ทั้งหมดจึงไหลผ่าน C_1 ดังรูปที่ 4.7 (ข) จากสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$i_C = C_1 \frac{dv_C}{dt} \tag{4.8}$$

$$\frac{1}{C_1} i_C \, dt = dv_C$$

อินทิกรัลทั้งสองข้างจะได้

$$\frac{1}{C_1} \int i_C \, dt = \int dv_C$$

$$v_C = \frac{1}{C_1} \int i_C \, dt \tag{4.9}$$

นั่นคือแรงดันตกคร่อม C_1 จะเป็นไปตามสมการ (4.9) โดยมีขั้วบวกลบดังรูปที่ 4.7 (ข) ขณะนี้ขา C_1 ด้านแรงดันบวกต่อกับกราวด์เสมือน (ขาลบของออปแอมป์) ส่วนขาด้านแรงดันลบต่อกับขั้วเอาท์พุท ดังนั้นแรงดันเอาท์พุทมีค่าเท่า $-v_C$

$$v_O = -v_C = -\frac{1}{C_1} \int i_C \, dt$$

แต่กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 คือ I ซึ่งมีค่าคงที่ จึงทำให้ C_1 สะสมประจุในลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นแรงดันเอาท์พุทจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น

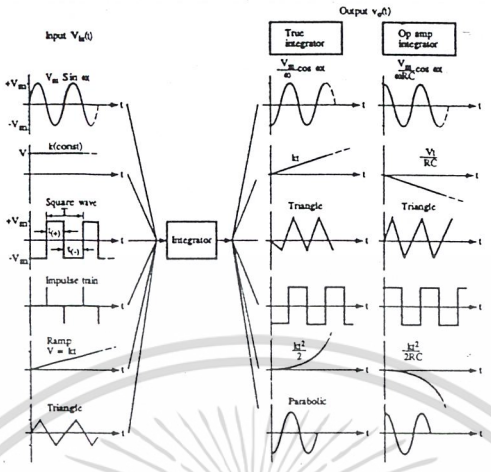
$$V_O = -\frac{1}{C_1} \int I \, dt$$

$$= -\frac{1}{C_1} \int \frac{V_1}{R_1} dt$$

$$V_O = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_1 \, dt \tag{4.10}$$

จากสมการที่ 4.10 แรงดันเอาท์พุทจะขึ้นกับผลรวมของแรงดันอินพุท เมื่อเทียบกับเวลา ถ้าสัญญาณอินพุทเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สัญญาณเอาท์พุทจะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม สำหรับผลตอบสนองของวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์ต่อสัญญาณอินพุทต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



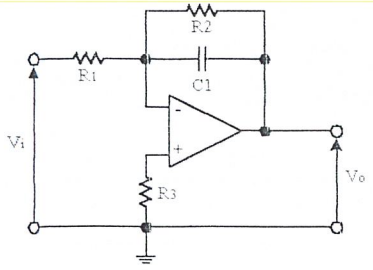
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ได้จากวงจรอินทิเกรเตอร์

อัตราขยายของวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์คือ

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{X_{C1}}{R_1}$$

แต่ $$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC_1}$$

ที่ความถี่ต่ำ ๆ หรือที่ความถี่ 0 Hz จะทำให้ค่า X_{C1} มีค่าอนันต์ (ตัวเก็บประจุ C_1 เสมือนเปิดวงจร) วงจรออปแอมป์ทำงานแบบทำงานแบบเปิดลูปอัตราขยายของวงจรจะมีค่ามาก ส่งผลให้แรงดันอินพุทออฟเซตถูกขยายทำให้แรงดันเอาท์พุทเกิดการอิ่มตัว เพื่อลดอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่ำ ๆ ป้องกันไม่ให้แรงดันเอาท์พุทอิ่มตัว ควรต่อตัวต้านทาน R_2 ขนานกับตัวเก็บประจุ C_1 ดังรูปที่ 4.9 ส่วน R_3 ทำหน้าที่ลดค่ากระแสอินพุทออฟเซต I_{OS} ซึ่ง I_{OS} จะทำให้แรงดันเอาท์พุทเกิดการผิดพลาด



รูปที่ 4.9 การลดอัตราขยายของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การออกแบบวงจร

ในการออกแบบวงจรออปแอมป์อินทิเกรเตอร์ ควรทราบค่าความถี่ต่ำสุด ที่ยังคงทำให้วงจรทำงานเป็นอินทิเกรเตอร์ได้โดยค่าความถี่ f(min) จะต้องทำให้ C_1 มีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับค่าความต้านทาน R_2 ดังนั้น

$$X_{C1} = \frac{R_2}{10} \tag{4.11}$$

$$\frac{1}{2\pi f(min)C_1} = \frac{R_2}{10}$$

$$f(min) = \frac{10}{2\pi R_2 C_1} \tag{4.12}$$

จากสมการที่ 4.12 ถ้าวงจรมีความถี่น้อยกว่าค่า f(min) จะทำให้วงจรมีลักษณะเป็นอินทิเกรเตอร์น้อยลง และถ้าความถี่เป็น 0 Hz (ไฟตรง) จะทำให้วงจรทำงานเป็นวงจรขยายกลับสัญญาณ

4.2.2 ลำดับขั้นในการออกแบบ

1. กำหนดค่ากระแสอินพุท I ให้มีค่ามากกว่ากระแสไบแอสสูงสุด $I_B(max)$ ของออปแอมป์

$$I >> I_B(max)$$

ให้ $$I = 1000\, I_B(max)$$

2. คำนวณหาค่า R_1 :

$$R_1 = \frac{V_1}{I} \tag{4.13}$$

3. คำนวณหาค่า C_1 :

$$C_1 = \frac{i_1}{2V_{sat}f_{(min)}} \tag{4.14}$$

เมื่อ i_1 คือ กระแสอินพุทสูงสุดหาได้จากกฎของโอห์ม

$$i_1 = \frac{V_{1(max)}}{R_1} \tag{3.23}$$

4. คำนวณหาค่า R_2 :

เมื่อวงจรทำงานที่ความถี่ต่ำ R_2 จะต้องมีค่ามากกว่า X_{C1} ดังนั้นให้

$$R_2 = 10\, X_C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_2 = \frac{10}{2\pi f_{(min)} C_1} \quad (4.15)$$

คำนวณหาค่า R_3 :

$$R_3 = R_1 // R_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้จะอ้างอิงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ซึ่งมีหน่วยความจำภายในแบบแฟลช (flash memory) ของ Atmel Corporation มีเบอร์ขึ้นต้นด้วย AT89 เหตุผลที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบนี้ในการทำโครงงานเพื่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายประการดังนี้

1. หน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบแฟลช ทำให้สามารถลบและเขียนใหม่ได้นับพันครั้ง จึงสามารถใช้งานในรูปแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยวไม่ต้องใช้หน่วยความจำภายนอกส่งผลให้สามารถใช้งานพอร์ตอินพุทเอาท์พุทของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาย

2. ต้นทุนและเวลาในการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ลดลงอย่างมากเนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องมือพัฒนาจำพวกอีมูเลเตอร์และเครื่องโปรแกรมอีพรอม (EPROM)

3. บริษัทผู้ผลิตได้ทำการผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ออกมาหลายเบอร์ และมีความสามารถแตกต่างกันไป ทำให้มีทางเลือกในการใช้งานสูง

4. ด้วยการใช้หน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้สามารถป้องกันการคัดลอกข้อมูลของหน่วยความจำโปรแกรมได้เป็นอย่างดี

5. ในบางเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดย Atmel สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลในหน่วยความจำได้โดยที่ไม่ต้องถอดตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ออกมาทำการโปรแกรมใหม่ หรือเรียกว่า **การโปรแกรมในวงจร หรือ ในระนาบ (In-system programming)** โดยใช้ลักษณะการติดต่อแบบ **SPI (Serial Peripheral Interface)** ทำให้การพัฒนาหรือการซ่อมบำรุง ตลอดจนการปรับปรุงหรืออัปเกรดข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมทำได้อย่างสะดวก ภายใต้งบประมาณที่ไม่สูงมากนัก

6. ชุดคำสั่งและสถาปัตยกรรมพื้นฐานเหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ของผู้ผลิตอื่นไม่ว่าจะเป็นอินเทล, ซีเมนส์ หรือดัลลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

คุณสมบัติทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 อนุกรม AT89xx มีดังนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
- ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลชสามารถลบและเขียนใหม่ได้พันครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบแรม ในบางเบอร์จะมีหน่วยความจำแบบอีอีพรอมเพิ่มเติม
- ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานเป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
- ไมเมอร์/เคาร์เตอร์ขนาด 16 บิตอย่างน้อย 2 ตัว
- สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ได้ 6 ประเภท
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ในภายชิป
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI สำหรับในอนุกรม AT89Sxx
- มีวอตช์ด็อกไทเมอร์ในตัว สำหรับในอนุกรม AT89Sxx

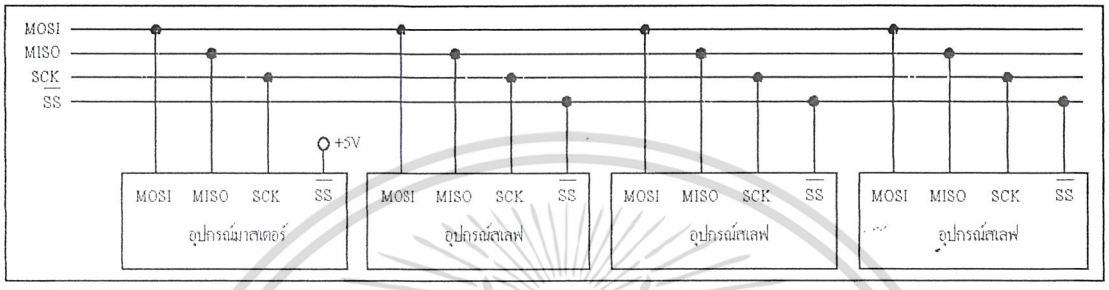
ในโครงงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช เบอร์ AT89S8252 ซึ่งมีหน่วยความจำโปรแกรมขนาด 8 กิโลไบต์ หน่วยความจำข้อมูล แรม 256 ไบต์ อีอีพรอม 2 กิโลไบต์และจำนวนไทเมอร์/เคาร์เตอร์ 16 บิต 3 ตัว

คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งที่มีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช ในอนุกรม AT89Sxx ของ Atmel คือ ส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรม หรือ SPI (Serial Peripheral Interface) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งรูปแบบของการขยายขีดความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ ซึ่งในอดีตมีเพียงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 68HC11 ของโมโตโรล่าเท่านั้นที่มีความสามารถในส่วนนี้ แต่ในปัจจุบันและอนาคต SPI จะกลายเป็นคุณสมบัติมาตรฐานที่ต้องมีในไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังจะเห็นได้จากในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC รุ่นใหม่ รวมถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์อีกตระกูลหนึ่งของ Atmel ต่างก็บรรจุส่วน SPI ไว้ด้วย

ส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรม หรือ SPI นี้เป็นการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับอุปกรณ์ภายนอกที่มีลักษณะการถ่ายทอดข้อมูลในลักษณะอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) ความเร็วสูง ในการสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัสจะต้องใช้สัญญาณนาฬิกาเพื่อกำหนดจังหวะในการถ่ายทอดข้อมูลร่วมกัน และต้องกำหนดสถานภาพของอุปกรณ์ในระบบอย่างชัดเจน เนื่องจากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อแบบ SPI สามารถต่อพ่วงอุปกรณ์ได้เป็นจำนวนมาก โดยต้องมีการกำหนดตัวควบคุมหลักเป็นอุปกรณ์ตัวแม่หรือมาสเตอร์ (master) และอุปกรณ์ที่นำมาต่อพ่วงในระบบเป็นอุปกรณ์ลูกหรือสเลฟ (slave) ดังแสดงรูปแบบ SPI อย่างง่ายในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 รูปแบบของการเชื่อมต่อของ SPI อย่างง่าย

อุปกรณ์ตัวแม่หรือมาสเตอร์โดยส่วนใหญ่จะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ และอุปกรณ์ตัวลูกหรือสเลฟ มักเป็นไอซีที่ทำหน้าที่เฉพาะพิเศษ เช่น หน่วยความจำ ไอซีขยายพอร์ต หรือ UART เป็นต้น แต่ด้วยการใช้ความสามารถของ SPI อาจสร้างโครงข่ายระบบควบคุมแบบมัลติโปรเซสเซอร์ได้ โดยทำการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์หลายตัวเข้าด้วยกันโดยผ่านทางขาเชื่อมต่อของระบบ SPI นั่นหมายความว่า อุปกรณ์ตัวลูกหรือสเลฟนั้นก็คือไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์อีกชุดหนึ่งหรืออีกหลาย ๆ ชุดในกรณีต่อพ่วงกันมากกว่า 2 ตัว

นอกเหนือไปจากการใช้ SPI ในการติดต่อสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัสแล้ว ในไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรม AT89Sxx ยังใช้ความสามารถของส่วน SPI ในการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวชิปด้วย จึงทำให้กระบวนการที่เรียกว่า การโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมในระบบหรือในวงจร (In-System Programming : ISP) ทำให้สามารถแก้ไขหน่วยความจำโปรแกรมได้โดยไม่ต้องถอดตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ออกจากระบบ เพียงต่อสายเข้าที่พอร์ต SPI คือขา SS, MOSI, MISO และ SCK (ซึ่งก็คือขา P1.4-P1.7) แล้วทำการรันซอฟท์แวร์ที่เขียนขึ้นเพื่อการโปรแกรมในระบบ ก็จะสามารถแก้ไขหน่วยความจำโปรแกรมได้แล้ว ซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวชิปนี้ ได้แก่

- SXA51 เป็นตัว Compile ไฟล์นามสกุล ASM ที่เขียนด้วยโปรแกรม Editor ต่าง ๆ ให้เป็นไฟล์นามสกุล HEX
- PonyProg - Serial Device Programmer Version 1.17h เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทำให้ไฟล์นามสกุล HEX ที่ได้จากการ Compile จากโปรแกรม SXA51 เป็นไฟล์นาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกุล HEX ในรูปแบบบน Windows สามารถดาวน์โหลดได้ที่ http://www.LancOS.com

- Atmel AVR ISP Version 2.65 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ไฟล์นามสกุล HEX จากโปรแกรม PonyProg สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมได้ที่ http://www.atmel.com/

วิธีการโปรแกรมแบบนี้จะช่วยลดต้นทุนในเรื่องของค่าเครื่องโปรแกรมเวลาในการปรับปรุง และแก้ไขหน่วยความจำโปรแกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพราะเพียงแต่ต่อสายเข้าไปเท่านั้น ไม่ต้องถอดฝาเครื่องหรือส่วนห่อหุ้มตัวชิปออก เพื่อนำตัวชิปออกมาโปรแกรมภายนอก ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการนำเครื่องหรือชิ้นงานกลับมายังแผนกซ่อมบำรุง เพียงเพื่อแก้ไขข้อมูลภายในหน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

5.2 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทุกเบอร์จะมีขาใช้งานพื้นฐานเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดขั้นต้น ดังนี้

ขา Vcc ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5 V

ขา GND เป็นขากราวด์ สำหรับต่อกับกราวด์ของระบบ

ขาพอร์ต 0 (P0.0-P0.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุทสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์ต่ำของหน่วยความภายนอก (A0-A7) และขาข้อมูล (D0-D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วย เพื่อสลับการทำงานให้เป็นได้ทั้งขาติดต่อแอดเดรสและขาข้อมูล

ขาพอร์ต 1 (P1.0-P1.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 1 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุทสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย นอกจากนั้นในอนุกรม AT89Sxx จะใช้ขา P1.0 เป็นขาอินพุทสำหรับนับค่าของไทเมอร์ 2 และ P1.1 เป็นขาอินพุททริกเกอร์ของไทเมอร์ 2 ในขณะที่ขา P1.4 ถึง P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรมข้อมูลในระบบ

P1.4 ขา $\overline{SS}$ (Slave Select) เป็นขาเลือกการติดต่อในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สเลฟในระบบการติดต่อแบบ SPI

P1.5 ขา MOSI (Master data Output, Slave data Input) ในการติดต่อกับพอร์ต SPI

P1.6 ขา MISO (Master data Input, Slave data Output) ในการติดต่อกับพอร์ต SPI

P1.7 ขา SCK (Master clock output) เป็นขาสัญญาณนาฬิกาของการติดต่อกับพอร์ต SPI

ขาพอร์ต 2 (P2.0-P2.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 2 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุทสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความภายนอก (A8-A15)

ขาพอร์ต 3 (P3.0-P3.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 3 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุทสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังมีรายละเอียดขั้นต้นต่อไปนี้

P3.0 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

P3.1 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา TxD

P3.2 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่องที่ 0 หรือขา $\overline{\text{INT0}}$

P3.3 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่องที่ 1 หรือขา $\overline{\text{INT1}}$

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากภายนอกช่องที่ 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากภายนอกช่องที่ 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ $\overline{\text{WR}}$ ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาสัญญาณ $\overline{\text{RD}}$ ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

ขารีเซต (Reset) ใช้ในการรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซต สถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซตอย่างน้อย 2 แมชีนไซเกิล โดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างเป็นปกติ

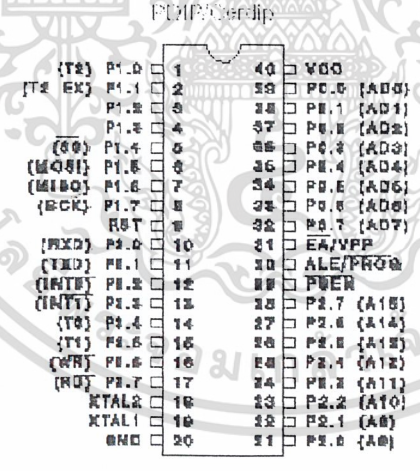
ขา ALE/$\overline{\text{PROG}}$ (Address Latch Enable/Program pulse input) เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลตช์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก นอกจากนั้นขานี้ยังใช้เป็นขาสำหรับรับพัลส์ของการโปรแกรมสำหรับโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในรุ่นที่มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบอีอีพรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขา $\overline{\text{PSEN}}$ (Program Store Enable) ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ขานี้ 2 ครั้งในแต่ละแมชีนไซเกิล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก ขานี้จะไม่มีการส่งสัญญาณใด ๆ ออกมา

ขา $\overline{\text{EA}}$ / Vpp (External Access enable/Programming voltage input) ใช้สำหรับเลือกการติดต่อหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าหากขานี้เป็น "0" เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกแต่ถ้าหากขานี้เป็น "1" เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ ที่ขานี้ยังใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชต้องการแรงดันสำหรับการโปรแกรม +12 V

ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตอลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.2 การจัดขามาตราฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ (Timer/Counter) เป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องมีการเก็บและตรวจสอบค่าของเวลาและจำนวนของสัญญาณนาฬิกาอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการสร้างฐานเวลา สร้างสัญญาณพัลส์ เปรียบเทียบค่าเวลา หรือเปรียบเทียบค่าของการนับ รวมไปถึงการกำหนดอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลของพอร์ตอนุกรมด้วย

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชเบอร์ AT89C51 มีวงจรไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต 2 ตัว โดยค่าของวงจรไทเมอร์/เคาน์เตอร์นี้จะเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตที่ชื่อ ไทเมอร์ 0 (Timer0) และไทเมอร์ 1 (Timer1) เรียกสั้น ๆ ว่า T0 และ T1 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชเบอร์ AT89C52 และอนุกรม AT89Sxx จะมีไทเมอร์/เคาน์เตอร์ถึง 3 ตัว คือ ไทเมอร์ 2 (Timer2 : T2) เพิ่มเติมมา โดยรีจิสเตอร์ไทเมอร์ /เคาน์เตอร์ทั้งสามตัวสามารถกำหนดให้ทำงานเป็นตัวตั้งเวลาหรือไทเมอร์และตัวนับหรือเคาน์เตอร์ได้อย่างอิสระต่อกัน การนับค่าของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จะเป็นการนับขึ้นหรือเพิ่มค่าเพียงทางเดียว

5.3.1 การทำงานเป็นไทเมอร์

เมื่อกำหนดให้ทำงานเป็นตัวตั้งเวลาหรือไทเมอร์ ค่าของรีจิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ แมชชีนไซเกิล ดังนั้นเมื่อทำงานเป็นไทเมอร์ รีจิสเตอร์จะทำการนับค่าของแมชชีนไซเกิลนั่นเอง และเนื่องจากแมชชีนไซเกิลประกอบด้วยคาบเวลาของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 12 คาบเวลา ดังนั้นอัตราในการนับของรีจิสเตอร์จึงเท่ากับ 1/12 ของความถี่สัญญาณนาฬิกา

5.3.2 การทำงานเป็นเคาน์เตอร์

เมื่อทำงานเป็นตัวนับหรือเคาน์เตอร์ ค่าของรีจิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับลอจิกจาก "1" เป็น "0" เกิดขึ้นที่ขาอินพุททางฮาร์ดแวร์ของวงจรไทเมอร์/เคาน์เตอร์ ซึ่งก็คือ ขาT0 (P3.4), ขาT1 (P3.5) และขาT2 (P1.0) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชเบอร์ AT89C52 และอนุกรม AT89Sxx โดยจะมีการสุ่มรับสัญญาณจากขาอินพุทในทุก ๆ คาบเวลาที่ 2 ของสเตตที่ 5 (S5P2) ในแต่ละแมชชีนไซเกิล

เมื่อสัญญาณอินพุทเปลี่ยนแปลงจาก "1" เป็น "0" เป็นเวลาหนึ่งไซเกิล ในไซเกิลต่อมาค่าของการนับจะเพิ่มขึ้นหนึ่งค่า และจะไปปรากฏในรีจิสเตอร์ภายในคาบเวลาที่ 1 ของสเตตที่ 3 (S3P1) ของแมชชีนไซเกิลต่อไปหลังจากที่ตรวจจับพบการเปลี่ยนแปลงที่ขาไทเมอร์อินพุทแล้ว เมื่อเป็นเช่นนี้ในกระบวนการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุทที่ขาไทเมอร์จะต้องใช้ 2 แมชชีนไซเกิล อัตราการนับของเคาน์เตอร์จึงเท่ากับ 1/24 ของความถี่สัญญาณนาฬิกา ดังนั้น ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดของสัญญาณอินพุทที่ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช สามารถตรวจจับได้จึงเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหารด้วย 24 ยกตัวอย่าง ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชเบอร์ AT89S8252 สามารถใช้สัญญาณนาฬิกาได้สูงสุด 24 MHz ดังนั้นความถี่สูงสุดของสัญญาณอินพุทที่ไทเมอร์/เคาน์เตอร์สามารถตรวจจับได้คือ 1 MHz

5.3.3 รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1

ในการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชมีรีจิสเตอร์ที่ต้องเกี่ยวข้องเป็นพื้นฐานอยู่ 6 ตัว ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- **รีจิสเตอร์ไทเมอร์**

มีด้วยกัน 4 ตัวคือ TL0 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8AH, TH0 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8CH, TL1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8BH และ TH1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8DH รีจิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวจะอยู่ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ฟังก์ชั่นพิเศษ หรือ SFR รีจิสเตอร์แต่ละตัวมีขนาด 8 บิต แต่ในการใช้งานโดยทั่วไปมักใช้รวมกันโดยจัดเป็นคู่คือ TL0 กับ TH0 รวมกันเป็นรีจิสเตอร์ Timer 0 ขนาด 16 บิต และTL1 กับ TH1 รวมกันเป็นรีจิสเตอร์ Timer 1 ขนาด 16 บิต โดยใน TL0 และ TL1 จะเก็บข้อมูล 8 บิตล่าง ส่วน TH0 และ TH1 เก็บข้อมูล 8 บิตบน รีจิสเตอร์ไทเมอร์ทั้ง 2 คู่เมื่อนำมาใช้งานร่วมกันจะสามารถเก็บค่าของการนับได้สูงสุด 65,536 ค่าหรือ FFFFH เมื่อนับถึงค่านี้แล้วก็จะวนไปเริ่มนับ 0000H ใหม่ และเมื่อเกิดการนับรอบใหม่ จะมีการเซตบิต TF0 หรือ TF1 ในรีจิสเตอร์ TCON ที่ใช้ควบคุมการทำงานของไทเมอร์ เพื่อแจ้งให้ทราบว่าเกิดการนับเกินค่าสูงสุดแล้ว การเซตบิต TF0 หรือ TF1 ขึ้นอยู่กับว่าเลือกใช้งานรีจิสเตอร์ไทเมอร์ตัวใดอยู่

- **รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ หรือ**

TCON (Timer/Counter Control Register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 88H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ SFR สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต มีรายละเอียดการทำงานดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0

TF1 (Timer 1 overflow flag) : เซตด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ Timer 1 เกิดการนับเกินหรือเกิดโอเวอร์โฟลว การเคลียร์บิตนี้ทำได้ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์เช่นกันโดยบิตนี้จะเคลียร์เมื่อมีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TR1 (Timer 1 run control bit) : ใช้ในการเปิดปิดการทำงานของไทเมอร์ 1 (อีนาเบิลหรือดิสเอเบิล) ทำการเซตและเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟท์แวร์ ถ้าต้องการให้ไทเมอร์ 1 ทำงานต้องเซตบิตนี้ให้เป็น "1"

TF0 (Timer 0 overflow flag) : เซตด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ Timer 0 เกิดการนับเกินหรือเกิดโอเวอร์โฟลว การเคลียร์บิตนี้ทำได้ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์เช่นกัน โดยบิตนี้จะเคลียร์เมื่อมีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

TR0 (Timer 0 run control bit) : ใช้ในการเปิดปิดการทำงานของไทเมอร์ 0 (อีนาเบิลหรือดิสเอเบิล) ทำการเซตและเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟท์แวร์ ถ้าต้องการให้ไทเมอร์ 0 ทำงานต้องเซตบิตนี้ให้เป็น "1"

IE1 (External Interrupt 1 edge flag) : บิตนี้จะใช้ในกระบวนการอินเตอร์รัปต์ สามารถเซตได้ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ เมื่อสามารถตรวจจับขอบขาของสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกที่ขาอินพุทอินเตอร์รัปต์ 1 (INT1) ได้ และจะทำการเคลียร์เมื่อมีการบริการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

IT1 (Interrupt 1 type control bit) : บิตนี้จะใช้ในกระบวนการอินเตอร์รัปต์ โดยใช้ในการเลือกลักษณะของสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกที่ต้องการให้ทำการตอบสนองสำหรับขาอินพุทอินเตอร์รัปต์ 1 (INT1) การเซตและเคลียร์ทำได้ด้วยกระบวนการซอฟท์แวร์

"0" เลือกขอบขาลงของสัญญาณ (falling edge)

"1" เลือกระดับลอจิกต่ำ (low level triggered)

IE0 (External Interrupt 0 edge flag) : บิตนี้จะใช้ในกระบวนการอินเตอร์รัปต์ สามารถเซตได้ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ เมื่อสามารถตรวจจับขอบขาของสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกที่ขาอินพุทอินเตอร์รัปต์ 0 (INT0) ได้ และจะทำการเคลียร์เมื่อมีการบริการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

IT0 (Interrupt 0 type control bit) : บิตนี้จะใช้ในกระบวนการอินเตอร์รัปต์ โดยใช้ในการเลือกลักษณะของสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกที่ต้องการให้ทำการตอบสนองสำหรับขาอินพุทอินเตอร์รัปต์ 0 (INT0) การเซตและเคลียร์ทำได้ด้วยกระบวนการซอฟท์แวร์

"0" เลือกขอบขาลงของสัญญาณ (falling edge)

"1" เลือกระดับลอจิกต่ำ (low level triggered)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **รีจิสเตอร์เลือกโหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์หรือ**

TMOD (Timer/Counter Mode Control Register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 89H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ SFR ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ 4 บิตล่างใช้ในการเลือกโหมดการทำงานของไทเมอร์ 0 และ 4 บิตบนใช้ในการเลือกโหมดการทำงานของไทเมอร์ 1 ดังนั้นในการอธิบายการทำงานจะขออธิบายเพียงส่วนเดียวดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
GATE	$C/\overline{T}$	M1	M0	GATE	$C/\overline{T}$	IE0	IT0
ไทเมอร์ 1				ไทเมอร์ 0			

GATE : ใช้เลือกลักษณะการควบคุมการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์

"0" ไทเมอร์/เคาน์เตอร์จะทำงานเมื่อบิต TRx ในรีจิสเตอร์ TCON เป็น "1" เรียกการควบคุมแบบนี้ว่า การควบคุมทางซอฟท์แวร์

"1" ไทเมอร์/เคาน์เตอร์จะทำงานเมื่อบิต TRx ในรีจิสเตอร์ TCON เป็น "1" และสถานะลอจิกที่ขาอินพุทอินเตอร์รัปท์ INT0 และ INT1 เป็น "1" เรียกการควบคุมแบบนี้ว่า การควบคุมทางฮาร์ดแวร์

$C/\overline{T}$ (Timer or Counter selector) : ใช้เลือกลักษณะการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์

"0" เลือกให้ทำงานเป็นไทเมอร์ โดยใช้สัญญาณอินพุทจากสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

"1" เลือกให้ทำงานเป็นเคาน์เตอร์ โดยรับสัญญาณอินพุทจากภายนอกที่เข้ามาทางขา T0 และ T1

M1, M0 (Mode selector bit) : ใช้เลือกโหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์

"00" เลือกให้ทำงานในโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 13 บิต

"01" เลือกให้ทำงานในโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต

"10" เลือกให้ทำงานในโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 8 บิตแบบตั้งค่าอัตโนมัติ

"11" สำหรับไทเมอร์ 0 เลือกให้ทำงานในโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์แยกส่วน โดยแยกออกเป็นไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิต 2 ตัว รีจิสเตอร์ TL0 จะได้รับการควบคุมการเปิดปิดจากบิต TR0 ในรีจิสเตอร์ TCON และรีจิสเตอร์ TH0 ซึ่งเป็นไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิตอีกตัวหนึ่ง จะได้รับการควบคุมจากบิต TR1 ในรีจิสเตอร์ TCON

สำหรับไทเมอร์ 1 เป็นการสั่งให้ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 หยุดทำงาน(ดิสเอเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 โหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1

ไทเมอร์ 0 และ ไทเมอร์ 1 สามารถเลือกโหมดการทำงานได้ 4 โหมดคือ โหมด 0 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 13 บิต (13 bit timer/counter), โหมด 1 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต (16 bit timer/counter), โหมด 2 : ตั้งค่าอัตโนมัติขนาด 8 บิต (8 bit auto-reload timer/counter) และโหมด 3 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์แยกส่วน (split timer/counter) หรืออาจเรียกว่าโหมดไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิตก็ได้ ในขณะที่ไทเมอร์ 2 มีโหมดการทำงาน 3 โหมดคือ โหมดแคปเจอร์หรือตรวจจับสัญญาณ (capture), โหมดตั้งค่าอัตโนมัติ (auto-reload) และโหมดกำเนิดอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมหรืออัตราบอด (baud rate generator)

เนื่องจากในภาคการศึกษานี้ จะใช้เพียง ไทเมอร์ 0 เป็นเคาน์เตอร์ และไทเมอร์ 1 เป็นไทเมอร์ จะไม่ได้ใช้ไทเมอร์ 2 ดังนั้นจะอธิบายการทำงานในแต่ละโหมดของไทเมอร์ 0 และไทเมอร์ 1 เท่านั้น จะไม่อธิบายโหมดการทำงานของไทเมอร์ 2

การเลือกโหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 และ 1 สามารถกระทำได้ที่รีจิสเตอร์ TCON และ TMOD ร่วมกัน โดยรีจิสเตอร์ TCON ใช้ในการอีนาเบิลหรือดิสเอเบิลไทเมอร์/เคาน์เตอร์ ส่วน TMOD ใช้ในการเลือกโหมดและลักษณะการทำงาน และในการอธิบายโหมดการทำงานนี้จะใช้ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ในการอธิบาย ซึ่งโหมดการทำงานจะมีลักษณะเหมือนกับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0 ทุกประการ เพียงแต่เปลี่ยนรีจิสเตอร์และขาสัญญาณที่เกี่ยวข้องให้เป็นของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0

1) การทำงานในโหมด 0 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 13 บิต

การทำงานในโหมดนี้จะเป็นการกำหนดให้ใช้งานรีจิสเตอร์ TL1 เพียง 5 บิต และ TH1 8 บิต โดย TL1 จะทำหน้าที่คล้ายเป็นปรีสเกลเลอร์หาร 32 สัญญาณอินพุทสำหรับการนับจะเลือกจากสัญญาณนาฬิกาภายในหรือภายนอกผ่านทางขา T1 ขึ้นอยู่กับการควบคุมของบิต C/T และ GATE ในรีจิสเตอร์ TMOD, บิต TR1 ในรีจิสเตอร์ TCON และสถานะของลอจิกที่ขาอินพุท INT1

เมื่อ TL1 นับครบ 32 คือจาก 0-31 ก็จะส่งสัญญาณไปยัง TH1 เพื่อทำการเพิ่มค่า ดังนั้นในโหมดนี้ค่าของการนับจะมีขนาด 13 บิต เมื่อทำการนับครบรอบ ก็จะทำการเซตบิต TF1 ในรีจิสเตอร์ TCON

2) การทำงานในโหมด 1 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต

การทำงานในโหมดนี้จะคล้ายกับโหมด 0 แต่จะใช้งานรีจิสเตอร์ TL1 ครบ 8 บิต และ TH1 ครบ 8 บิต ดังนั้นในโหมดนี้ค่าของการนับจะมีขนาด 16 บิต คือ 0000H-FFFFH เมื่อทำการนับครบรอบ ค่าของการนับจะเปลี่ยนจาก FFFFH เป็น 0000H ก็จะทำการเซตบิต TF1 ในรีจิสเตอร์ TCON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การทำงานในโหมด 2 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิตแบบตั้งค่าอัตโนมัติ

การทำงานในโหมดนี้จะแยกรีจิสเตอร์ไทเมอร์ออกเป็น 2 ตัว ตัวละ 8 บิต โดยรีจิสเตอร์ TL1ทำหน้าที่เป็นตัวนับค่า ส่วน TH1 ใช้ในการเก็บค่าเริ่มต้นของการนับ เมื่อเริ่มต้นการทำงาน ค่าของรีจิสเตอร์ TH1 จะถูกส่งไปยังรีจิสเตอร์ TL1 ทำให้เมื่อเริ่มต้นการทำงานค่าของรีจิสเตอร์ TL1 และ TH1 จะเหมือนกัน เมื่อ TL1 นับถึง FFH และจะเริ่มต้นการนับรอบใหม่ จะทำการเซตบิต TF1 พร้อม ๆ กับทำการรับค่าการนับเริ่มต้นจาก TH1 ใหม่โดยอัตโนมัติ หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า รีโหลด (reload) แม้ว่าจะมีการส่งค่าเริ่มต้นไปยัง TL1 แล้วก็ตาม ค่าของข้อมูลในรีจิสเตอร์ TH1 ก็ยังคงเป็นค่าเดิม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนกว่าจะมีการกำหนดค่าใหม่ด้วยกระบวนการทางซอฟท์แวร์

4) การทำงานในโหมด 3 : ไทเมอร์/เคาน์เตอร์แยกส่วนหรือไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิต

ในโหมดนี้เป็นโหมดเดียวที่การทำงานของไทเมอร์ 0 และไทเมอร์ 1 ไม่เหมือนกัน ขออธิบายในส่วนของไทเมอร์ 1 ก่อน เมื่อเข้าสู่โหมดนี้ จะเป็นการสั่งให้ไทเมอร์/เคาน์เตอร์หยุดนับ ค่าของการนับก่อนหน้านี้จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ไทเมอร์ 1 มีลักษณะการทำงานเหมือนกับการดิสเอเบิลไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1 ด้วยการเคลียร์บิต TF1 ในรีจิสเตอร์ TCON

ส่วนการทำงานของไทเมอร์ 0 ในโหมดนี้จะแยกรีจิสเตอร์ไทเมอร์ 0 ออกเป็น 2 ตัว ตัวละ 8 บิต คือรีจิสเตอร์ TL0 และ TH0 โดยแยกการทำงานออกจากกัน รีจิสเตอร์ TL0 สามารถเลือกการทำงานได้เหมือนกับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ตามปกติ ส่วนรีจิสเตอร์ TH0 สามารถทำงานในโหมดไทเมอร์ได้เพียงอย่างเดียว กล่าวคือ สามารถรับสัญญาณอินพุทจากสัญญาณนาฬิกาภายในเพียงทางเดียวเท่านั้น แต่การแจ้งการนับเกินยังคงเหมือนเดิม หากแต่ TL0 แจ้งผ่านบิต TF0 ในขณะที่ TH0 จะแจ้งผ่านทางบิต TF1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 อินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

การอินเตอร์รัปต์ (Interrupt) เป็นชื่อเรียกกระบวนการที่เข้ามาขัดจังหวะการทำงานโดยปกติของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ AT89S8252 สามารถตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ได้จาก 6 แหล่งกำเนิด ประกอบด้วย การรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกผ่านทางขา $\overline{\text{INT0}}$ และ $\overline{\text{INT1}}$, สัญญาณอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์/เคาน์เตอร์ T0, T1 และ T2 และสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์

5.4.1 การจัดการอินเตอร์รัปต์

เมื่อมีการอินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เกิดขึ้น และมีการอีนาเบิลการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ไว้ กระบวนการหลังจากนั้นซีพียูจะทำการกระโดดไปยังแอดเดรสในหน่วยความจำที่กำหนดไว้ เรียกตำแหน่งแอดเดรสนี้ว่า แอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ (Interrupt vector address) ดังนั้นจะต้องมีการเขียนโปรแกรมย่อยการบริการอินเตอร์รัปต์ไว้ที่แอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์นี้ โดยค่าของแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จะแตกต่างกันไปในการอินเตอร์รัปต์แบบต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดดังนี้

การอินเตอร์รัปต์ภายนอกที่ขา $\overline{\text{INT0}}$ มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 0003H
การอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 0 มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 000BH
การอินเตอร์รัปต์ภายนอกที่ขา $\overline{\text{INT1}}$ มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 0013H
การอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 1 มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 001BH
การอินเตอร์รัปต์จากพอร์ตอนุกรม มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 0023H
การอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 2 มีค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์อยู่ที่ 002BH

5.4.2 การเขียนโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัปต์

มีหลักการโดยทั่ว ๆ ไป ดังนี้

1. ต้องเริ่มต้นด้วยแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์เสมอ เพื่อให้การตรวจสอบการทำงานทำได้ง่าย และแยกส่วนของโปรแกรมย่อยนี้ออกจากโปรแกรมหลักหรือโปรแกรมย่อยอื่น ๆ อย่างชัดเจนด้วยคำสั่ง ORG xxxxH (ค่าแอดเดรสอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์)

2. เมื่อเข้าสู่โปรแกรมย่อย ควรเก็บค่าของรีจิสเตอร์หรือแฟลกที่ใช้แสดงสถานะต่าง ๆ ซึ่งต้องมีการใช้งานในโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัปต์นี้ไว้ในสแต็กเสียก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นต่อการทำงานของทั้งโปรแกรมบริการอินเตอร์รัปต์นี้และโปรแกรมหลัก ด้วยคำสั่ง PUSH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อเขียนโปรแกรมบริการอินเตอร์รัปต์เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการคืนค่าของรีจิสเตอร์ที่นำมาใช้ในโปรแกรมบริการอินเตอร์รัปต์ด้วยคำสั่ง POP ยกเว้นรีจิสเตอร์ที่ต้องการนำผลการกระทำในโปรแกรมบริการอินเตอร์รัปต์นี้ไปใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติจริง ไม่พบมากนัก และไม่แนะนำให้เขียนโปรแกรมในลักษณะนี้

4. ปิดท้ายโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัปต์ด้วยคำสั่ง RETI เสมอ

5.4.3 รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการบริการอินเตอร์รัปต์

การอินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช มีรีจิสเตอร์ที่ต้องเกี่ยวข้องอยู่ 2 ตัว ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) รีจิสเตอร์อีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์ หรือ IE (Interrupt Enable register)

มีแอดเดรสอยู่ที่ A8H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ฟังก์ชั่นพิเศษ หรือ SFR มีขนาด 8 บิต สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต โดยสามารถเซตและเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟท์แวร์ ใช้ในการอีนาเบิลการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ในแบบต่าง ๆ มีรายละเอียดการทำงานดังนี้

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

EA (Global enable/disable interrupt bit) : ใช้ในการอีนาเบิลและดิสเอเบิลการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ทั้งหมด

"0" ดิสเอเบิลการอินเตอร์รัปต์ นั่นคือ กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ ไม่ว่าจะมาจากแหล่งกำเนิดใดก็ตาม

"1" อีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์ นั่นคือ กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถตอบสนองการอินเตอร์รัปต์จากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

นั่นคือ ถ้าต้องการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ไม่ว่าจะแหล่งกำเนิดใด จะต้องเซตบิตนี้ก่อนเสมอ

ET2 (Timer 2 interrupt enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวหรือการแคปเจอร์ ในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 จะมีเฉพาะในเบอร์ AT89C52 และอนุกรม AT89Sxx เท่านั้น

ES (Serial port interrupt enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการรับหรือส่งข้อมูลทางพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ET1 (Timer 1 interrupt enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1

EX1 (External interrupt 1 enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากสัญญาณภายนอกที่ป้อนเข้ามายังขา $\overline{\text{INT1}}$

ET0 (Timer 0 interrupt enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0

EX0 (External interrupt 0 enable bit) : ใช้ในการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากสัญญาณภายนอกที่ป้อนเข้ามายังขา $\overline{\text{INT0}}$

สำหรับบิต 6 ของรีจิสเตอร์ IE ไม่มีการใช้งาน ต้องกำหนดให้เป็น "0" เสมอ.

2) รีจิสเตอร์จัดลำดับความสำคัญการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ หรือ IP (Interrupt Priority register)

มีแอดเดรสอยู่ที่ B8H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ฟังก์ชั่นพิเศษหรือ SFR มีขนาด 8 บิต สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต โดยสามารถเซตและเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟท์แวร์ ใช้ในการเลือกลำดับความสำคัญของการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์ว่า ต้องการให้ตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากแหล่งกำเนิดใดเป็นลำดับก่อนหลัง ถ้าต้องการให้การอินเตอร์รัปต์จากแหล่งกำเนิดใดมีความสำคัญสูงสุด ให้กำหนดที่บิตนั้นเป็น "1" มีรายละเอียดของรีจิสเตอร์ IP ดังนี้

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

PT2 (Timer 2 interrupt priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวหรือการแคปเจอร์ในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 จะมีเฉพาะในเบอร์ AT89C52 และอนุกรม AT89Sxx เท่านั้น

PS (Serial port interrupt priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการรับหรือส่งข้อมูลทางพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

PT1 (Timer 1 interrupt priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1

PX1 (External interrupt 1 priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากสัญญาณภายนอกที่ป้อนเข้ามายังขา $\overline{\text{INT1}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PT0 (Timer 0 interrupt priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากการโอเวอร์โฟลวในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0

PX0 (External interrupt 0 priority bit) : ใช้ในการกำหนดความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์อันเนื่องมาจากสัญญาณภายนอกที่ป้อนเข้ามายังขา $\overline{\text{INT0}}$

สำหรับบิต 6 และ 7 ของรีจิสเตอร์ IP ไม่มีการใช้งาน ต้องกำหนดให้เป็น "0" เสมอ

5.4.4 แหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์

ในที่นี้จะกล่าวถึงสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์/เคาน์เตอร์ T0 และ T1 ตามที่ได้ใช้งานเท่านั้น

สัญญาณอินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์/เคาน์เตอร์ T0 และ T1

แหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์นี้จัดเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายในแบบหนึ่ง โดยใช้การเกิดโอเวอร์โฟลวจากการนับค่าในไทเมอร์/เคาน์เตอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เมื่อไทเมอร์ 0 เกิดการโอเวอร์โฟลวก็จะทำการเซตบิต TF0 ในรีจิสเตอร์ TCON และถ้าไทเมอร์ 1 เกิดโอเวอร์โฟลวบิต TF1 ในรีจิสเตอร์ TCON จะได้รับการเซตเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามการอินเตอร์รัปต์แบบนี้ จะเกิดขึ้นหรือมีการตอบสนองก็ต่อเมื่อมีการอีนาเบิลการอินเตอร์รัปต์ โดยการเซตบิต EA, ET0 และ ET1 ในรีจิสเตอร์ IE

5.4.5 ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์

การกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ในในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ AT89S8252 มีได้จาก 6 แหล่ง ดังนั้นจึงต้องมีการจัดลำดับความสำคัญ ในกรณีที่เกิดการอินเตอร์รัปต์ขึ้นพร้อม ๆ กันจากหลายแหล่งกำเนิด โดยสามารถกำหนดลำดับความสำคัญได้ที่รีจิสเตอร์ IP

อย่างไรก็ตาม ลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์โดยปกติหรือในกรณีกำหนดข้อมูลในรีจิสเตอร์ IP ให้เป็น "1" ทุกบิต (ยกเว้นบิต 6 และ 7) จะเรียงลำดับจากความสำคัญสูงสุดไปจนถึงต่ำสุดดังนี้

1. อินเตอร์รัปต์ภายนอกที่ขา $\overline{\text{INT0}}$ หรือการเซตของบิต IE0
2. อินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 0 หรือการเซตของบิต TF0
3. อินเตอร์รัปต์ภายนอกที่ขา $\overline{\text{INT1}}$ หรือการเซตของบิต IE1
4. อินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 1 หรือการเซตของบิต TF1
5. อินเตอร์รัปต์จากพอร์ตอนุกรม หรือการเซตของบิต RI หรือ TI
6. อินเตอร์รัปต์จากไทเมอร์ 2 หรือการเซตของบิต TF2 หรือ EXF2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD Module)

5.5.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD

ในโมดูล LCD จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ 3 ส่วน ดังนี้

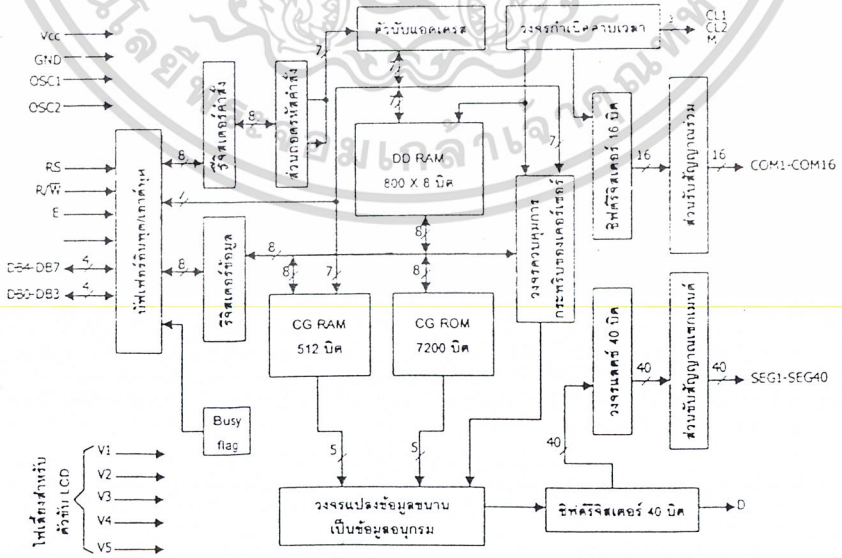
ตัวแสดงผล (Display) ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ LCD

ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุมโดยเฉพาะ ชิปที่นิยมใช้คือ *เบอร์ HD44780* และ *HD61830* โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักขระ ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟิก

ตัวขับ (Driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับนี้ได้แก่ *เบอร์ HD44100H* และ *MSM5259* เป็นต้น

5.5.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD

ในการใช้งานโมดูล LCD จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้าง และคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมให้ดีเสียก่อน ในรายงานนี้ขอยกตัวอย่างโมดูล LCD แบบอักขระ เพราะสามารถเข้าใจได้ง่าย ให้รูปที่ 1 เป็นบล็อกไดอะแกรมภายในของชิปควบคุม LCD เบอร์ HD44780 ซึ่งใช้ในโมดูล LCD แบบอักขระ ประกอบด้วย



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD แบบอักขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัฟเฟอร์อินพุทเอาท์พุท เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก เพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม

รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register : IR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อนำไปควบคุมการแสดงผล

รีจิสเตอร์ข้อมูล (Data Register : DR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อถ่ายทอดต่อไปยังหน่วยความจำที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษรเพิ่มเติมในแรมเก็บตัวอักษร

แรมเก็บข้อมูลแสดงผล (Display Data RAM : DDRAM) เป็นหน่วยความจำแรมทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR ตัวควบคุมจะนำข้อมูลใน DDRAM นี้ไปเปิดตาราง (Look up-lable) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรอม และแรมเก็บตัวอักษร เพื่อนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล

รอมเก็บตัวอักษร (Character Generator ROM : CGROM) เป็นหน่วยความจำรอมที่ใช้เก็บข้อมูลตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7,200 บิต โดยจะถูกอ่านด้วยค่าของข้อมูลใน DDRAM

แรมเก็บตัวอักษร (Character Generator RAM : CGRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นใหม่ ในกรณีที่ตัวอักษรใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้นทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุมจะมาอ่านค่าจาก CGRAM เอง

แฟลก BUSY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่า ตัวควบคุมพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้นก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมต้องตรวจสอบสถานะของแฟลก BUSY นี้เสียก่อน

5.5.3 โมดูล LCD ขนาด 24 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 24x2)

สำหรับโมดูล LCD ที่นำมาใช้ในการทำโครงงานนี้ เป็นขนาด 24 ตัวอักษร 2 บรรทัด เนื่องจากมีขนาดที่เหมาะสมกับโครงงานนี้

โมดูล LCD ขนาด 24x2 มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา สำหรับรายละเอียดการทำงานของแต่ละขามีดังนี้

- V_{SS} (ขา 1) : ต่อกราวด์
- V_{DD} (ขา 2) : ต่อไฟเลี้ยง +5 โวลท์
- V_O (ขา 3) : เป็นขาอินพุทรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- RS (ขา 4) : เป็นขาอินพุทใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น "0" ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขานี้เป็น "1" ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล
- R/$\overline{W}$ (ขา 5) : เป็นขาที่ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD ถ้าเป็น "0" เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น "1" จะเป็นการอ่านข้อมูล
- E (ขา 6) : เป็นขาอีนาเบิล LCD ให้ทำงาน
- D0-D7 (ขา7-14) : เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอกขนาด 8 บิต

5.5.4 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม แน่นอนว่าต้องกำหนดให้ขา RS และ R/$\overline{W}$ เป็น "0" แล้วเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งควบคุมโมดูล LCD ของชิปควบคุม HD44780 ที่สำคัญมี 10 คำสั่งดังนี้

1) คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (Clear display)

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซิคิวต์คำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/D (ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง) ให้เป็น "1"

2) คำสั่ง return home

ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูลเป็น "1" เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล แต่ข้อมูลบนจอแสดงผลไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ ข้อมูลคำสั่งของคำสั่งนี้จะเป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

3) คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล (Entry mode Set)

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	0	1	I/D	S

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากบิต S เป็น "1" เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล ตัวเคอร์เซอร์จะอยู่กับที่ แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่ถ้าหากบิตนี้เป็น "0" เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ตัวเคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต I/D เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว ทำให้แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็น "0" แอดเดรสจะลดลง

ดังนั้น ข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ได้แก่ 04H-07H(4 ข้อมูลคำสั่ง) และที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึง *กำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ และแอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้น*

4) คำสั่งควบคุมการแสดงผล

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	0	1	D	C	B

บิต D ใช้ควบคุมการเปิดปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น "1" จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น "0" จะเป็นการปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนจอแสดงผล ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น "1" ถ้ากำหนดให้เป็น "0" จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์ หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกะพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น "1" เคอร์เซอร์จะกะพริบ

ดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H-0FH (8 รูปแบบคำสั่ง) ที่ใช้บ่อยคือ 0CH *เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์ และ* 0FH *เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แสดงเคอร์เซอร์ และ สั่งให้เคอร์เซอร์กะพริบ*

5) คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับการกำหนดบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S/C	R/L	ลักษณะการเลื่อน	ข้อมูลคำสั่ง
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย	10H-13H
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H-17H
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H-1BH
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา	1CH-1FH

6) คำสั่งกำหนดฟังก์ชั่นการทำงาน

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	0	1	DL	N	F	*	*

บิต DL ใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น "0" จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต แต่ถ้าเป็น "1" จะเป็นแบบ 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น "0" จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น "1" จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลสามารถแสดงได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลมากกว่า 2 บรรทัด ก็กำหนดบิต N นี้ให้เป็น "1"

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรให้การแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น "0" จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x7 จุด และถ้าเป็น "1" จะแสดงผลเป็นแบบ 5x10 จุด

ข้อมูลคำสั่งที่ใช้บ่อยคือ 38H *เป็นการกำหนดให้โมดูล LCD ทำงานในแบบ 8 บิต แสดงผล 2 บรรทัด และเลือกความละเอียดเป็น 5x7 จุด*

จุดที่น่าสังเกตคือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด แม้จะมีบรรทัดการแสดงผลเพียง 1 บรรทัด แต่จะต้องกำหนด N ให้เป็น "1" เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM แบ่งเป็น 2 ช่อง คือ 00H และ 40H

7) คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้บิต 7 เป็น "0" บิต 6 เป็น "1" ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะแทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ ก่อนที่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่าง 00H-3FH

8) คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น "1" และข้อมูลอีก 7 บิตที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 00H-67H ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสยังขึ้นกับการกำหนดสถานะที่บิต N ด้วย หากบิต N เป็น "0" แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 00H-4FH และถ้าบิต N เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วงคือ 00H-27H และ 40H-67H ซึ่งในโครงงานนี้ได้ใช้ LCD โมดูลแบบ 24 ตัวอักษร 2 บรรทัด ดังนั้นเมื่อให้บิต N เป็น "1" จะได้แอดเดรสของ DDRAM ในบรรทัดแรกเป็น 00H-17H และในบรรทัดที่สองเป็น 40H-57H

9) คำสั่งอ่านแฟลก BUSY และแอดเดรส

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านแฟลก BUSY (BF) โดยแฟลกนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น "0" แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น "1" แสดงว่า ขณะนี้ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง

เมื่อต้องการอ่านแฟลกต้องกำหนดให้ขา R/$\overline{W}$ เป็น "1" ด้วย แต่สัญญาณที่ RS ยังต้องเป็น "0" อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง

นอกจากนี้ ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0 ถึง บิต 6 เป็นค่าข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

นอกจากนี้ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0 ถึง บิต 6 เป็นค่าข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

5.5.5 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

ในการเขียนข้อมูลเพื่อควบคุมให้โมดูล LCD แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (instruction) แล้วกำหนดโหมดการทำงานให้แก่โมดูล LCD ก่อน จากนั้นจึงค่อยส่งข้อมูล (data) ที่ต้องการแสดงผล เนื่องจากบัสข้อมูลของโมดูล LCD มี 8 เส้นคือ D0-D7 และใช้เป็นทางผ่านของทั้งคำสั่งและข้อมูล ดังนั้นในการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องอาศัยการกำหนดสัญญาณลอจิกที่ขา RS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากที่ขา RS ได้ลอจิก "0" หมายความว่า ข้อมูลที่ป้อนให้แก่โมดูล LCD ขณะนั้นเป็นคำสั่ง ในทางตรงข้าม หากขา RS ได้รับลอจิก "1" ข้อมูลที่ป้อนให้ขณะนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ในการแสดงผล

เมื่อต้องการเขียนหรืออ่านข้อมูลใน CGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอดเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น "1" เพื่อแจ้งให้ตัวควบคุมภายในโมดูล LCD ทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติไม่ใช่คำสั่ง

ในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลต้องกำหนดให้ขา $R/\overline{W}$ เป็น "1" ข้อมูลขนาด 8 บิต (หรือ 4 บิต) ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลที่อ่านออกมาได้จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสของ CGRAM หรือ DDRAM ตามที่ต้องการ

ในกรณีที่ต้องการเขียนข้อมูล เมื่อกำหนดแอดเดรสและป้อนลอจิก "1" ให้ขา RS แล้ว ต้องกำหนดให้ขา $R/\overline{W}$ เป็น "0" ข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ DR จากนั้นจึงถ่ายทอดลงใน DDRAM ต่อไป

5.5.6 จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล

ในการติดต่อกับโมดูล LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD โมดูล แปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เรียบร้อยก่อน จากนั้นจึงจะรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไป

ดังนั้น ในการใช้งานโมดูล LCD ผู้เขียนโปรแกรมต้องมีโปรแกรมเพื่อหน่วงเวลารอให้โมดุล LCD พร้อมทำงานด้วย โดยเมื่อเริ่มจ่ายไฟให้แก่โมดูล LCD ต้องรอประมาณ 10 มิลลิวินาที เพื่อให้โมดูล LCD ทำการเตรียมความพร้อมหรืออินนิเชียล (initial) หลังจากนั้นก็จะกำหนดลอจิกให้แก่ขา RS ของโมดูล LCD แล้วต้องหน่วงเวลาอีกประมาณ 2 มิลลิวินาที เพื่อให้คอนโทรลเลอร์ใน LCD โมดูล แปลความหมายของลอจิกที่ RS ว่า ข้อมูลต่อไปที่จะได้รับนั้นเป็นรหัสคำสั่งหรือเป็นข้อมูลที่ต้องการแสดงผล จากนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลมารอที่บัสข้อมูล D0-D7 (กรณีทำงานในโหมด 8 บิต) ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณพัลส์ไปที่ขา E เพื่ออีนาเบิลโมดูล LCD ให้รับข้อมูลจากบัสข้อมูลเข้าไป โดยพัลส์ที่ป้อนเข้าที่ขา E ของโมดูล LCD ต้องเป็นพัลส์ขอบขาขึ้น จากนั้นทำการหน่วงเวลา 2 มิลลิวินาที

ทั้งหมดที่กล่าวมา คือ ขั้นตอนและจังหวะในการทำงาน 1 รอบของโมดูล LCD จะเห็นได้ว่ามีโปรแกรมย่อยที่สำคัญอยู่ 3 โปรแกรมย่อยคือ โปรแกรมอินนิเชียล LCD, โปรแกรมหน่วงเวลา และโปรแกรมย่อยการส่งพัลส์เพื่ออีนาเบิลโมดูล LCD

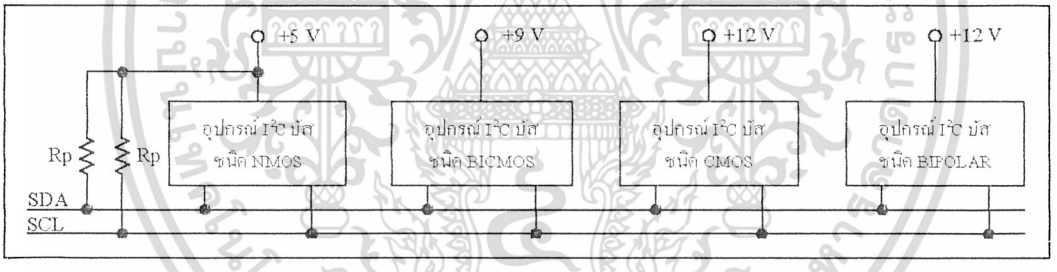
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุทด้วยอุปกรณ์ระบบบัส I^2C

5.6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ I^2C

I^2C ย่อมาจาก Inter-IC Communication หมายถึง การติดต่อสื่อสารระหว่างไอซีโดยบัส I^2C ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นโดยฟิลิปส์ (Phillips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อ สั่งงาน และควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น เส้นหนึ่ง คือ สายข้อมูล อีกเส้นหนึ่ง คือ สายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I^2C ทำได้ง่ายมาก เพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัว จะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสภาวะลอจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว

สายข้อมูลบนบัส I^2C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สายข้อมูลอนุกรมหรือ SDA (Serial Data line) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกามีชื่อเรียกว่า สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรมหรือ SCL (Serial Clock line) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า สาย SDA และ SCL



รูปที่ 5.4 ผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนระบบบัส I^2C

ในรูปที่ 5.4 แสดงผังของการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ บนบัส I^2C จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อบนบัส I^2C มีหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุท (I/O Expander), ไอซีแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) และแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอก (DAC), ไอซีรีลไทม์คล็อก (RTC), ไอซีขับโมดูล LCD, หน่วยความจำอีอีพรอม และไมโครคอมพิวเตอร์

5.6.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I^2C

สาย SDA และ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (Bi-directional line) ต้องมีการต่อตัวต้านทานพูลอัปกับแรงดัน +5V ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงในขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน ทั้งยังช่วยในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสอง วงจรเอาท์พุทของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I^2C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรเดรนเปิด(Open-drain) หรือคอลเล็คเตอร์เปิด (Open-collector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการถ่ายทอดข้อมูลบนบัส I^2C สูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปกติ (Standard mode) และสูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง (Fast mode) อุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่บนบัส I^2C จะต้องมีค่าความจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นระหว่างสาย SDA และ SCL ไม่เกิน 400 pF^- การเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C ใช้ข้อมูลสำหรับการเข้าถึง 2 ค่า คือ 7 บิต (7-bits addressing) หรือ 10 บิต (10-bits addressing)

ข้อเด่นอีกประการหนึ่งของบัส I^2C คือ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยอุปกรณ์บนบัส I^2C ตัวหนึ่งอาจใช้ไฟเลี้ยง +5V ในขณะที่อีกตัวหนึ่งใช้ไฟเลี้ยง +12V การต่อร่วมกันบนบัส I^2C สามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกับกรณีที่อุปกรณ์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยงเท่ากัน กล่าวคือ ให้ต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน และต้องต่อตัวต้านทานพูลอัป (R_p) เข้ากับแรงดัน +5V ไว้ด้วยเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

5.6.3 หลักการของบัส I^2C

บัส I^2C ประกอบด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ SDA และ SCL อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงบนบัสสามารถมีได้มากมาย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบของการติดต่อบนบัส หรือเรียกว่า โปรโตคอล (Protocol) เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่า ขณะนี้อุปกรณ์ใดติดต่อกันอยู่ และอุปกรณ์ตัวใดเป็นตัวรับหรือตัวส่ง ต่อไปนี้จะขออธิบายลักษณะ หน้าที่ และนิยามของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I^2C เพื่อเป็นข้อตกลงพื้นฐานก่อนที่จะอธิบายการทำงานของบัส I^2C ต่อไป

อุปกรณ์ที่เป็นผู้สร้างข้อมูลหรือส่งข้อมูล เรียกว่า ตัวส่ง (Transmitter)

อุปกรณ์ที่เป็นผู้รับข้อมูล เรียกว่า ตัวรับ (Receiver)

ในอุปกรณ์บนบัส I^2C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง บางอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวรับเพียงอย่างเดียว จะไม่มีอุปกรณ์ใดบนบัส I^2C ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งเพียงอย่างเดียว

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการติดต่อบนบัส I^2C เรียกว่า มาสเตอร์ (Master)

อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I^2C เรียกว่า สเลฟ (Slave)

ข้อกำหนด 2 ประการสำคัญของการติดต่อบนบัส I^2C คือ

(1) การถ่ายทอดข้อมูลจะเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น

(2) ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูง สายข้อมูลต้องรักษาข้อมูลไว้ อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเด็ดขาด มิฉะนั้น สัญญาณที่เกิดขึ้นจะได้รับการแปลความหมายเป็นสัญญาณควบคุมแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.4 สภาวะที่เกิดขึ้นบนบัส I^2C

มีด้วยกัน 5 สภาวะ ดังนี้

(1) **บัสว่าง** (Bus not busy) สภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่อสถานะลอจิกบนสาย SDA และ SCL เป็นลอจิกทั้งคู่ นั่นหมายความว่า การถ่ายทอดข้อมูลสามารถเริ่มต้นขึ้นได้

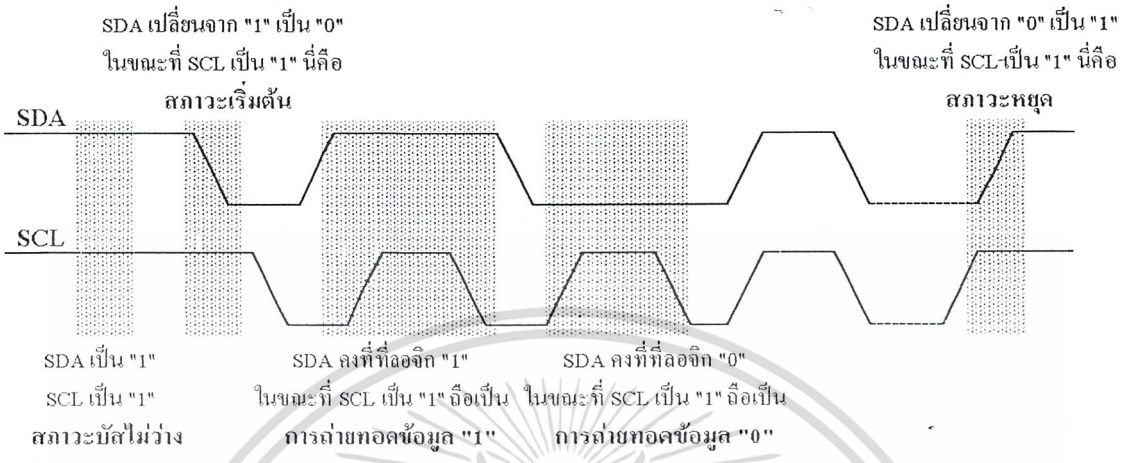
(2) **เริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูล** (Start data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า **สภาวะเริ่มต้น (START)**

(3) **หยุดการถ่ายทอดข้อมูล** (Stop data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากต่ำไปสูง ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า **สภาวะหยุด (STOP)**

(4) **ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส** (Data valid) สภาวะนี้เกิดขึ้นถัดจากสภาวะเริ่มต้น โดยสถานะลอจิกที่เกิดขึ้นบนสาย SDA ก็คือข้อมูลที่ทำการถ่ายทอด เมื่อสาย SCL เป็นลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ข้อมูลในจังหวะนั้นว่า เป็น "0" หรือ "1" ข้อมูลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการให้เกิดการถ่ายทอดข้อมูลอย่างสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่ SDA ต้องคงที่ตลอดช่วงเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะลอจิกในขณะที่สาย SCL มีลอจิกสูงอยู่นั้น อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ทำการควบคุมการถ่ายทอดข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสภาวะหยุดหรือสภาวะเริ่มต้นก็ได้ ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้น

(5) **รับรู้ข้อมูล** (Acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากที่การถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิต เรียกว่า บิตรับรู้ (Acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังจากส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์มาสเตอร์จะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เพื่อตอบสนองบิตรับรู้ที่ส่งมาจากตัวส่ง ทางด้านตัวรับจะส่งบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำลงบนบัส อุปกรณ์สเลฟที่ถูกอ้างถึงในการติดต่อหรือกำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำเนิดบิตรับรู้เพื่อตอบสนองให้ทราบว่าได้รับข้อมูลในแต่ละไบต์เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ไดอะแกรมเวลาแสดงสถานะต่าง ๆ ในบัส I^2C

ในรูปที่ 5.5 เป็นไดอะแกรมเวลาที่แสดงถึงการเกิดสภาวะต่าง ๆ บนบัส I^2C ไม่ว่าจะเป็นสภาวะบัสว่าง, เริ่มต้น, ถ่ายทอดข้อมูล, รับรู้, และหยุดการถ่ายทอดข้อมูล

5.6.5 การทำงานบนบัส I^2C

ก่อนที่จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่ออยู่บนบัส ต้องมีการอ้างถึงเสียก่อนโดยการอ้างถึงอุปกรณ์บนบัส I^2C นั้นจะใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตหรือ 10 บิต ในกรณีที่มีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสไม่มาก ใช้การอ้างถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอ แต่ถ้ามีอุปกรณ์ต่ออยู่บนบัสมากกว่า 127 แอดเดรส จำเป็นต้องใช้การอ้างถึงแบบ 10 บิต หลังจากที่ติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวได้เรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มต้นการถ่ายทอดข้อมูลกันต่อไป

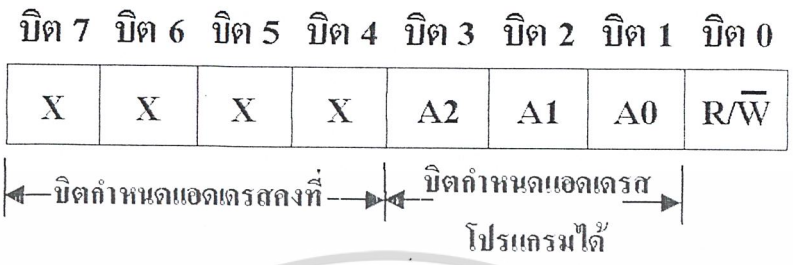
ดังนั้นหัวใจสำคัญในอันดับแรกของการทำงานบนบัส I^2C คือการอ้างถึงอุปกรณ์แต่ละตัว ซึ่งในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของการอ้างถึงทั้ง 2 รูปแบบ

การอ้างถึงแบบ 7 บิต (7 bits addressing)

ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังจากสภาวะเริ่มต้นคือ ข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ หรือ ข้อมูลกำหนดแอดเดรส โดยมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 6 ใน 7 บิตบนรวมทั้งบิต MSB ด้วยจะเป็นข้อมูลแอดเดรสของอุปกรณ์สเลฟที่ต้องการติดต่อ โดยแบ่งเป็น *บิตแอดเดรสคงที่ (Fixed address bit)* จำนวน 4 บิต ซึ่งข้อมูลนี้อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิตเป็น *บิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable address bit)* โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้แก่ขา A0-A2 ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I^2C ส่วนในบิต LSB เป็นบิตที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สเลฟตัวนั้น ๆ หากบิต LSB เป็น "0" หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น "1" จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ



รูปที่ 5.6 รูปแบบของข้อมูลกำหนดแอดเดรสที่ใช้ในการอ้างถึงแบบ 7 บิต

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลควบคุม (Control byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวมีการกำหนดข้อมูลควบคุมที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่าง ไอซีขยายพอร์ตมีข้อมูลควบคุมที่ใช้กำหนดว่า บิตใดเป็นอินพุท บิตใดเป็นเอาท์พุท ในขณะที่ไอซี ADC/DAC ต้องการข้อมูลควบคุมเพื่อกำหนดให้ทำงานเป็นวงจร ADC หรือ DAC เป็นต้น

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดจริง (Data)

หลังจากที่มีการถ่ายทอดข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณรับรู้ตอบกลับมาด้วยทุกครั้ง เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้

การอ้างถึงแบบ 10 บิต

ในการอ้างถึงแบบนี้ยังคงใช้รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกับแบบ 7 บิต หากแต่จะมีข้อมูลเพิ่มเติมขึ้นมาเล็กน้อย โดยในข้อมูลไบต์แรกหลังจากเกิดสภาวะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิตบนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิตถัดมาเป็นบิตแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรกยังคงเป็นการกำหนดว่า ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลแอดเดรสในไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุม ข้อมูลหลังจากนั้นก็จะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อเช่นเดียวกับการอ้างถึงแบบ 7 บิต หลังจากถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสภาวะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้ ในรูปที่ 8 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมของการอ้างถึงแบบ 10 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.6 อุปกรณ์ที่ใช้การเชื่อมต่อแบบบัส I^2C

ในปัจจุบัน บัส I^2C ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยข้อดีที่ชัดเจนคือ ใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น และการขยายระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีจำนวนอินพุทเอาท์พุทและหน่วยความจำจำกัด สามารถทำได้ง่ายขึ้นด้วยระบบบัส I^2C เมื่อเป็นเช่นนี้จึงมีอุปกรณ์เพอริเพอรัลที่ใช้การเชื่อมต่อแบบบัส I^2C มากมายจากหลายผู้ผลิตออกมาให้ได้ใช้งานกัน ดังมีตัวอย่างต่อไปนี้

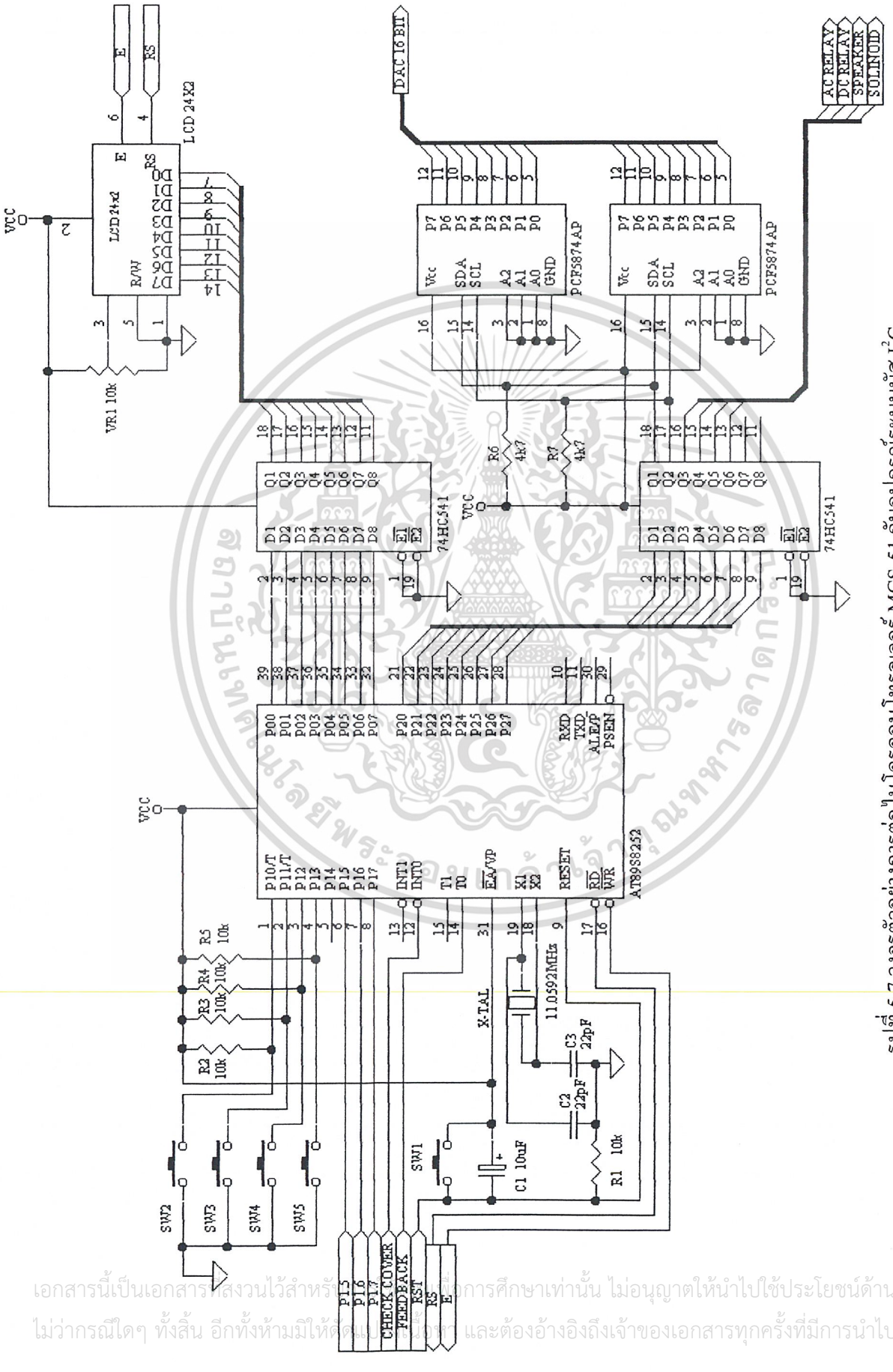
- ไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุท (I/O expander) เบอร์ PCF8574, PCF8582, PCF8584
- ไอซีหน่วยความจำอีอีพรอมอนุกรม (Serial EEPROM) เบอร์ 24Cxx, PCF8570,PCF72/73
- ไอซี ADC/DAC เบอร์ PCF8591
- ไอซีรีลไทม์คล็อก (Real-time clock) เบอร์ PCF8583, PCF8593, PCF8598, 41T56C
- ไอซีขับ LCD โมดูล (LCD dirver) เบอร์ PCF8466, PCF8576, PCF8577/78, PCF8579, SAA1064
- ไอซีกำเนิดสัญญาณ DTMF (DTMF generator) เบอร์ PCD3311/12

5.6.7 การต่ออุปกรณ์ระบบบัส I^2C กับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

สามารถทำได้ง่ายมาก เพียงใช้ขาพอร์ต 2 ขา โดยกำหนดให้ขาหนึ่งเป็น SDA อีกขาหนึ่งเป็น SCL และต่อตัวต้านทานค่าประมาณ 4.7 kΩ พูลอัปที่ขาพอร์ตทั้งสองขา เพียงเท่านี้ก็สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ระบบบัส I^2C ได้แล้ว

ในรูปที่ 5.7 เป็นวงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เข้ากับระบบบัส I^2C จากวงจรจะใช้ขาพอร์ต P1.0 เป็นขา SDA และ P1.1 เป็นขา SCL อุปกรณ์ที่ทำการติดต่อด้วยคือไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุทเบอร์ PCF8574

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 วงจรตัวอย่างการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 กับอุปกรณ์ระบบบัส I^2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.8 การเขียนโปรแกรมติดต่อบัส I^2C

เริ่มต้นด้วยการสร้างสภาวะมาตรฐานของบัส I^2C อันประกอบด้วย สภาวะเริ่มต้น, สภาวะสิ้นสุดการส่งข้อมูล, สภาวะหยุด และ สัญญาณนาฬิกาบนขา SCL

การสร้างสภาวะเริ่มต้น

1. เมื่อต้องการติดต่อกับบัส I^2C สิ่งแรกที่ต้องทำสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์มาสเตอร์คือ การทำให้บัสว่างด้วยการกำหนดให้ขา SCL และ SDA มีลอจิกเป็น "1" ทั้งคู่
2. จากนั้นทำให้ขา SDA มีลอจิก "0" โดยที่ขา SCL ยังคงเป็นลอจิก "1" อยู่
3. กำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น "0" ถึงตอนนี้ทั้ง SCL และ SDA จะมีลอจิกเป็น "0" ทั้งคู่ พร้อมที่จะติดต่อได้แล้ว

การสร้างสภาวะหยุด

1. เมื่อต้องการหยุดส่งข้อมูลจะต้องส่งสภาวะหยุดออกไป โดยในตอนแรกต้องกำหนดให้ขา SCL และ SDA เป็นลอจิก "0" ทั้งคู่ก่อน
2. กำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น "1" โดย SDA ยังคงมีลอจิกเป็น "0"
3. จากนั้นทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น "1" ซึ่งจะทำให้ระบบบัสกลับเข้าบัสว่างอีกครั้ง พร้อมที่จะรับหรือส่งข้อมูลต่อไป

การส่งข้อมูลลอจิก "0" และลอจิก "1"

หลังจากที่ทำการส่งบิตเริ่มต้นแล้ว ลำดับต่อไปคือ จะต้องส่งข้อมูลควบคุมซึ่งจะเป็นขบวนของลอจิก "0" และลอจิก "1" สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก "0" ต้องดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ขา SDA เป็น "0" สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก "0"
2. ทำให้ขา SCL เป็น "1" สำหรับการป้อนสัญญาณนาฬิกา ในขณะที่ขา SDA ยังคงเป็น "0" อยู่
3. จากนั้นทำให้ขา SCL กลับมามีสถานะเป็นลอจิก "0" เหมือนเดิม

ในขณะที่การส่งข้อมูลลอจิก "1" มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ขา SDA มีลอจิกเป็น "1" สำหรับการส่งข้อมูลลอจิก "1"
2. ทำให้ขา SCL เป็น "1" สำหรับการส่งสัญญาณนาฬิกา ในขณะที่ขา SDA ยังคงเป็น "1" อยู่
3. จากนั้นทำให้ขา SCL กลับมามีสถานะเป็นลอจิก "0" เหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.9 การขยายจำนวนพอร์ตอินพุทเอาท์พุทด้วยไอซี PCF8574A

ข้อมูลเบื้องต้นของ PCF8574A

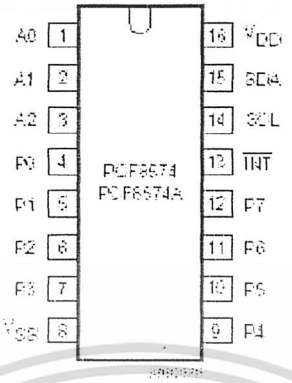
ไอซี PCF8574A มีคุณสมบัติดังนี้

- ทำงานที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 2.5V ถึง 6V
- กินกระแสในสภาวะสแตนด์บายต่ำเพียง 10 μA
- มีเอาท์พุทอินเตอร์รัปต์แบบเดรนเปิด
- เอาท์พุทสามารถขับกระแสได้สูง โดยสามารถนำไปขับ LED ได้โดยตรง และสามารถแลตช์ค่าได้
- สามารถกำหนดตำแหน่งแอดเดรสของไอซีแต่ละตัวได้ทางฮาร์ดแวร์ ด้วยขา A0-A2 ทำให้สามารถต่อพ่วงกันได้ถึง 8 ตัว

การจัดขาของไอซีPCF8574A แสดงในรูปที่ 5.8 การทำงานของแต่ละขาแสดงในตารางที่ 1 ขาพอร์ตทั้ง 8 ขาของ PCF8574A สามารถกำหนดให้เป็นอินพุทหรือเอาท์พุทได้โดยอิสระโดยไม่จำเป็นต้องใช้คำสั่งควบคุมเพื่อเลือกให้เป็นขาเอาท์พุทหรือขาอินพุท ลักษณะวงจรภายในของพอร์ตอินพุทเอาท์พุทแสดงในรูปที่ 5.9 เมื่อจ่ายไฟให้กับ PCF8574A ครั้งแรก ขาพอร์ตทั้ง 8 ขาจะมีลอจิกเป็น "1" ซึ่งจะเป็นการจ่ายกระแสมาจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่ภายในตัวไอซี ทำให้มีกระแสในขณะลอจิก "1" นี้เพียง 100 μA เท่านั้น ในกรณีที่ต้องการให้มีการจ่ายกระแสสูง ๆ จำเป็นต้องต่อตัวต้านทานพูลอัปเอาไว้ที่ขาพอร์ตเหล่านี้ด้วย

เมื่อต้องการให้ขาพอร์ตเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นอินพุทจะต้องส่งสัญญาณให้ขาเหล่านี้มีลอจิก "1" เสียก่อน เมื่อขาอินพุทได้รับสัญญาณจากภายนอกป้อนเข้ามา ไอซี PCF8574A จะสร้างสัญญาณอินเตอร์รัปต์ (INT) ป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือคอมพิวเตอร์รับรู้แทนการต้องคอยตรวจสอบขาอินพุทอยู่ตลอดเวลา สัญญาณอินเตอร์รัปต์นี้จะถูกรีเซต เมื่อมีการอ่านค่าข้อมูลหรือมีการเปลี่ยนค่าของอินพุทไปสู่ค่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

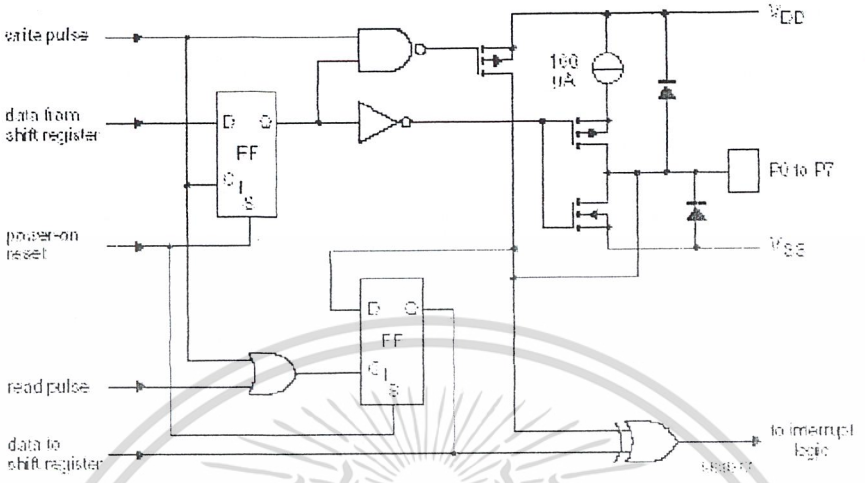


รูปที่ 5.8 การจัดขาของไอซีขยายพอร์ตอินพุทเอาท์พุท PCF8574/PCF8574A

ชื่อ	ตำแหน่งขา	หน้าที่
A0	1	อินพุทแอดเดรสตัวที่ 1
A1	2	อินพุทแอดเดรสตัวที่ 2
A2	3	อินพุทแอดเดรสตัวที่ 3
P0	4	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 0
P1	5	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 1
P2	6	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 2
P3	7	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 3
V_{SS}	8	กราวด์
P4	9	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 4
P5	10	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 5
P6	11	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 6
P7	12	พอร์ตอินพุทเอาท์พุท 2 ทิศทางบิต 7
INT	13	ขาเอาท์พุทอินเตอร์รัปต์(ทำงานที่ลอจิก 0)
SCL	14	ขาสัญญาณนาฬิกาสำหรับ I^2C บัส
SDA	15	ขาข้อมูลสำหรับ I^2C บัส
V_{DD}	16	ไฟเลี้ยง

ตารางที่ 1 รายละเอียดหน้าที่การทำงานของแต่ละขาของไอซี PCF8574/PCF8574A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 วงจรภายในขาพอร์ตของไอซี PCF8574/PCF8574A

การเขียนโปรแกรมควบคุม PCF8574A

เนื่องจาก PCF8574A มีการเชื่อมต่อเป็นแบบบัส I²C ดังนั้นการติดต่อจึงสามารถใช้โปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ, การสร้างสภาวะเริ่มต้น, สภาวะหยุด, การอ่าน และเขียนข้อมูลที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 ได้ ส่วนที่ต้องเปลี่ยนแปลงสำหรับ PCF8574A คือ ข้อมูลกำหนดแอดเดรส โดยข้อมูลของ PCF8574A มีรูปแบบดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	1	1	1	A2	A1	A0	R/$\overline{W}$

บิต A0, A1, A2 ใช้ในการระบุ PCF8574A ที่ใช้บนบอร์ดในกรณีที่มีการต่อ PCF8574 มากกว่า 1 ตัว โดยค่าของ A0-A2 จะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละตัว สามารถกำหนดได้ทางฮาร์ดแวร์ โดยการต่อขา A0-A2 เข้ากับไฟเลี้ยง +5V เพื่อกำหนดเป็นลอจิก "1" หรือกราวด์เพื่อกำหนดเป็นลอจิก "0" ดังนั้นค่าแอดเดรสของ PCF8574A 1 ตัวจึงต้องนำสถานะที่กำหนดทางฮาร์ดแวร์ที่ขา A0-A2 มารวมด้วยจึงจะสมบูรณ์ ส่วนบิต R/W ใช้กำหนดว่าต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับไอซี PCF8574A ยกตัวอย่าง ถ้าหากกำหนดขา A0-A2 ลงกราวด์ทั้งหมด และต้องการอ่านข้อมูลจาก PCF8574A ข้อมูลกำหนดแอดเดรสที่ต้องส่งให้แก่ PCF8574A คือ 01110001B เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอซี PCF8574A ยังมีอีกเบอร์หนึ่งในอนุกรมเดียวกัน นั่นคือ PCF8574 ซึ่งก็มีข้อมูลกำหนดแอดเดรสที่แตกต่างกับ PCF8574A แต่ฟังก์ชั่นการทำงานเหมือนกันทุกประการ โดยข้อมูลกำหนดแอดเดรสของ PCF8574 มีดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
0	1	0	0	A2	A1	A0	$R/\overline{W}$

ดังนั้น จึงสามารถต่อพ่วงไอซีในอนุกรม PCF8574x ได้สูงถึง 16 ตัว

การส่งหรือเขียนข้อมูลไปยัง PCF8574A โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมข้อมูลกำหนดแอดเดรสของ PCF8574A
2. เรียกโปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ
3. รอรับการตอบกลับจาก PCF8574A
4. ส่งข้อมูลไปยัง PCF8574A
5. เรียกโปรแกรมย่อยสภาวะหยุด

สำหรับการอ่านข้อมูลจาก PCF8574A มีลักษณะใกล้เคียงกันคือมีรูปแบบดังนี้

1. เตรียมข้อมูลกำหนดแอดเดรสของ PCF8574A
2. เรียกโปรแกรมย่อยการติดต่อกับอุปกรณ์สเลฟ
3. รอรับการตอบกลับจาก PCF8574A
4. อ่านข้อมูลจาก PCF8574A โดยใช้โปรแกรมย่อยการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์สเลฟ
5. เรียกโปรแกรมย่อยสภาวะหยุด

5.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอกแบบ R-2R

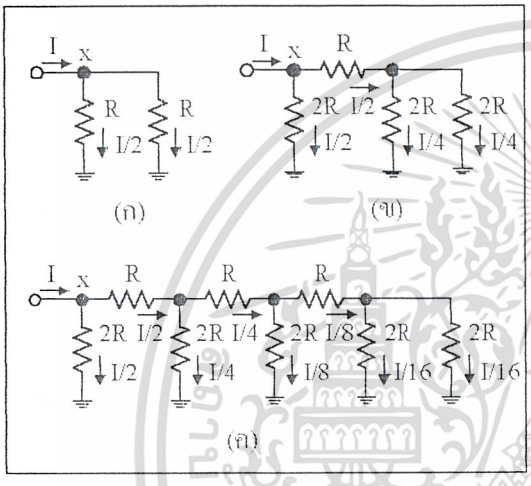
5.7.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวงจร DAC แบบ R-2R

วงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์เป็นวงจรอีกแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยม ทั้งนี้เนื่องจากสามารถหาอุปกรณ์ในการสร้างวงจรง่าย กระบวนการสร้างวงจร DAC จะเริ่มต้นจากวงจรตัวต้านทางต่อขนานกัน 2 ตัว ดังในรูปที่ 5.9 (ก) หากตัวต้านทานสองตัวมีค่าเท่ากัน กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทางทั้งสองตัวจะมีค่าเท่ากันคือ เท่ากับ I/2 จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าของตัวต้านทานเพื่อขยายสาขาของวงจรดังในรูปที่ 5.9 (ข) ค่าความต้านทานที่จุด X จะเท่ากัน ซึ่งก็คือ 2R ดังนั้นค่าความต้านทานทั้งทางด้านซ้ายและขวามือของจุด X จะมีค่าเท่ากันคือ 2R ทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเท่า

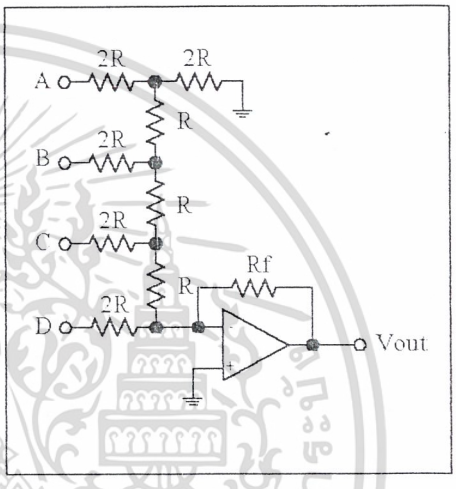
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันคือ I/2 จากจุด X จะมีกระแสไหลเข้า I/2 จะถูกแยกเป็นสองทางด้วยตัวต้านทาน 2R สองตัวที่ต่อขนานกัน กระแสที่ไหลผ่านวงจรในสาขานี้จึงเป็น I/4

ดังนั้น หากต่อพ่วงวงจรตัวต้านทานเข้าไปอีกหลายสาขา ก็จะทำให้กระแสถูกเฉลี่ยมากขึ้น เหมือนกับการสร้างบันไดของกระแสทีละขั้น ด้วยอัตราส่วนของตัวต้านทานที่คงที่ คือ R และ 2R ดังในวงจรรูปที่ 5.9 (ค) จากนั้นนำวงจร R-2R แลดเดอร์ นี้ต่อเข้ากับวงจรแปลงค่ากระแสเป็นแรงดันโดยใช้ออปแอมป์ ดังในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 พื้นฐานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอะนาลอกแบบ R-2R



รูปที่ 5.11 วงจร DAC แบบ R-2R ที่มีการใช้ออป แอมป์ในการแปลงค่ากระแสเป็นแรงดัน

แรงดันเอาท์พุท Vout จะมีค่าเท่ากับ โดยที่ Iin จะเป็นค่าผลรวมของกระแสที่ได้จากวงจร R-2R แลดเดอร์ ยกตัวอย่าง ป้อนข้อมูลดิจิตอล 1011 เข้าที่อินพุท DCBA ทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน R2, R4 และ R8 เข้ารวมกันที่อินพุทของออปแอมป์กลายเป็น Iin ซึ่งมีค่า

$$Iin = \frac{I}{2} + \frac{I}{8} + \frac{I}{16}$$

ดังนั้น

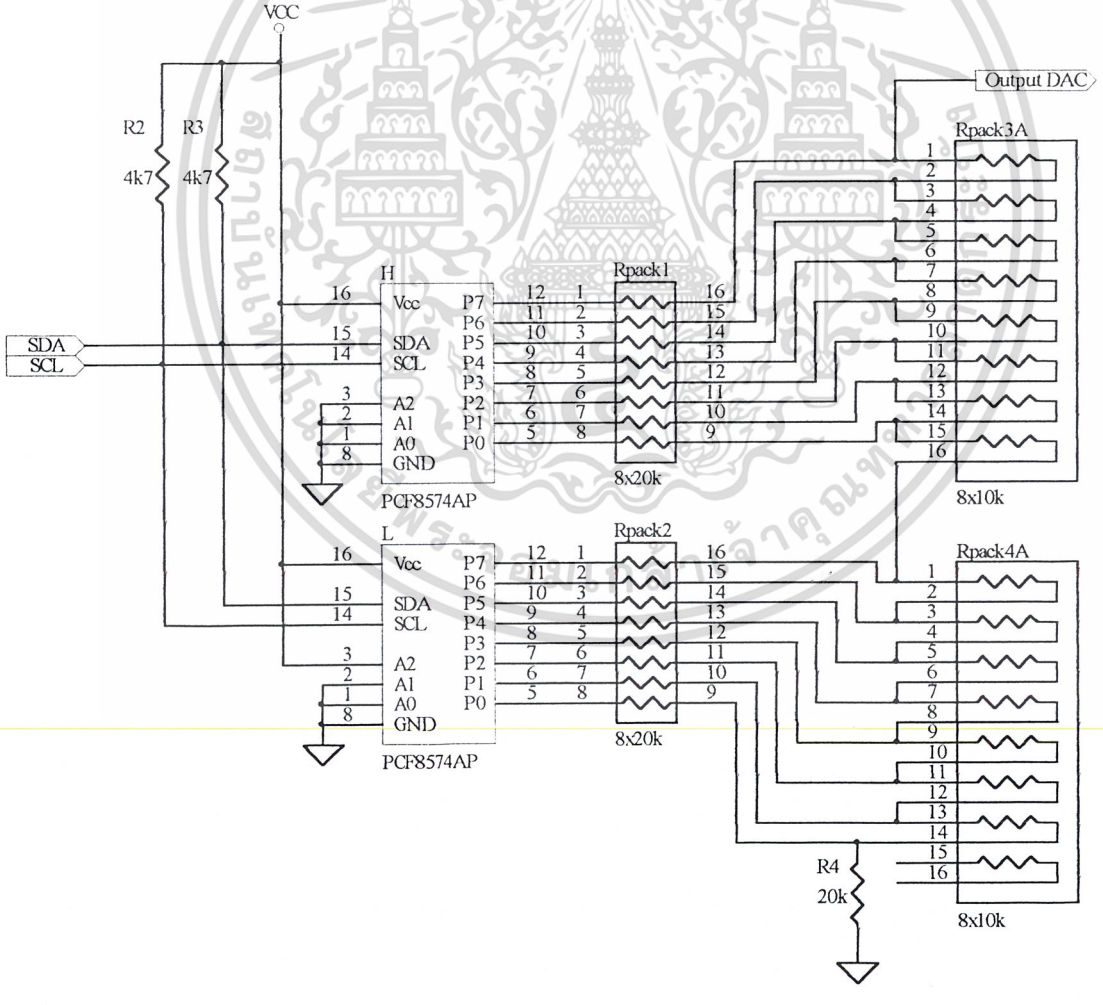
$$Vout = \left(\frac{I}{2} + \frac{I}{8} + \frac{I}{16}\right) \times Rf$$

จะเห็นได้ว่า การใช้วงจร DAC แบบ R-2R จะมีข้อดีคือ หาตัวต้านทานได้ง่ายกว่าแบบกำหนดน้ำหนักตัวต้านทานคือ ใช้ตัวต้านทานเพียง 2 ค่า ในขณะที่แบบกำหนดน้ำหนักตัวต้านทานต้องใช้ตัวต้านทานหลายค่า และต้องมีค่าทวีคูณกันไปเรื่อย ๆ ซึ่งอาจทำให้หาตัวต้านทานได้ยากขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.2 การเชื่อมต่อวงจร DAC แบบ R-2R เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ในการเชื่อมต่อวงจร DAC แบบ R-2R เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 สามารถต่อเข้ากับพอร์ตใดก็ได้โดยผ่านวงจรแลตช์ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถข้อมูลดิจิตอลที่ส่งออกไปสามารถคงค่าอยู่ได้จนกว่าจะมีการส่งข้อมูลดิจิตอลออกไปใหม่ การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อทำได้โดยพิจารณาวงจร DAC แบบ R-2R เป็นเหมือนกับอุปกรณ์เอาท์พุทแบบขนานตัวหนึ่ง เมื่อส่งข้อมูลดิจิตอลออกไป วงจร DAC นี้ก็จะแปลงเป็นสัญญาณอะนาลอกให้เอง ซึ่งในโครงงานนี้ทำการต่อวงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์ เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยผ่าน I^2C ที่ทำหน้าที่ขยายพอร์ต เพราะในโครงงานนี้ใช้ความละเอียดสูง (16 Bit) จึงต้องมีการขยายพอร์ตโดยใช้ IC I^2C 2 ตัว แล้วต่อเข้ากับวงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 การต่อวงจร DAC แบบ R-2R แลดเดอร์ โดยใช้ I^2C ขยายพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

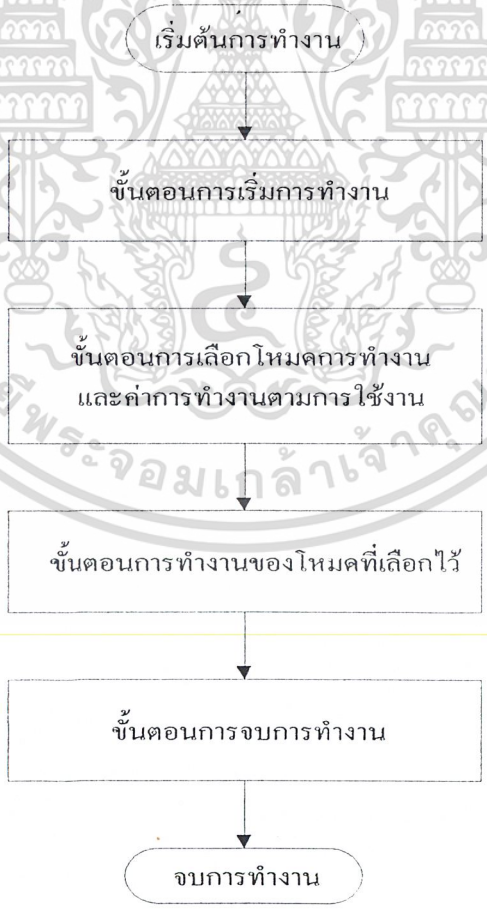
บทที่ 6

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1. ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงาน
2. ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน
   - โหมด HEMATOCRIT ใช้ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที
   - โหมด CENTRIFUGE ใช้ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที
3. ขั้นตอนการทำงานของโหมดที่ได้เลือกไว้
4. ขั้นตอนการจบการทำงาน

โดยมีโฟลวชาร์ตแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โฟลวชาร์ตแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละขั้นตอน จะสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อย ๆ ได้ดังต่อไปนี้

6.1 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงาน โดยมีโฟลวชาร์ตดังรูปที่ 6.2 และขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดแอดเดรสของตัวแปรต่าง ๆ และบิตของตัวแปรต่าง ๆ ในการใช้งาน
2) กำหนดแอดเดรสเริ่มต้นของโปรแกรม และแอดเดรสของอินเตอร์รัปต์ไทเมอร์0 และไทเมอร์ 1
3) กำหนดค่าเริ่มต้นของพอร์ตและเตรียม LCD โมดูลให้พร้อมในการทำงาน
4) แสดงข้อความบนหน้าจอ LCD ดังนี้

   ' KMITL '

   ' P R E S E N T '
5) ตรวจสอบว่าฝาครอบเปิดอยู่หรือไม่?

   5.1) ถ้าปิดอยู่ จะทำงานดังนี้

   - จะแสดงข้อความบนหน้าจอ LCD ดังนี้

     ' Please press OPEN key '

     ' for opening the cover. '

     แล้วจะรอการกดปุ่ม OPEN เพื่อให้ขดลวดโซลินอยด์ทำงานปลดล็อคฝาครอบ
   - จากนั้นจะแสดงข้อความบนหน้าจอ LCD ดังนี้

     ' Please open the cover '

     ' Put or pick the tubes. '

     เพื่อรอการเปิดฝาครอบ ในการหยิบหรือวางหลอดเลือด และเมื่อฝาครอบถูกเปิดแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนลำดับที่ 6 ต่อไป

   5.2) ถ้าเปิดอยู่ จะทำขั้นตอนลำดับที่ 6 ต่อไป
6) แสดงข้อความบนหน้าจอ LCD ดังนี้

   ' Please close the cover '

   'Before starting machine'

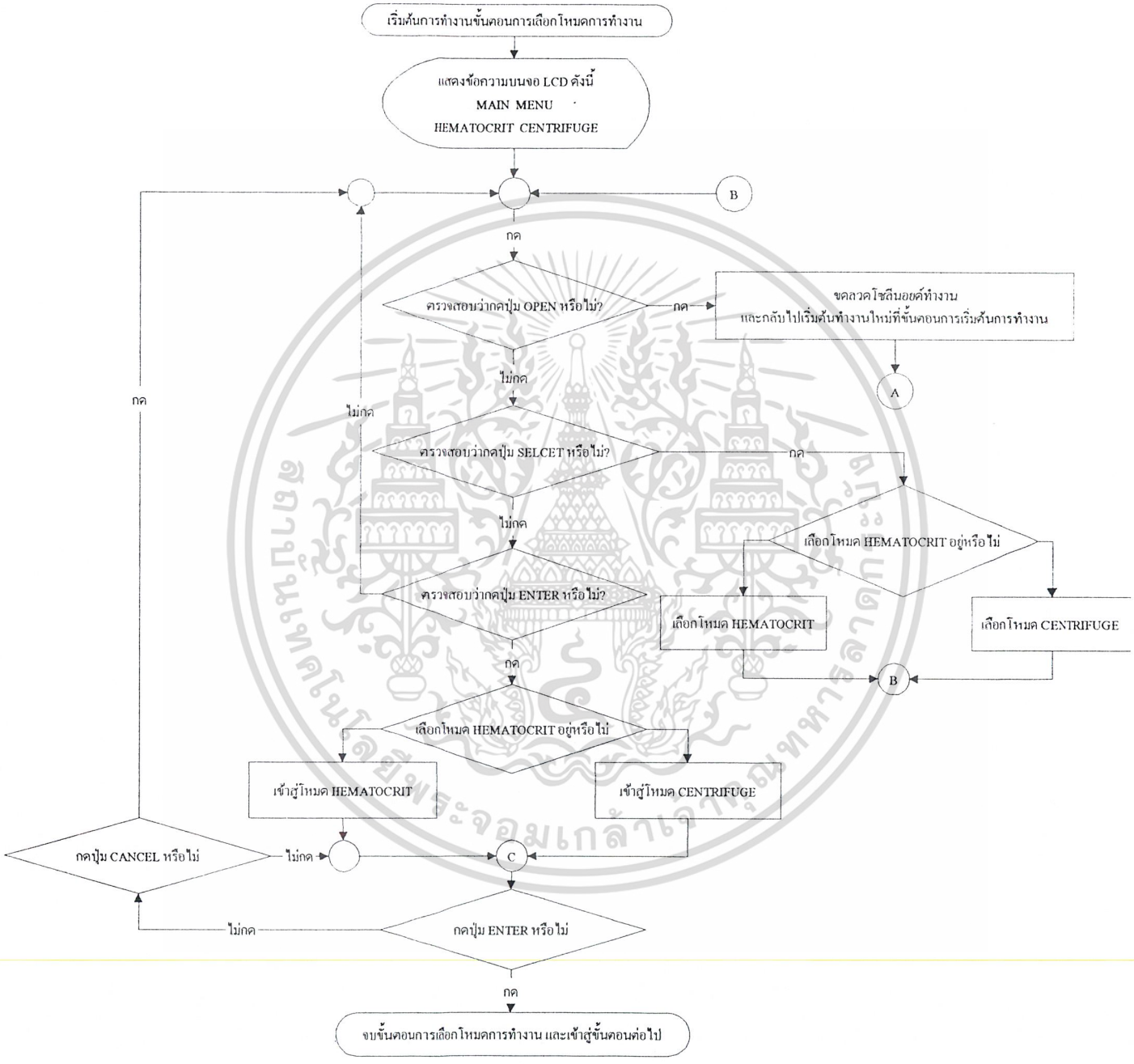
   และทำงานวนลูปรอการปิดฝาครอบ
7) เมื่อทำการปิดฝาครอบแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.2 โฟลวชาร์ตแสดงขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2) ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน โดยมีโฟลวชาร์ตดังรูปที่ 6.3 และขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 6.3 แสดงโฟลวชาร์ตของขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน

1) ต่อจากขั้นตอนเริ่มต้นโปรแกรม หลังจากปิดฝาครอบในขั้นตอนลำดับที่ 7 แล้ว จะปรากฏข้อความบนหน้าจอ LCD ดังนี้

' MAIN MENU '
'HEMATOCRIT CENTRIFUGE'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) จากนั้นจะทำการวนลูปรอการกดปุ่ม OPEN, SELECT, และ ENTER โดยแต่ละปุ่มจะทำงานดังนี้

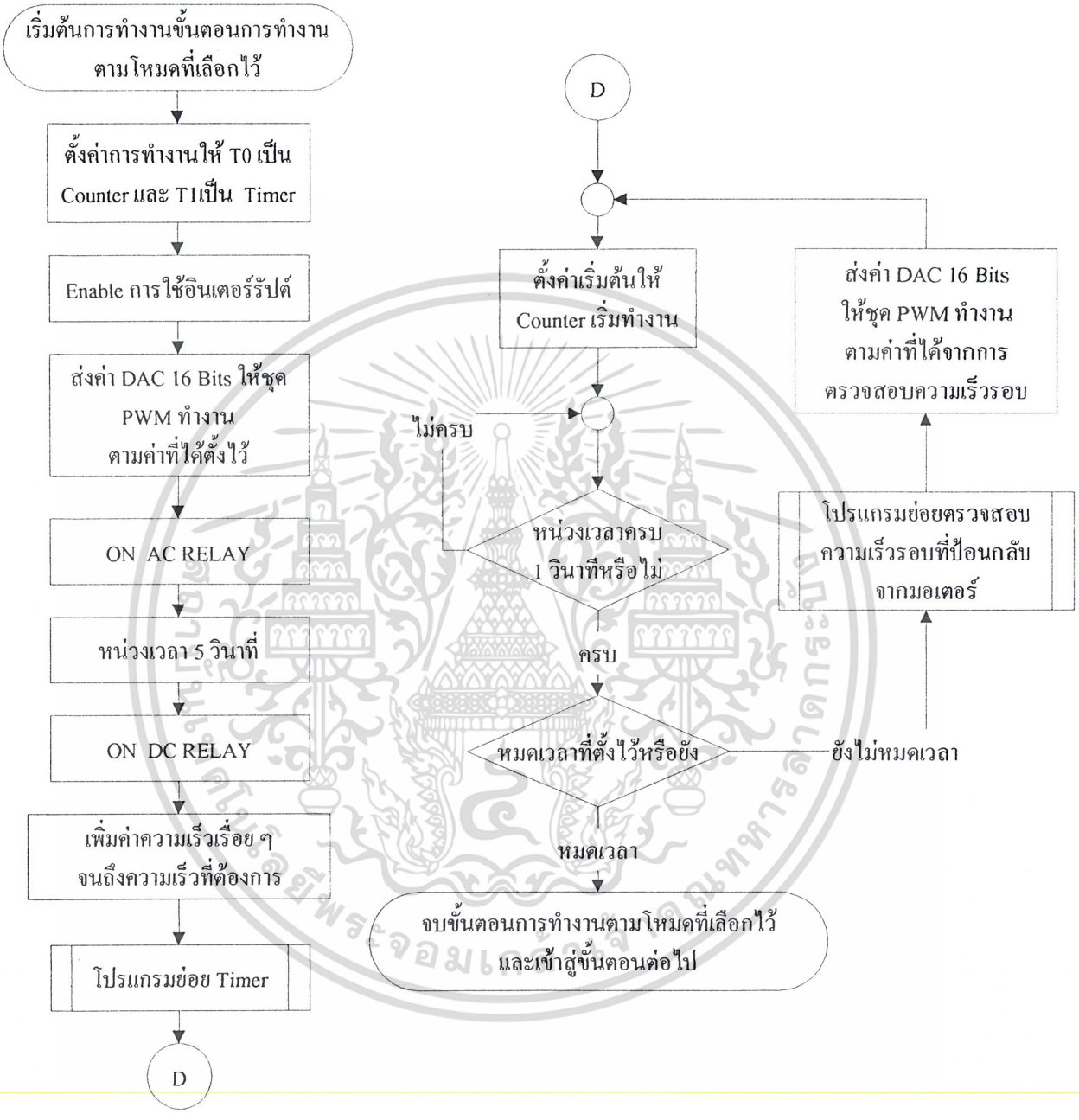
- ถ้ากดปุ่ม OPEN จะทำให้ขดลวดโซลีนอยด์ทำงาน เพื่อปลดล็อคฝาครอบ เสร็จแล้วจะกระโดดกลับไปทำงานต่อที่ขั้นตอนเริ่มต้นโปรแกรม ในลำดับที่ 5
- ถ้ากดปุ่ม SELECT จะทำการเลือกโหมดการทำงานระหว่างโหมด HEMATOCRIT และ CENTRIFUGE เสร็จแล้วจะกลับไปวนลูปรอการกดปุ่มต่อไป
- ถ้ากดปุ่ม ENTER จะทำการเข้าสู่โหมดการทำงานตามที่ได้เลือกไว้
- ถ้ากดปุ่ม CANCEL จะไม่มีผลการทำงานใด ๆ

3) หลังจากกดปุ่ม ENTER แล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการทำงานของโหมดที่เลือกไว้

6.3 ขั้นตอนการทำงานของโหมดที่เลือกไว้ โดยมีโฟลวชาร์ตดังรูปที่ 6.4, 6.5, 6.6 และขั้นตอนดังนี้

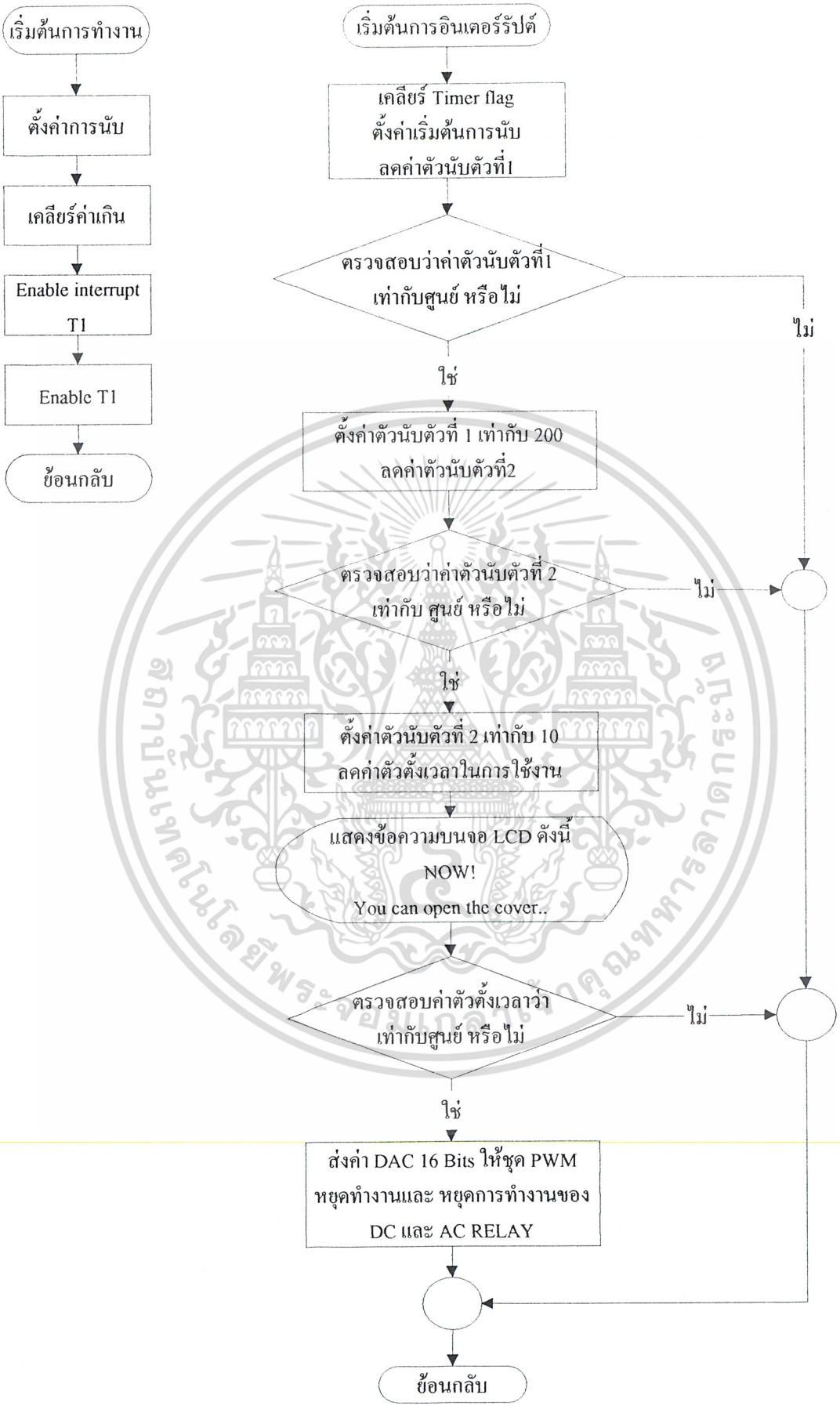
1) ทำการส่งข้อมูลตามโหมดที่เลือกไว้ ไปยังพอร์ต I^2C เพื่อส่งต่อให้ DAC 16 Bit ทำงาน ส่งเอาท์พุทให้ชุดควบคุมมอเตอร์ทำงาน
2) ส่งข้อมูลลอจิก "0" ไปยังพอร์ต P2.3 เพื่อให้ AC Relay ทำงาน
3) ส่งข้อมูลลอจิก "0" ไปยังพอร์ต P2.4 เพื่อให้ DC Relay ทำงาน ซึ่งหลังจากนี้มอเตอร์จะเริ่มทำงานแล้ว
4) เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงานแล้ว จากนั้นก็จะค่อย ๆ ลดค่าข้อมูลที่ส่งไปยังพอร์ต I^2C เพื่อเป็นการเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงค่าที่กำหนด
5) Timer เริ่มทำงานนับเวลา
6) หน่วงเวลาเพื่อรอการเริ่มนับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ส่งกลับมา ทั้งนี้เพื่อเริ่มนับหลังจากช่วงเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์สิ้นสุด
7) Counter เริ่มทำงานนับความเร็วรอบ
8) จากความเร็วรอบที่นับได้ ทำการตรวจสอบเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงว่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 50 rpm และ 100 rpm หรือไม่ โดยถ้ามากกว่า 50 rpm และ 100 rpm ให้ทำการเพิ่มค่าข้อมูลที่ส่งไปยังพอร์ต I^2C แล้วส่งออกไป เพื่อลดความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ถ้าน้อยกว่า 50 rpm จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าข้อมูลที่ส่งไปยังพอร์ต I^2C และถ้าน้อยกว่า 100 rpm ให้ทำการลดค่าข้อมูลที่ส่งไปยังพอร์ต I^2C แล้วส่งออกไป เพื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์ โดย และทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะหมดเวลาตามที่ตั้งไว้ ซึ่งก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการจบการทำงานขั้นตอนใหญ่สุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



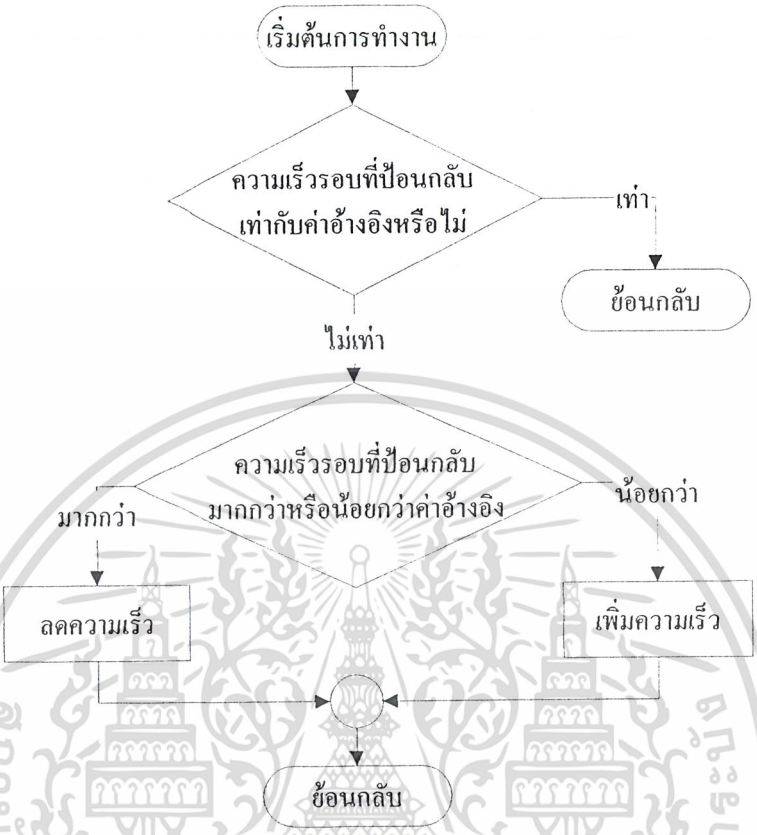
รูปที่ 6.4 แสดงโฟลวชาร์ตขั้นตอนการทำงานตามโหมดที่เลือกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงโฟลวชาร์ตโปรแกรมย่อย และโปรแกรมอินเตอร์รัปต์ของตัวตั้งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 โฟลวชาร์ตของโปรแกรมย่อยการตรวจสอบความเร็วรอบ

6.4 ขั้นตอนการจบการทำงาน โดยมีโฟลวชาร์ตดังรูปที่ 6.7 และขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) เมื่อหมดเวลาตามที่ตั้งเอาไว้แล้ว ให้ทำการหยุดการทำงานดังนี้
   - ส่งข้อมูล A205H ไปยังพอร์ต I^2C ก่อน เพื่อลดความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เหลือต่ำสุด
   - หยุดการทำงานของ DC Relay โดยการส่งข้อมูลลอจิก "1" ไปยังพอร์ต P2.4
   - หยุดการทำงานของ AC Relay โดยการส่งข้อมูลลอจิก "1" ไปยังพอร์ต P2.3
   - หยุดการทำงาน Timer 1 ที่ทำหน้าที่เป็น Timer
   - แสดงข้อความบนจอ LCD ดังนี้

     ' FINISHED! '

     ' Wait for motor stopped '
2) รอการหยุดหมุนของมอเตอร์ โดยการตรวจสอบรอบความเร็วของมอเตอร์ด้วยTimer 0 ที่เป็นตัว Counter ไปเรื่อย ๆ จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เมื่อมอเตอร์หยุดหมุนให้ส่งข้อมูลลอจิก "0" ไปยังพอร์ต P2.5 เพื่อให้ลำโพงทำงาน ส่งเสียงให้ผู้ใช้รับรู้ว่า การทำงานเสร็จแล้ว และแสดงข้อความบนจอ LCD ดังนี้

' N O W ! '

' You can open the cover '

4) จากนั้นโปรแกรมจะกลับไปยังขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานในลำดับที่ 5 คือทำการรอการเปิดฝาครอบ และจากนั้นก็จะทำงานตามปกติเหมือนเดิมต่อไป

รูปที่ 6.7 โฟลวชาร์ตขั้นตอนการจบการทำงาน

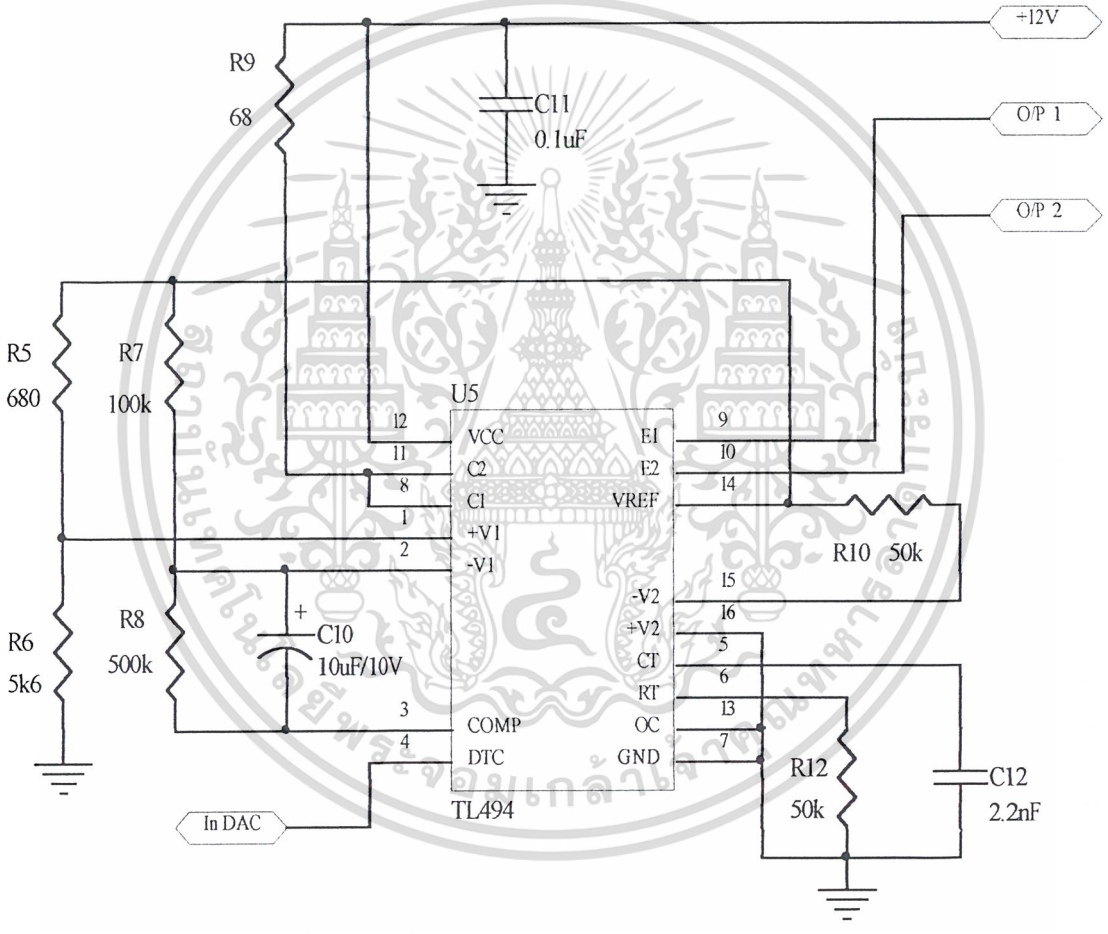
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

7.1 การทดลองภาคควบคุมการขับมอเตอร์

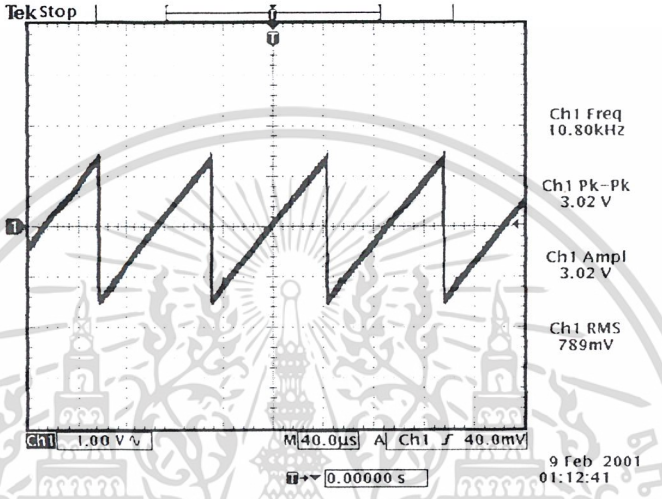
7.1.1 ต่อวงจรกำเนิดสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

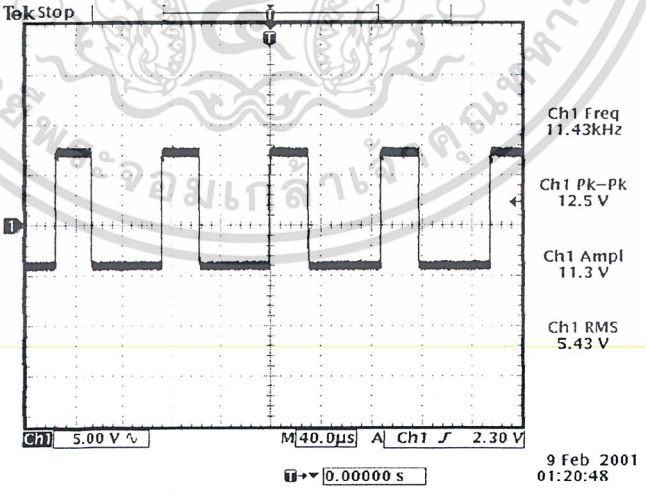
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2 วัดสัญญาณที่ขา 5 ของ TL494 จะได้เป็นรูป Saw Tooth ดังรูปที่ 7.2 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 10 kHz ตามที่คำนวณ ค่าความถี่ที่ได้นี้สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนค่าของ R_T หรือ C_T หรือสามารถดูเทียบได้จากกราฟในรูปที่ 4.3



รูปที่ 7.2 รูปสัญญาณที่ขา 5 ของ TL494

7.1.3 วัดสัญญาณที่เอาท์พุทของ TL494 (ขา 9 กับขา 10) จะได้รูปสัญญาณดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 สัญญาณที่ Output ของ TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเราสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้โดยการปรับเอาท์พุทของวงจร DAC ที่ถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

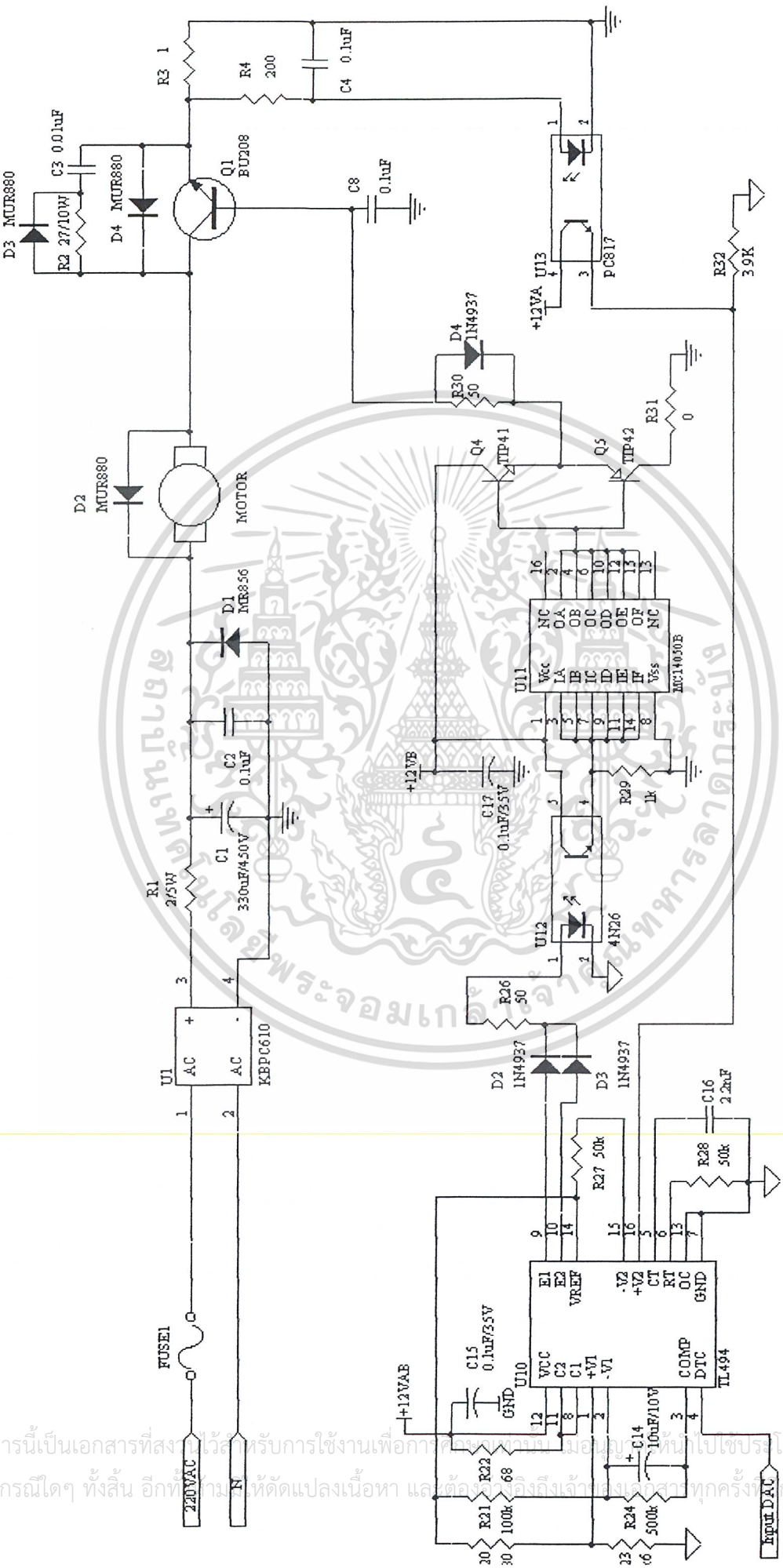
7.1.4 ทดลองวงจรส่วน Soft Start โดยใช้หลักการของวงจรอินทิเกรเตอร์ โดยใช้ Error Amp ในตัว TL494 ร่วมกับ RC ภายนอกดังรูปที่ 7.1 จะพบว่า เมื่อเริ่มเปิดเครื่องจะไม่มีพัลส์ออกที่เอาท์พุท (ขา 9,10) ของ TL494 เลยจนกระทั่งเวลาผ่านไปเล็กน้อย ก็จะเริ่มมีพัลส์เกิดขึ้น แล้วความกว้างของพัลส์ก็จะค่อย ๆ ขยายกว้างขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งที่เราตั้งค่าอ้างอิงไว้ ซึ่งค่าอ้างอิงนี้เป็นค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้จากวงจร DAC เช่นกัน เพราะว่าถ้าที่เอาท์พุทของ Error Amp มีค่าแรงดันปรากฏอยู่ จะทำให้ TL494 ไม่ทำงาน ซึ่งถ้าดูจากรูปวงจรจะพบว่า ช่วงแรกที่วงจรทำงาน จะมีแรงดัน V_o ประมาณ 4.5 V ซึ่งเกิดจาก R Divider ที่ขา Non-inverting แต่เมื่อเวลาผ่านไป C จะทำการเก็บประจุจนมีค่ามากกว่าแรงดันที่ขา Non-inverting ก็จะทำให้ V_o ค่อย ๆ ลดลงตามการเก็บประจุของ C ทำให้ TL494 ค่อย ๆ ปล่อยพัลส์ออกที่เอาท์พุท (ขา 9,10) โดยพัลส์จะค่อย ๆ ขยายกว้างขึ้น ซึ่งการเกิดพัลส์ และความกว้างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับค่า C ด้วย เพราะว่าถ้า C มีค่ามาก การเกิดพัลส์จะช้าและพัลส์ก็จะค่อย ๆ ขยายกว้างขึ้นด้วย

7.2 การทดลองภาคขับมอเตอร์

7.2.1 ต่อวงจรภาคควบคุมและภาคขับมอเตอร์เข้าด้วยกันดังรูปที่ 7.4

7.2.2 ในการทดลองครั้งแรก ๆ นั้น ยังไม่ได้ใส่ชุด soft start เมื่อทำการเปิดเครื่อง จึงทำให้เกิดการ ON อย่างทันทีทันใด ทำให้มีกระแสสูงไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ลัดวงจร แต่เมื่อใส่แล้วสามารถเปิดเครื่องได้โดยทรานซิสเตอร์ไม่ลัดวงจร แต่ในการเปิดเครื่องนั้นจะต้องป้อนไฟจ่ายไปรอที่มอเตอร์ก่อนแล้วจึงทำการ ON ชุดควบคุม เพราะถ้าไม่ทำแบบนี้ ในช่วงที่จ่ายไฟเข้าพร้อมกันจะทำให้ชุด soft start ทำงานไปก่อนแล้วจะทำให้มีพัลส์ไปรอที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เลย ทำให้เกิดกระแสกระชาก ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ลัดวงจรได้อีก

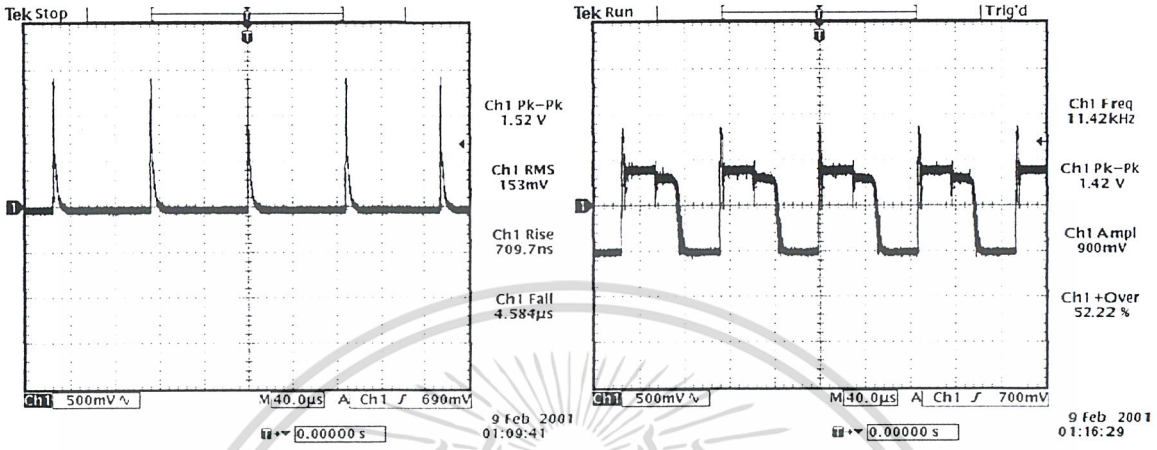
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 วงจรภาคควบคุมและภาคขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.3 ทำการวัดสัญญาณที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์จะได้พัลส์ดังนี้



(ก) (ข)

รูปที่ 7.5 รูปสัญญาณที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์
(ก) รูปสัญญาณที่ความเร็วต่ำ
(ข) รูปสัญญาณที่ความเร็วสูง

7.3 การทดลองชุดตรวจจับกระแสเกิน

7.3.1 ต่อวงจรดังรูป โดยใช้ Error Amp อีกตัวหนึ่งของ TL494 มาทำเป็นวงจร Comparator ดังรูปที่ 7.4

7.3.2 จากวงจรจะพบว่า ที่ขา inverting จะมีแรงดันอยู่ประมาณ 5 V ซึ่งได้จากการต่อความต้านทาน 50k จากขา Vref มาเข้าที่ขา inverting ของ error amp ภายในตัวของ TL494

7.3.3 โดยปกติแล้ว ถ้าแรงดันที่ขา inverting มากกว่าขา Non-inverting จะทำให้ได้เอาท์พุทเป็น Low จึงส่งผลให้ TL494 ยังคงทำงานอยู่ แต่เมื่อใดที่มีกระแสไหลผ่าน R_3 จนมีค่ามากกว่า 2 A (จากการคำนวณ) จะส่งผลให้ Op-to couple ทำงานเกิดมีแรงดันตกคร่อมความต้านทานที่ขา Non-inverting (ประมาณ 12 V) ซึ่งจะมีแรงดันมากกว่าขา inverting ส่งผลให้ TL494 จะหยุดจ่ายพัลส์ ซึ่งเป็นการตัดวงจรการทำงานของทรานซิสเตอร์ ทำให้ไม่เกิดความเสียหายแก่วงจร หรือถ้าเกิดก็น้อยลง

7.4 การทดลองวัดแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ เทียบกับความเร็วรอบที่ได้

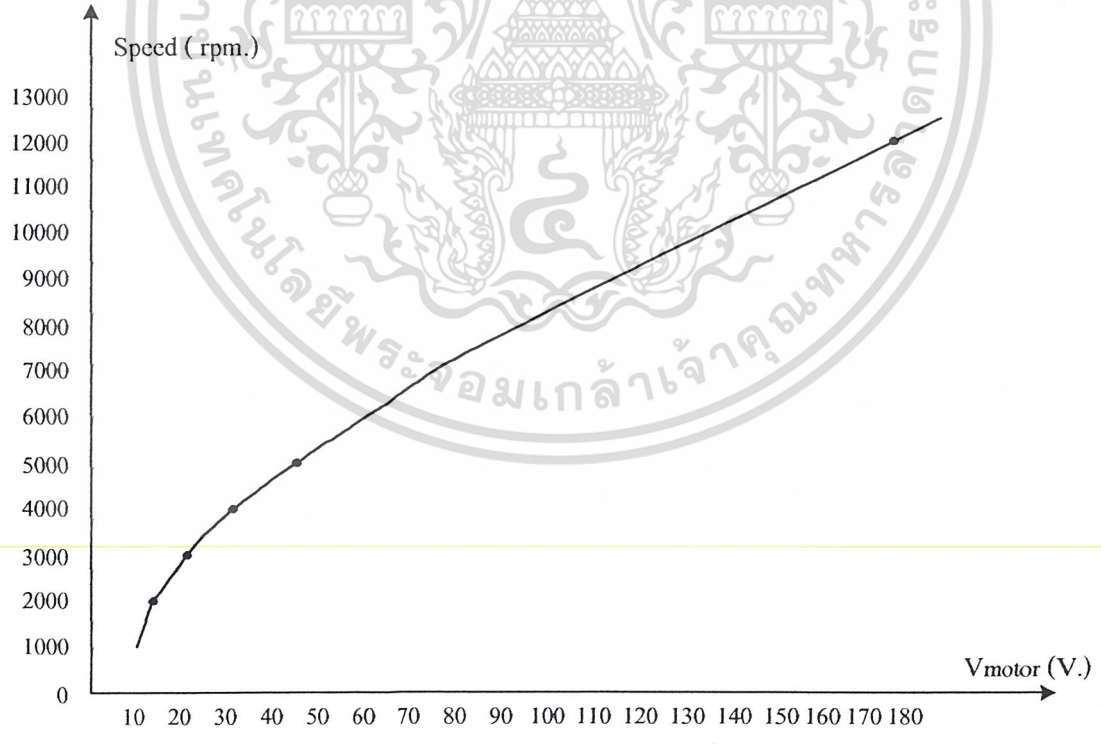
7.4.1 ต่อวงจรแบบเดียวกับการทดลองที่ 7.4

7.4.2 ใช้ VOM วัดคร่อมมอเตอร์ ทำการปรับค่าเอาท์พุทของวงจร DAC ที่ป้อนเข้าที่ขา Dead Time Control ของ TL494 แล้วใช้ Tachometer วัดรอบมอเตอร์ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 แสดงความเร็วและแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ค่าต่าง ๆ โดยใช้ Digital Tachometer วัด

Speed (rpm.)	แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ (V.)	แรงดัน V_{CE} (V.)
12,000	175	135
5,000	44.5	256.5
4,000	31.2	278.8
3,500	25.5	284.5
3,000	21.5	288.5
2,500	16.7	293.3
2,000	14.4	295.6
1,500	11	299

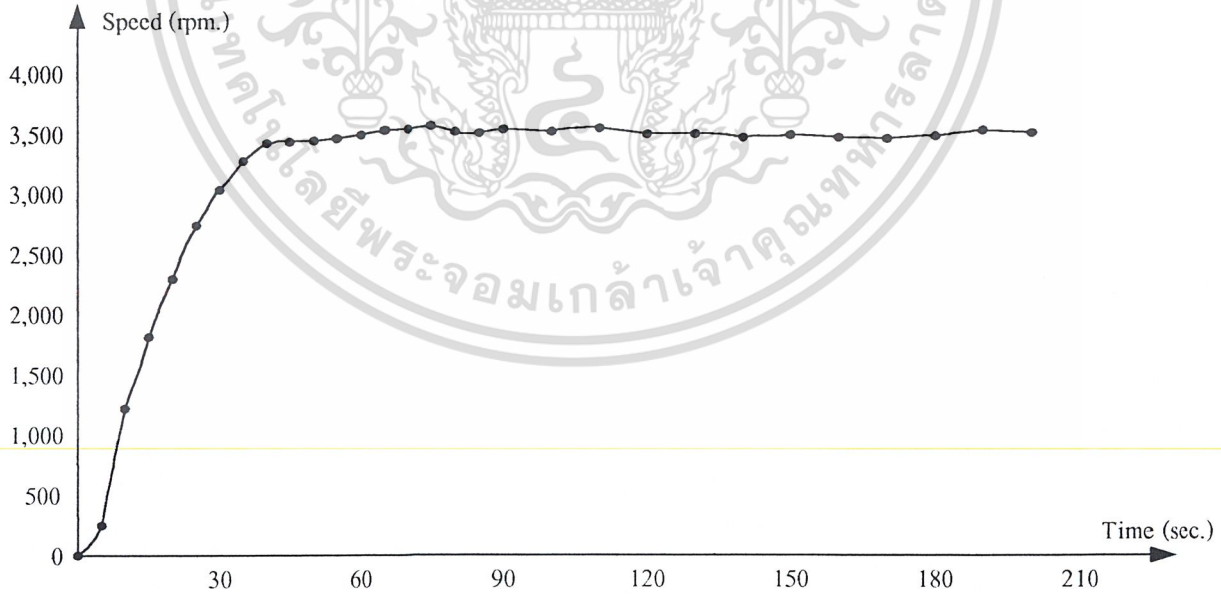


รูปที่ 7.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงดันของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 แสดงการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 3,500 rpm.

Time (Sec.)	Speed (rpm.)	Time (Sec.)	Speed (rpm.)	Time (Sec.)	Speed (rpm.)
0	0	50	3,450	110	3,560
5	250	55	3,470	120	3,510
10	1,230	60	3,500	130	3,510
15	1,810	65	3,540	140	3,490
20	2,300	70	3,550	150	3,480
25	2,740	75	3,580	160	3,500
30	3,340	80	3,530	170	3,480
35	3,280	85	3,520	180	3,470
40	3,430	90	3,550	190	3,490
45	3,440	100	3,530	200	3,540

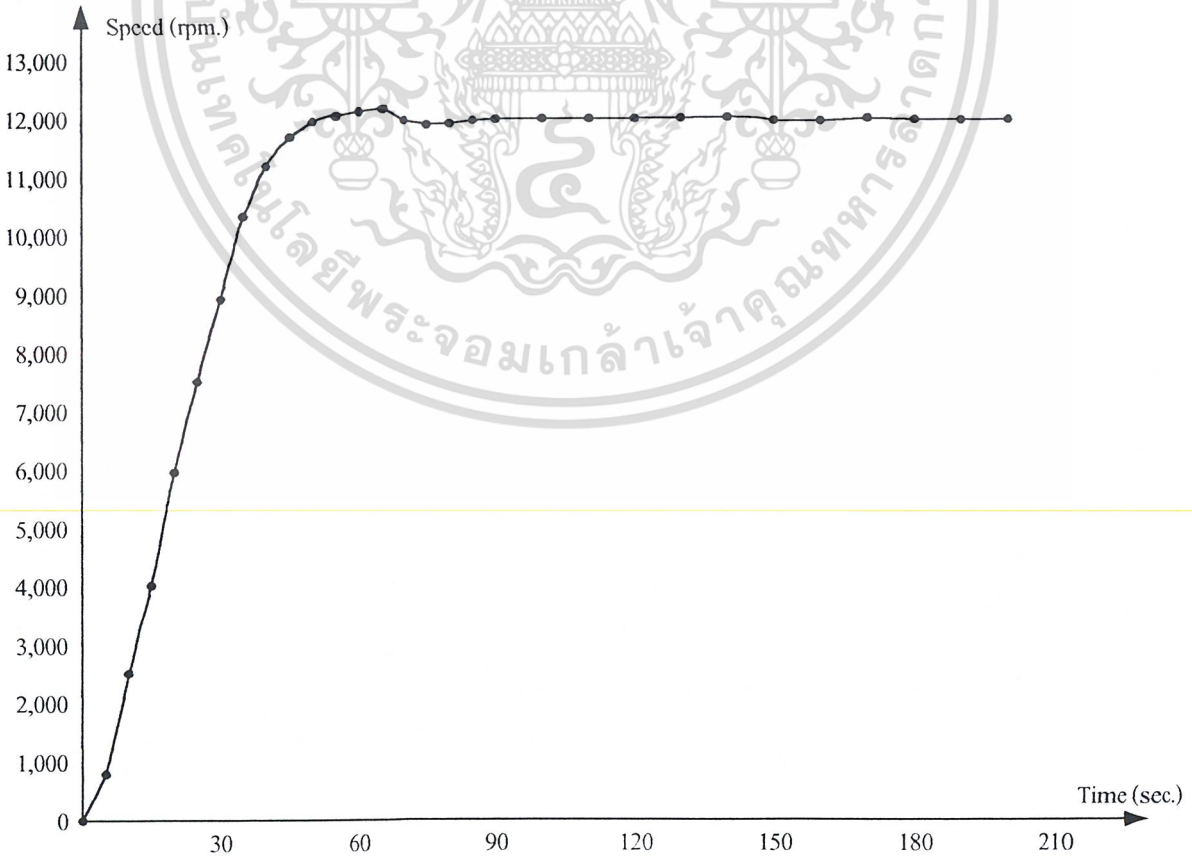


รูปที่ 7.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 3,500 rpm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.3 แสดงการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 12,000 rpm.

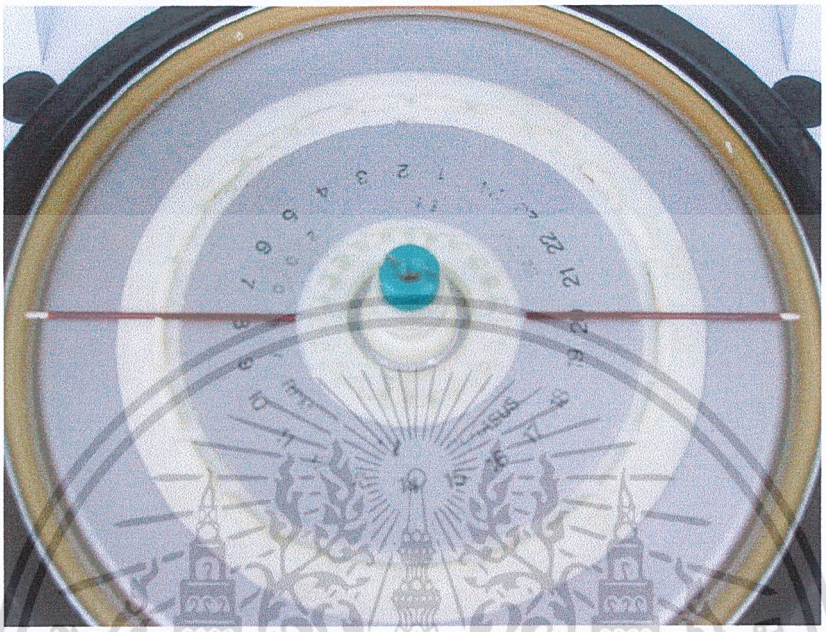
Time (Sec.)	Speed (rpm.)	Time (Sec.)	Speed (rpm.)	Time (Sec.)	Speed (rpm.)
0	0	50	11,970	110	12,020
5	800	55	12,080	120	12,030
10	2,530	60	12,150	130	12,040
15	4,020	65	12,200	140	12,050
20	5,980	70	12,000	150	11,980
25	7,510	75	11,930	160	11,970
30	8,940	80	11,950	170	12,020
35	10,350	85	12,000	180	12,000
40	11,220	90	12,010	190	11,990
45	11,710	100	12,030	200	12,000



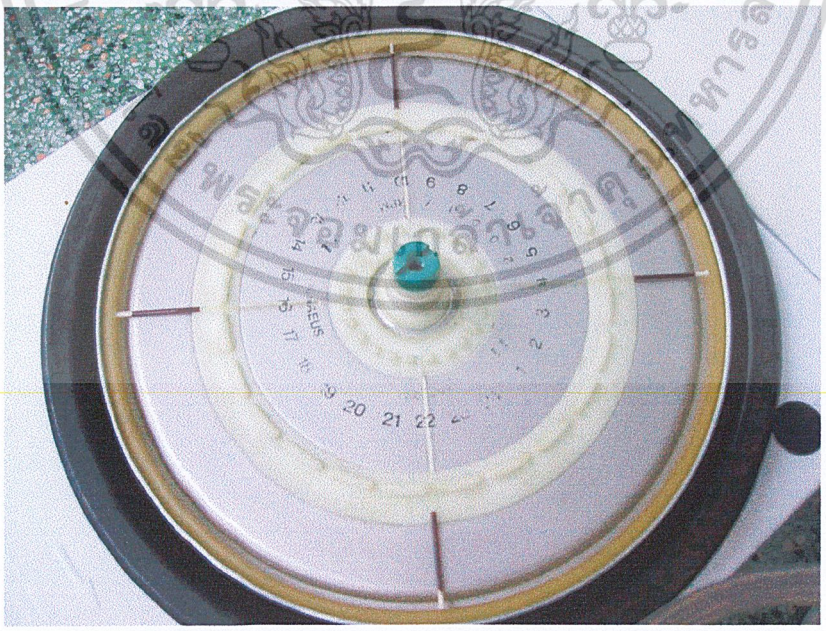
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์กับเวลาที่ความเร็ว 12,000 rpm.

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การทดลองปั่นเลือดจริงของเครื่องที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องที่โรงพยาบาลใช้อยู่



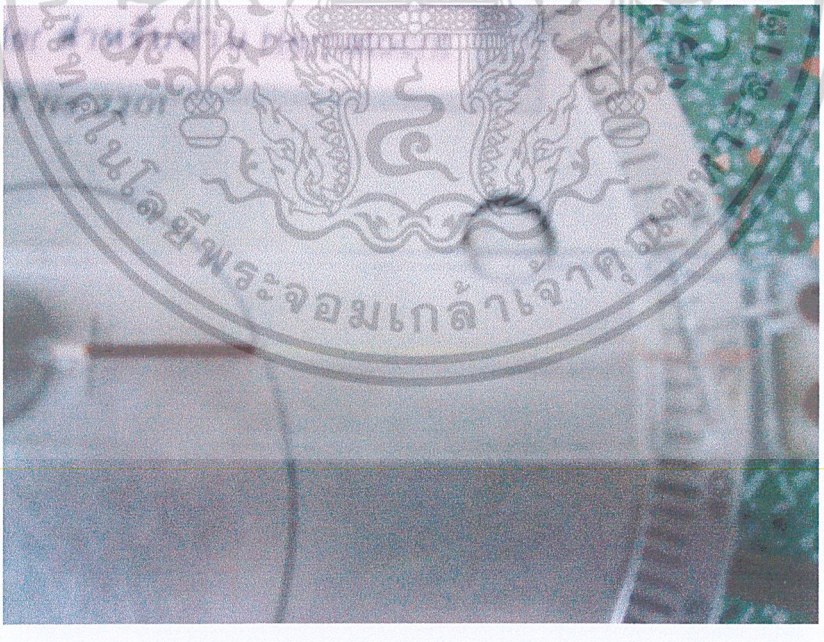
รูปที่ 7.9 แสดงหลอดเลือดก่อนทำการปั่น



รูปที่ 7.10 แสดงหลอดเลือดหลังทำการปั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

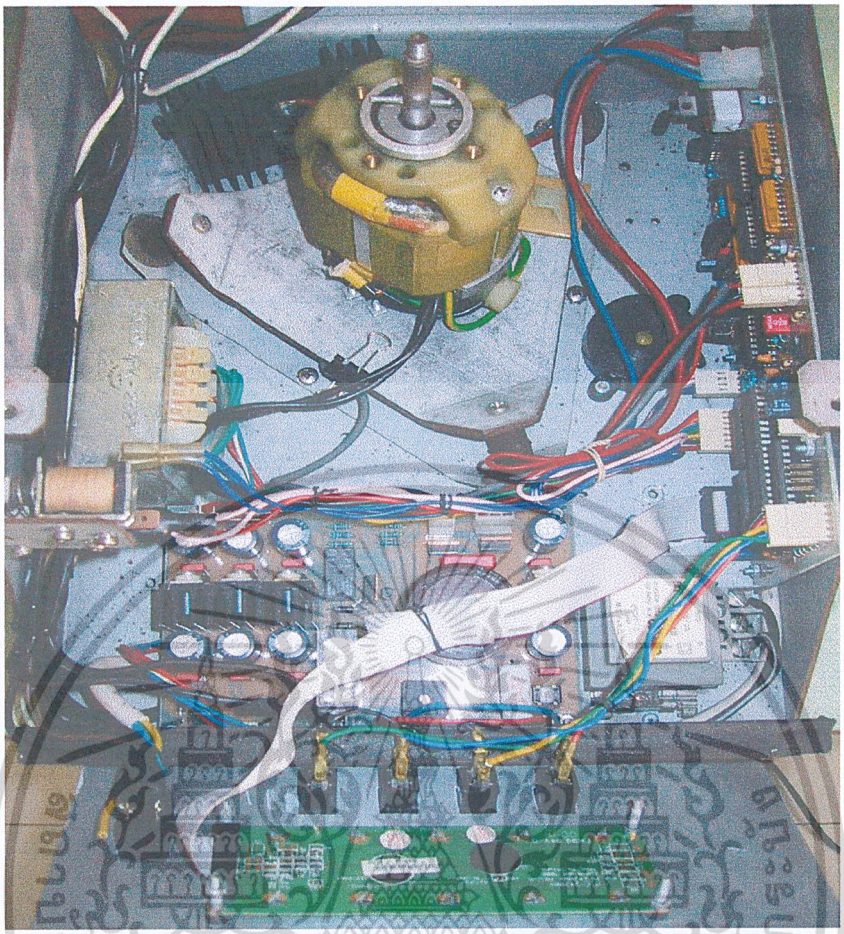
รูปที่ 7.11 แสดงการอ่านค่าหลอดเลือดที่ถูกปั่นโดยเครื่องของ โรงพยาบาล



รูปที่ 7.12 แสดงการอ่านค่าหลอดเลือดที่ถูกปั่นโดยเครื่องที่สร้างขึ้น

จะพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเม็ดเลือดแดงกับพลาสมาที่ทำการปั่นโดยใช้เครื่องที่สร้างขึ้นกับเครื่องที่ทางโรงพยาบาลใช้อยู่จะได้ค่าออกมาเท่ากัน ซึ่งในการปั่นนั้นจะใช้เลือดของคน ๆ เดียวกันและเวลาที่ใช้ปั่นเท่ากัน(5 นาที) ซึ่งค่าอัตราส่วนที่อ่านได้ คือ 35%

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 แสดงรูปชิ้นงานจริงของวงจรส่วนควบคุมและขับมอเตอร์

รูปที่ 7.14 แสดงรูปภายนอกของตัวเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.15 หัวหน้าแผนกเวชศาสตร์ชันสูตรและผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

บทสรุป

จากการทดลองทั้งหมดจะพบว่า ในการเริ่มเปิดเครื่องนั้นจะต้องออกแบบวงจรให้มีการจ่ายไฟเลี้ยงไปที่มอเตอร์ก่อน แล้วจึงจะจ่ายไฟให้ชุดควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสกระชาก หลังจากเปิดเครื่องให้ทำงานเรียบร้อยแล้ว เราสามารถปรับความเร็วได้โดยการปรับความกว้างของพัลส์ โดยปรับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากวงจร DAC ที่ถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีแรงดันที่ไปป้อนที่ขา 3 (DTC) ของ TL494 น้อยลง ก็จะทำให้ TL494 สร้างพัลส์บวกที่กว้างขึ้น ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานมากขึ้น มอเตอร์ก็จะหมุนเร็วขึ้น สามารถดูค่าแรงดันกับความเร็วได้ตามตารางที่ 7.1 ในการทดลองที่ 7.4

ในส่วนของวงจร Soft start นั้น ถือว่ามีส่วนสำคัญมากในการทำงานของวงจร ซึ่งช่วยให้ทรานซิสเตอร์ไม่เกิดความเสียหายในช่วงการ ON ช่วงแรก ซึ่งวงจร soft start นี้จะสามารถปรับเปลี่ยนค่า RC ได้ แต่เมื่อเปลี่ยนจะมีผลกับการทำงานของวงจร คือ ถ้าค่า C มาก จะทำให้ช่วงเวลาการเกิดพัลส์นาน และความกว้างของพัลส์ก็จะค่อย ๆ ขยายดังได้อธิบายไปแล้วในส่วนของการทดลองที่ 7.1

ส่วน IC MC14050B นั้น ใส่ไว้เพื่อแก้ rise time กับ fall time ทำให้การ ON-OFF ของทรานซิสเตอร์เร็วขึ้น ซึ่งจะมีผล คือ ถ้า rise time กับ fall time มาก จะทำให้ทรานซิสเตอร์เกิดความร้อนขึ้น ถ้าเป็นช่วงที่เริ่ม start ใหม่ ๆ ยิ่งร้อนมาก แต่เมื่อใส่แล้วก็ดีขึ้น

ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2543 ก็สามารถดำเนินงานไปได้เรื่อย ๆ มีปัญหาบ้างเล็กน้อย แต่ก็แก้ไขได้ อย่างเช่น ในการทดลองเปิดเครื่องครั้งแรก ฟิวส์ขาด ทรานซิสเตอร์ลัดวงจร ก็แก้ไขโดยใช้ชุด Soft start เข้าช่วย และอีกอย่างหนึ่งที่ค่อนข้างยุ่ง คือ หาร้านกลึงเกลียวแกนมอเตอร์สำหรับใส่น็อตยึดใบพัดตัดแสงที่จะใช้ทำชุดเซ็นเซอร์ความเร็วรอบ จึงต้องนำกลับไปทำที่บ้าน (ต่างจังหวัด) แต่ก็เรียบร้อยดีแล้ว

ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2544 ได้ทำการการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมความเร็วโดยการปรับตั้งความเร็วได้โดยการปรับเอาท์พุทของวงจร DAC โดยการสร้างวงจร DAC ในการทำโครงงานนี้ต้องใช้ถึง 16 บิตเพราะต้องการความละเอียดสูงเพื่อความเที่ยงตรง ทำให้ต้องทำการขยายพอร์ตโดยการใช้ I^2C ต่อร่วมกันวงจร R-2R แลดเดอร์ และทำการ Isolate ระหว่างวงจรภาคขับมอเตอร์กับชุดควบคุมภาคขับมอเตอร์ เนื่องจากภาคขับมอเตอร์มีแรงดันและกระแสในการใช้งานค่อนข้างสูงกว่าชุดควบคุมมาก ซึ่งในการ Isolate นั้นใช้หลักการแยกทางแสงเนื่องจากสะดวกและอุปกรณ์ก็หาได้ไม่ยาก และในส่วนการทำงานโดยรวมทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยไมโคร

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนโทรลเลอร์ ในการสั่งงานจะมี LCD เป็นตัวแสดงผล และได้สร้างชุดเซ็นเซอร์ความเร็วรอบ โดยใช้หลักการทางแสงมาช่วยซึ่งประกอบด้วยใบพัดตัดแสง photo diode และ op-to transistor แล้วส่งพัลส์ที่ได้ไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวนับเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ตั้งไว้ พร้อมทั้งยังมีชุดป้องกันการเปิดฝาในขณะที่มอเตอร์ยังหมุนอยู่ และตรวจสอบว่ามีการปิดฝาแล้วหรือยังถ้าไม่ปิดฝาก็ไม่สามารถสั่งงานใด ๆ ได้

ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2544 ได้ทำการปรับปรุงแก้ไขวงจร โปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมด และทำแผ่นปริ๊นสำเร็จรูปพร้อมทั้งติดตั้งวงจรทั้งหมดลงกล่อง และทำการทดลองเรียบร้อยแล้ว จึงได้นำไปทดลองเปรียบเทียบกับเครื่องที่ทางโรงพยาบาลจุฬาฯ ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งได้ผลการทดลองออกมาเท่ากันแสดงดังรูปในหัวข้อที่ 7.5 จะพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเม็ดเลือดแดงและพลาสมาของทั้งสองเครื่องที่อ่านได้มีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพที่จะสามารถใช้งานจริงได้ แต่ในวงจรส่วนขับมอเตอร์นั้นยังมีปัญหาอยู่บ้าง คือ ในบางครั้งอาจจะเกิดการกระแสกระชากของมอเตอร์ส่งผลทำให้ Power Transistor เสียหายได้ จึงได้ทำการเพิ่มเติมโปรแกรมส่วนที่จะช่วยในการ Start ของมอเตอร์ ช่วงแรกให้เริ่มหมุนจากความเร็วต่ำไปสู่ความเร็วสูงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดกระแสกระชากตอนเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์ ทำให้วงจรมีเสถียรภาพในการทำงานมากขึ้นและลดการเสียหายของ Power Transistor ลงได้ส่วนหนึ่ง

ส่วนของโปรแกรมที่แก้ไขเพื่อให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น คือ จะมี 2 โหมดในการสั่งงาน โหมดแรกเป็นการสั่งงานในส่วนของการปั่นให้เลือดตกตะกอน โดยใช้ความเร็วประมาณ 3,000 rpm. ซึ่งข้อมูลที่ได้จากโรงพยาบาลจุฬาฯ พบว่าในการใช้งานโหมดนี้จะสามารถใช้ความเร็วในการทำงานได้ตั้งแต่ 2,500-3,000 rpm. เวลาในการปั่น 10 นาที และอีกโหมดหนึ่งเป็นการสั่งงานในส่วนของการปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา โดยใช้ความเร็วประมาณ 12,000 rpm. ซึ่งข้อมูลที่ได้จากโรงพยาบาลจุฬาฯ พบว่าในการใช้งานโหมดนี้จะสามารถใช้ความเร็วได้ตั้งแต่ 10,000 rpm. ขึ้นไปแต่ไม่เกิน 14,000 rpm. เวลาในการปั่น 5 นาที

ส่วนปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่ง คือ เรื่องของถาดใส่หลอดเลือดเพราะว่าเครื่องนี้สามารถใช้งานได้ 2 อย่าง โดยอย่างแรกเป็นการปั่นให้เลือดตกตะกอนจะใช้ถาดที่ใส่หลอดเลือดที่มีขนาดใหญ่ ส่วนการปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาจะใช้ถาดที่ใส่หลอดเลือดที่มีขนาดเล็ก ทำให้ในการใช้งานจะต้องมีการปรับเปลี่ยนถาดเสมอ ค่อนข้างยุ่งยาก

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งทางผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงงานนี้จะเป็นเครื่องต้นแบบที่ได้รับความสนใจจากรุ่นน้อง และนำไปพัฒนาให้ดีขึ้นในส่วนของถาดใส่หลอดเลือด การเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ และสร้างชุดอ่านค่าอัตราส่วนอัตโนมัติระหว่างเม็ดเลือดแดงกับพลาสมา พร้อมทั้งเก็บเป็นฐานข้อมูลได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ไชยชาญ หินเกิด, "เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 257 หน้า, 2543.
2. ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, "เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51", Innovative Experiment, 476 หน้า, 2539.
3. ปรเมษฐ์ ประนยานันทน์, ปิยพงศ์ เผ่าวณิช, "คู่มือและการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51", ซีเอ็ดยูเคชั่น, 380 หน้า, 2521.
4. พงศ์ สุวรรณปิฎก, "มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสสลับ", โอเดียนสโตร์, 144 หน้า, 2525.
5. วันสุระ ศรีใสดี, "ประยุกต์/อินเตอร์เฟสไมโครคอนโทรลเลอร์ ภาคปฏิบัติ MCS-51", ดวงกลม, 161 หน้า, 2542.
6. วิชัย ศังขจันทรานนท์, "ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง1", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 379 หน้า, 2532.
7. สมบูรณ์ มาลานนท์, สมคิด วิริยประสิทธิชัย, "แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง", ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 246 หน้า, 2539.
8. สุวัตน์ ดั่น, "เทคนิคและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย", เอนเทลไทย, 245 หน้า, 2538.
9. Joseph Vithayathil, "Power Electronics", McGraw-Hill, 632 p., 1995Motorola, "Bipolar Power Transistor Data", 1925.
11. Motorola, "Analog/Interface ICs Device Data Vol. I", 1996.
12. Motorola, "CMOS Logic Data", 1991.
13. Motorola, "Rectifier Device Data", 1995.
14. Muhammad Harunur Rashid, "Power electronics", Prentice Hall, 584 p., 1988.
15. W. Shepherd and L.N. Hulley, "Power electronics and motor control", Cambrigde University, 473 p., 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตัวนับรอบความเร็วของมอเตอร์ : Counter

จะใช้ Timer/Counter T0 เป็นตัวนับพัลส์ที่ป้อนกลับมาจากใบพัดตัดแสงของมอเตอร์ โดยจะตั้งการทำงานเป็นโหมด 2 คือ เป็นการทำงานแบบตั้งค่าอัตโนมัติขนาด 8บิต ซึ่งถ้านับเกินขนาด 8 บิต (FFH) แล้ว จะเกิดการอินเตอร์รัปต์ของ T0 ไปทำการเพิ่มค่าตัวทดที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรม และจะเริ่มต้นนับค่าใหม่โดยอัตโนมัติ

ในการใช้งานนั้น ค่าความเร็วที่ต้องการหน่วยเป็นรอบต่อนาที (RPM: Rounds per minute) แต่ในการตรวจสอบนับรอบความเร็วนั้น หน่วยจะเป็นรอบต่อวินาที (RPS: Rounds per second) ดังนั้นจะได้ว่า

จาก $1\ \text{RPM} = \frac{1\ \text{round}}{1\ \text{min}}$

$= \frac{1\ \text{round}}{60\ \text{sec}}$

และใน 1 รอบ จะมีพัลส์เกิดขึ้นมา 6 พัลส์ เพราะใบพัดมีอยู่ 6 ซี่ ดังนั้นจะได้ว่า

ค่าอัตราการนับใน 1 RPM $= \frac{1\ \text{round}}{60\ \text{sec}} \times 6 = \frac{1\ \text{round}}{10\ \text{sec}}$

เพราะฉะนั้นในโหมด HEMATOCRIT จะได้

ค่าอัตราการนับในความเร็ว 12,000 RPM $= \frac{12,000\ \text{round}}{10\ \text{sec}} = \frac{1,200\ \text{round}}{\text{sec}} = 1,200\ \text{RPS}$

และในโหมด CENTRIFUGE จะได้

ค่าอัตราการนับในความเร็ว 3,000 RPM $= \frac{3,000\ \text{round}}{10\ \text{sec}} = \frac{300\ \text{round}}{\text{sec}} = 300\ \text{RPS}$

ดังนั้นค่าความเร็วอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบในโปรแกรมก็คือ

โหมด HEMATOCRIT: 1,200 RPS = 04B0H

โหมด CENTRIFUGE: 300 RPS = 012CH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตั้งเวลา : Timer

จะใช้ Timer/Counter T1 เป็นตัวตั้งเวลา หรือ Timer โดยจะตั้งการทำงานในโหมด 1 คือ เป็นการทำงานแบบนับค่าขนาด 16 บิต ซึ่งจะนับได้สูงสุด 65,535 ครั้ง และอัตราในการนับของ Timer/Counter จะเท่ากับ $\frac{1}{12}$ ของความถี่สัญญาณนาฬิกา ซึ่งในการใช้งานจะใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 11.0592 MHz

ดังนั้นจะได้อัตราในการนับเท่ากับ $\frac{11.0592\ \text{MHz}}{12}$ ซึ่งจะได้เวลาในการนับหนึ่งครั้งเท่ากับ $\frac{12}{11.0592\ \text{MHz}}$ มีค่าประมาณ 1.085069444 ไมโครวินาที

ในการใช้งานนั้น ค่าเวลาที่ใช้จะมีค่าหน่วยเป็นนาที ซึ่งใน 1 นาทีจะมี 60 วินาทีหรือ 60,000,000 ไมโครวินาที ดังนั้น Timer จะต้องนับทั้งหมดใน 1 นาที เท่ากับ

$$N = \frac{60{,}000{,}000\ \mu S}{12} \times 11.0592\ \text{MHz} \quad = 55{,}296{,}000\ \text{ครั้ง}$$

จะต้องทำให้ Timer สามารถนับเวลา 1 นาที ซึ่งเท่ากับนับเป็นจำนวน 55,296,000 ครั้ง แต่เนื่องจาก Timer นับได้สูงสุด 65,535 ครั้งต่อหนึ่งรอบ ดังนั้นจะต้องมีตัวทดหรือตัวคูณเข้ามาช่วยในการนับของ Timer ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$$\text{ตัวทดหรือตัวคูณ} = \frac{55{,}296{,}000\ \text{ครั้ง}}{12} = 27{,}649\ \text{ครั้ง}$$

จะได้ค่าตัวทดหรือตัวคูณเท่ากับ 2,000 ครั้ง ซึ่งจะต้องแบ่งเป็นสองตัวคือ 200 และ 10 เนื่องจากในไมโครคอนโทรลเลอร์ รีจิสเตอร์ 1 ตัว จะมีค่าได้ 255 เท่านั้น จึงต้องแบ่งเป็นสองตัว และ Timer จะต้องนับ 27,649 ครั้ง ดังนั้นจะได้ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 65,535 - 27,649 = 37,886 หรือ 93FEH

ดังนั้นค่าที่ต้องใช้ในการนับเวลาของ Timer มีดังนี้

- ตัวทดหรือตัวคูณตัวที่ 1 เท่ากับ 200
- ตัวทดหรือตัวคูณตัวที่ 2 เท่ากับ 10
- ค่าเริ่มต้นในการนับของ Timer/Counter T1 คือ 93FEH โดยรีจิสเตอร์ TH1 = 93H และ TL1 = FEH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการในการควบคุมความเร็วรอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

1. ต้องหาค่า DAC 16 Bits ที่สามารถทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที และ 12,000 รอบต่อนาที ได้ก่อน เพื่อเก็บเป็นค่าอ้างอิงในโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์
2. จากนั้นหาค่า DAC 16 Bits ที่เป็นค่าขอบเขตความเร็วที่ไม่ทำให้ความเร็วในใช้งานมีค่ามากเกินไปและค่าน้อยเกินไป เพื่อเก็บเป็นค่าอ้างอิงในโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์
3. จากนั้นในโปรแกรมใช้งาน จะมีเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบอ้างอิง (ซึ่งก็คือ 3,000 รอบต่อนาที และ 12,000 รอบต่อนาที) กับค่าความเร็วรอบที่ป้อนกลับมาจากมอเตอร์
4. เมื่อเปรียบเทียบแล้ว
   - ถ้าผลที่ได้ ค่าความเร็วรอบอ้างอิงมากกว่าค่าความเร็วรอบที่ป้อนกลับมาจากมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเพิ่มค่า DAC ขึ้น โดยในโหมด CENTRIFUGE ถ้าค่ามากกว่าอยู่ 50 รอบหรือ 100 รอบ จะเพิ่มค่า DAC ทีละ 1 step หรือถ้ามากกว่าอยู่ 200 รอบ จะเพิ่มค่า DAC ทีละ 2 steps และในโหมด HEMATOCRIT ถ้าค่ามากกว่าอยู่ 50 รอบหรือ 100 รอบ จะเพิ่มค่า DAC ทีละ 1 step หรือถ้ามากกว่าอยู่ 200 รอบ จะเพิ่มค่า DAC ทีละ 2 steps
   - ถ้าผลที่ได้ ค่าความเร็วรอบอ้างอิงน้อยกว่าค่าความเร็วรอบที่ป้อนกลับมาจากมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการลดค่า DAC ลง โดยในโหมด CENTRIFUGE ถ้าค่าน้อยกว่าอยู่ 50 รอบ จะไม่ทำการลดค่า DAC แต่ถ้าน้อยกว่าอยู่ 100 รอบ จะลดค่า DAC ทีละ 1 step หรือถ้าน้อยกว่าอยู่ 200 รอบ จะลดค่า DAC ทีละ 2 steps และในโหมด HEMATOCRIT ถ้าค่าน้อยกว่าอยู่ 50 รอบ จะไม่ทำการลดค่า DAC แต่ถ้าน้อยกว่าอยู่ 100 รอบ จะลดค่า DAC ทีละ 128 steps หรือถ้าน้อยกว่าอยู่ 200 รอบ จะลดค่า DAC ทีละ 256 steps

*** หมายเหตุ: เนื่องจากค่า DAC จะมีผลต่อมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำในโหมด CENTRIFUGE คือ ถ้าเปลี่ยนค่า DAC มากเกินไป จะทำให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือลงมากเกินไป จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนค่า DAC น้อยทีละ 1 step หรือ 2 steps เพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ โดยไม่เพิ่มลดจนเกินไป ส่วนค่า DAC ที่มีต่อมอเตอร์ที่ความเร็วรอบสูงในโหมด HEMATOCRIT นั้น จะต้องเปลี่ยนค่า DAC ทีละมาก ๆ ประมาณ 128 steps หรือ 256 steps จึงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว เพราะถ้าเปลี่ยนค่า DAC ทีละน้อย ๆ จะทำให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานเครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา

เครื่องปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมานี้ สามารถที่จะทำงานได้ 2 โหมดดังนี้คือ

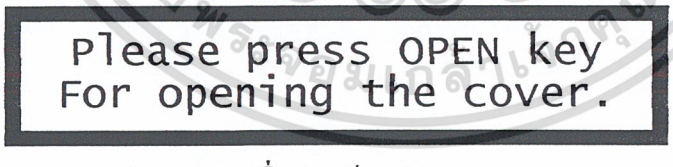
1. โหมดการปั่นแยกเม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมา (HEMATOCRIT MODE) จะใช้ถาดที่ใส่หลอดเลือดขนาดเล็กในการปั่น
2. โหมดการปั่นเลือดตกตะกอน (CENTRIFUGE MODE) จะใช้ถาดที่ใส่หลอดเลือดขนาดใหญ่ในการปั่น

ดังนั้นในการใช้งาน จะต้องระวังเรื่องถาดที่ใส่หลอดเลือดด้วย โดยต้องใช้ให้ตรงกับโหมดการทำงานนั้น ๆ มิฉะนั้นจะทำให้เครื่องเสียหายได้

ขั้นตอนการใช้เครื่อง

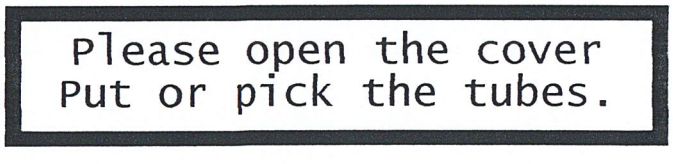
1. เปิดสวิทช์ **POWER** ที่เครื่อง เพื่อเปิดใช้งานเครื่อง เมื่อเปิดแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงผลดังนี้

2. จากนั้น 2 วินาที ที่หน้าจอ LCD จะแสดงผลดังนี้



ทำการกดปุ่ม **OPEN** เพื่อปลดล็อคฝาครอบออก

3. เมื่อกดปุ่ม **OPEN** แล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงผลดังนี้



ทำการเปิดฝาครอบออก เพื่อใส่หรือหยิบหลอดเลือด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากนั้น ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

ทำการปิดฝาครอบอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการเลือกโหมดการทำงาน

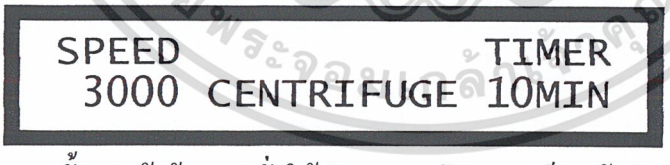
5. เมื่อทำการปิดฝาครอบแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

ทำการเลือกโหมดการทำงานด้วยการกดปุ่ม ***SEL*** และทำการเข้าสู่โหมดการทำงานที่เลือกไว้ ด้วยการกดปุ่ม **ENT**

6. เมื่อทำการเลือกโหมดการทำงาน และเข้าสู่โหมดการทำงานที่เลือกนั้นแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

- ถ้าเลือก และเข้าสู่โหมด HEMATOCRIT จะแสดงดังนี้

- ถ้าเลือก และเข้าสู่โหมด CENTRIFUGE จะแสดงดังนี้



จากนั้น - ถ้าต้องการสั่งให้ทำงาน กดปุ่ม **ENT** ก็จะเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนข้อที่ 7

- ถ้าต้องการยกเลิกการเลือกใช้โหมดนี้ กดปุ่ม **CANCEL** และเมื่อกดปุ่มนี้แล้ว จะกลับทำงานในขั้นตอนข้อที่ 5

7. เมื่อกดปุ่ม **ENT** ให้เครื่องทำงานแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

- ถ้าเลือก และเข้าสู่โหมด HEMATOCRIT จะแสดงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าเข้าสู่การทำงานแล้ว

- ถ้าเลือก และเข้าสู่โหมด CENTRIFUGE จะแสดงดังนี้

แสดงว่าเข้าสู่การทำงานแล้ว

8. จากนั้นเครื่องจะทำงานไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหมดเวลาตามที่ตั้งไว้ ในโหมดนั้น ๆ
9. เมื่อหมดเวลาแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

เป็นการรอการหยุดหมุนของมอเตอร์ ซึ่งตอนนี้จะยังไม่สามารถเปิดฝาครอบได้

10. เมื่อมอเตอร์หยุดหมุนแล้ว จะมีเสียงเตือน (ปี๊บ) และที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้

11. เมื่อเสียงเตือนดังเสร็จแล้ว การทำงานของเครื่องจะกลับไปยังขั้นตอนข้อที่ 2 เพื่อรอการกดปุ่ม **OPEN** ให้ปลดล็อคฝาครอบ สามารถเปิดฝาครอบได้ต่อไป

หน้าที่ในการใช้งานของแต่ละปุ่ม

- **ปุ่ม OPEN** ทำหน้าที่สำหรับปลดล็อคฝาครอบ ให้สามารถเปิดได้ โดยปุ่มนี้จะไม่สามารถใช้งานได้ เมื่อเข้าสู่โหมดการทำงานใด โหมดการทำงานหนึ่งแล้ว และขณะเครื่องกำลังทำการปั่น
- **ปุ่ม CANCEL** ทำหน้าที่สำหรับยกเลิกโหมดการทำงานที่เลือกเข้าไป(ขณะเครื่องยังไม่ให้ทำการปั่น)
- **ปุ่ม SEL** (Select) ทำหน้าที่สำหรับเลือกโหมดการทำงาน
- **ปุ่ม ENT** (Enter) ทำหน้าที่สำหรับเข้าสู่โหมดการทำงานที่เลือกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

***** ฟังก์ชันพิเศษในขณะที่เครื่องกำลังทำการปั่น *****

ฟังก์ชันนี้จะมีประโยชน์สำหรับการตรวจสอบค่าของ DAC, ค่าความเร็วรอบที่ป้อนกลับมาจากมอเตอร์ และ ค่าเวลาที่ตั้งไว้ของ TIMER โดยในขณะที่เครื่องกำลังทำการปั่นอยู่นั้น ปุ่มทั้ง 4 ปุ่มจะสามารถใช้งานได้ดังนี้ คือ

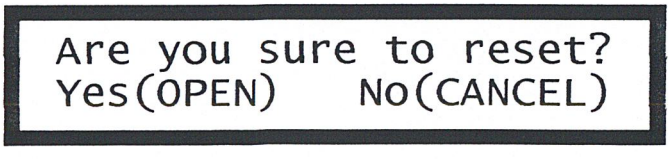
- **ปุ่ม OPEN** ทำหน้าที่ในการหยุดการเพิ่มลดค่า DAC และเมื่อกดอีกครั้ง การเพิ่มลดค่า DAC จะเป็นปกติ
- **ปุ่ม CANCEL** ทำหน้าที่ในการแสดงหน้าจอ LCD ดังนี้
  - ถ้าเป็นโหมด HEMATOCRIT จะแสดงดังนี้

  - ถ้าเป็นโหมด CENTRIFUGE จะแสดงดังนี้

- **ปุ่ม SEL** ทำหน้าที่ในการแสดงหน้าจอ LCD ดังนี้

หน้าจอนี้จะแสดงถึง ค่าของ DAC, ค่าความเร็วรอบที่ป้อนกลับจากมอเตอร์ และค่าเวลาที่ตั้งไว้ใน TIMER ว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรแล้วบ้าง

- **ปุ่ม ENT** ทำหน้าที่ในการ RESET หรือหยุดการปั่นหลอดเลือด ในกรณีฉุกเฉิน เพื่อป้องกันอุปกรณ์ในเครื่องเสียหาย โดยเมื่อกดแล้ว ที่หน้าจอ LCD จะแสดงดังนี้



  - ถ้าต้องการ RESET ตอบ Yes กดปุ่ม **OPEN** และเมื่อกดปุ่มแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนข้อที่ 9 เพื่อรอมอเตอร์หยุดหมุนก่อน จึงเข้าสู่ขั้นตอนปกติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าต้องการยกเลิกแล้วกลับสู่หน้าปกติ ตอบ No กดปุ่ม **CANCEL** และเมื่อกดปุ่มแล้ว จะกลับมายังหน้าจอทำงานเดิม

** หมายเหตุ: ในการใช้งานจริงแล้ว ฟังก์ชันพิเศษนี้ไม่จำเป็นแต่อย่างใด แต่เหมาะสำหรับในการตรวจสอบเครื่องว่าทำงานได้ถูกต้องหรือไม่เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการดาวน์โหลดโปรแกรมลงในชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89S8252

ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์แบบแฟลช เบอร์ AT89S8252 นั้น ส่วนของการเขียนโปรแกรมลงในชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถทำได้โดยการดาวน์โหลดโปรแกรมลงในชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการต่อวงจรตามในรูปวงจรรวมในปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งมีโปรแกรมที่ต้องใช้ และมีขั้นตอนดังนี้

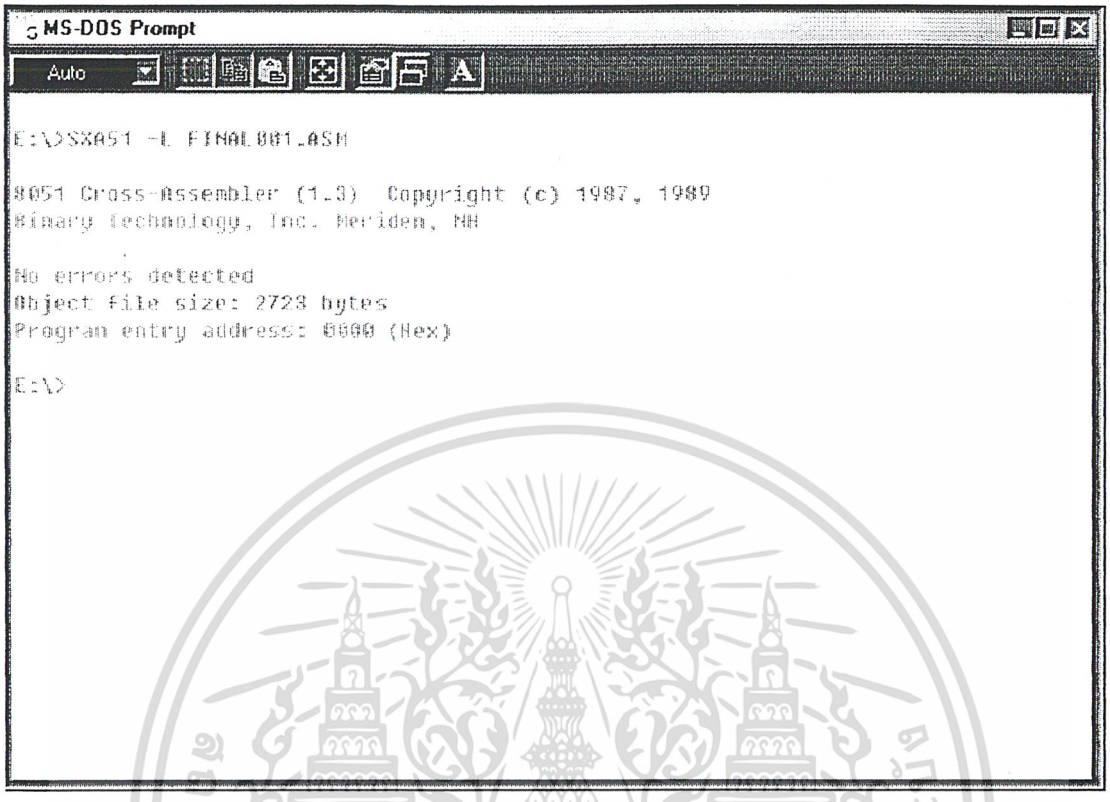
โปรแกรมที่ต้องใช้มีดังนี้

- **โปรแกรม EDITOR** ต่าง ๆ ใช้ในการเขียนโปรแกรม Assembly
- **โปรแกรม SXA51** ใช้ในการ Compile ไฟล์ ASSEMBLY (Filename.asm) เป็นไฟล์ HEX (Filename.hex) ในรูปแบบบนระบบ DOS
- **โปรแกรม PonyProg117h** ใช้ในการ Save ทับไฟล์ HEX ที่ได้จากการ Compile ของโปรแกรม SXA51 ให้เป็นรูปแบบบนระบบ WINDOWS
- **โปรแกรม Atmel AVR ISP (Version 2.65)** ใช้ในการดาวน์โหลดโปรแกรมลงในชิปไมโครคอนโทรลเลอร์แบบแฟลช เบอร์ AT89S8252

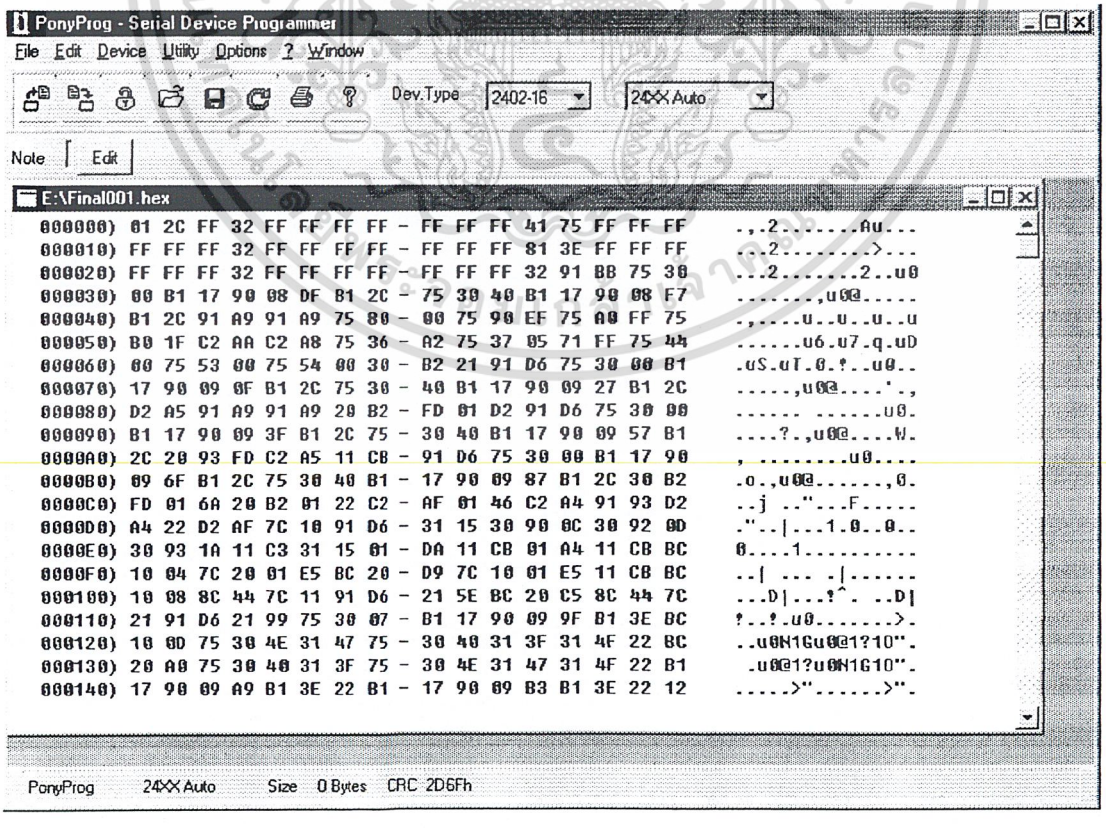
ขั้นตอนในการดาวน์โหลดมีดังนี้

1. เข้าสู่ DOS Mode และพิมพ์คำสั่งรันโปรแกรม SXA51 ดังนี้
   "Drive:\Path\>SXA51 -L Filename.asm"
   โดย -L หมายถึง Save ผลการรันในไฟล์ LIST (Filename.lst) เพื่อใช้ในการตรวจสอบผลการรันว่ามี Error หรือไม่ ถ้ามี ก็จะสามารถหาง่ายและแก้ไขได้ถูกตำแหน่ง
   ขั้นตอนนี้แสดงในรูปภาคผนวกที่ 1.1
2. จากนั้นเปิดโปรแกรม PonyProg117h ตามรูปภาคผนวกที่ 1.2 และมีขั้นตอนย่อยดังนี้
   2.1 เมื่อเข้าสู่โปรแกรมแล้ว ให้เปิดไฟล์ HEX ที่ได้ Compile มาแล้วด้วยโปรแกรม SXA51
   2.2 เมื่อเปิดไฟล์ขึ้นมาแล้ว ทำการ Save ทับ ก็จะได้ไฟล์ในรูปแบบของระบบบน WINDOWS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



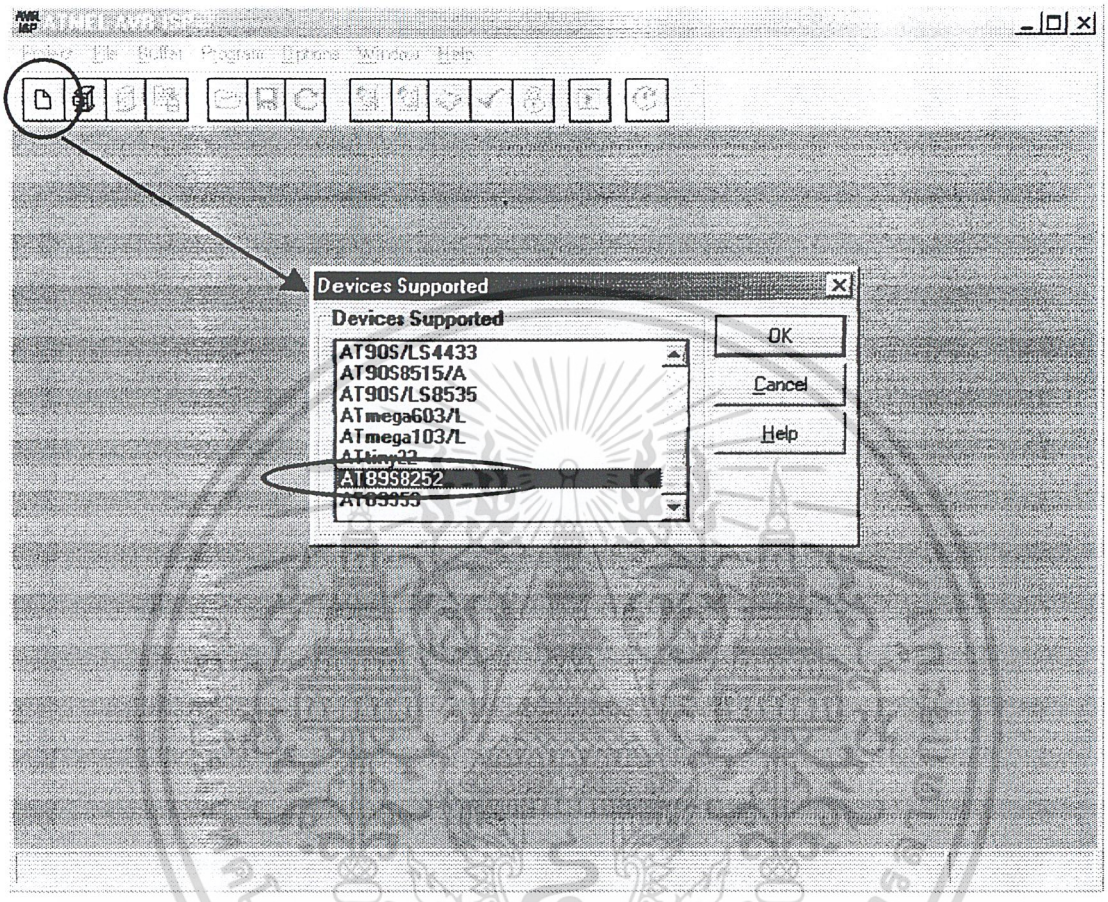
รูปภาคผนวกที่ 1.1 โปรแกรม SXA51



รูปภาคผนวกที่ 1.2 แสดงโปรแกรม PonyProg117h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นเปิดโปรแกรม Atmel AVR ISP ขึ้นมา ดังรูปภาคผนวกที่ 1.3



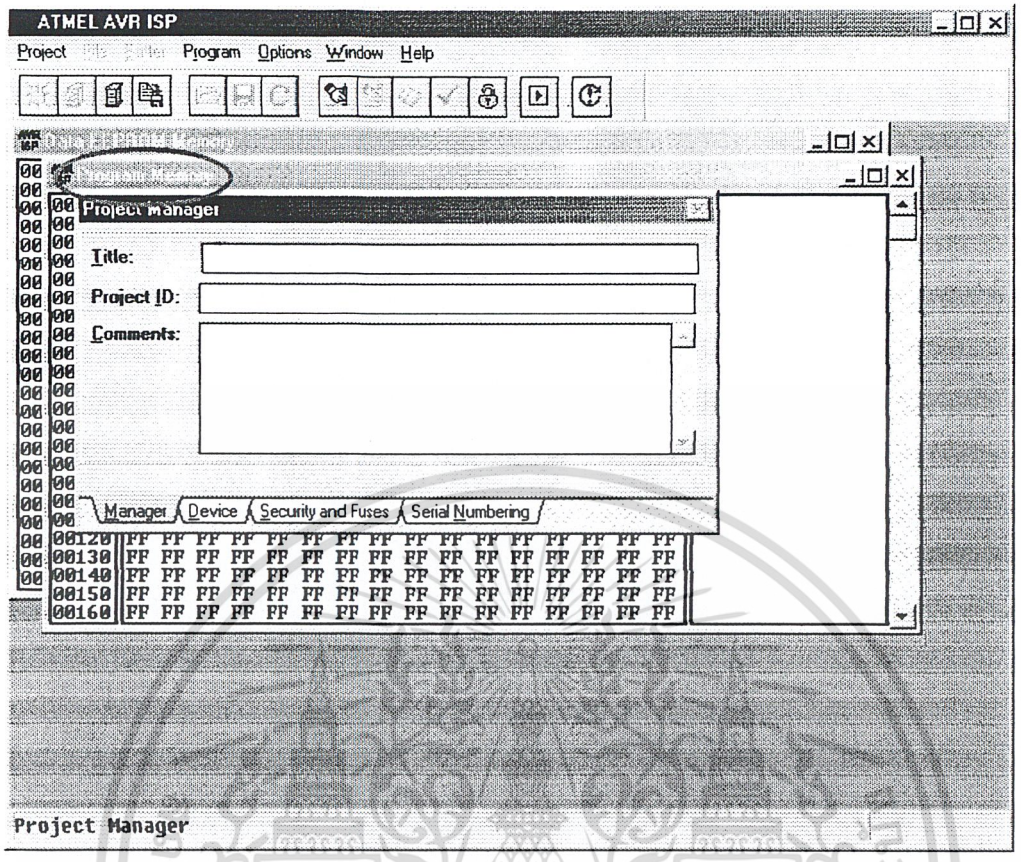
รูปภาคผนวกที่ 1.3 แสดงโปรแกรม Atmel AVR ISP

3.1 เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาแล้ว ให้ทำการเปิด New Project ขึ้นมาใหม่ แล้วจะปรากฏหน้าต่างของ Devices Supported ขึ้นมา จากนั้นให้เลือกหัวข้อ AT89S8252 กด OK ตกลงไป

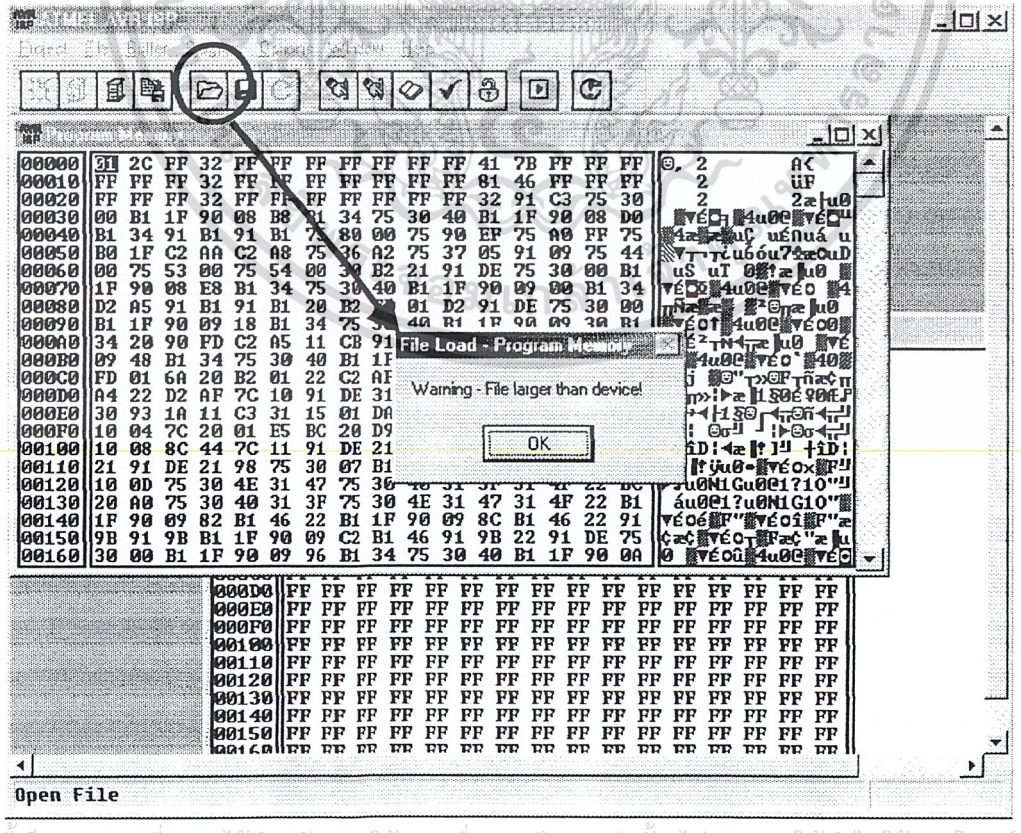
3.2 จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Project Manager, Program Memory และ Data EEPROM Memory ดังรูปภาคผนวกที่ 1.4 ให้เลือกหน้าต่างที่ชื่อ Program Memory

3.3 จากนั้นทำการเปิดไฟล์ HEX ที่ถูก Save ทับด้วยโปรแกรม PonyProg ขึ้นมา จะปรากฏหน้าต่าง File Load Program Memory แสดงข้อความว่า Warning - File larger than device! จากนั้นให้กด OK ตกลงไป ดังรูปภาคผนวกที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



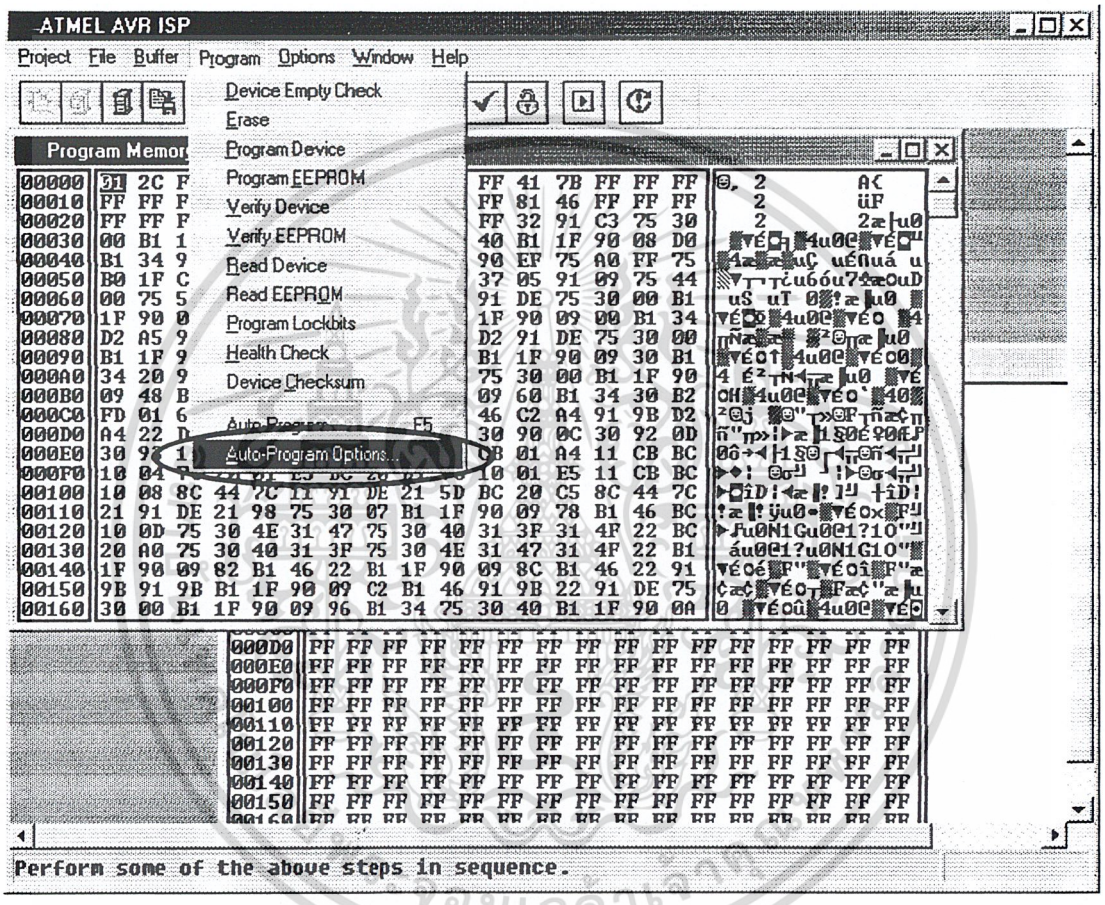
รูปภาคผนวกที่ 1.4



รูปภาคผนวกที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 เมื่อกด OK ตกลงไปแล้ว ให้ทำการเลือก Program -> Auto-Program Options... ตามดังรูปภาคผนวกที่ 1.6 และเมื่อ Click แล้ว ถ้ายังไม่เชื่อมต่อวงจรกับคอมพิวเตอร์ (วงจรต้องทำงานหรือมีไฟเลี้ยงวงจรด้วย) จะปรากฏหน้าต่างดังรูปภาคผนวกที่ 1.7 แต่ถ้าเชื่อมต่อวงจรอย่างถูกต้องแล้ว จะปรากฏหน้าต่างดังรูปภาคผนวกที่ 1.8



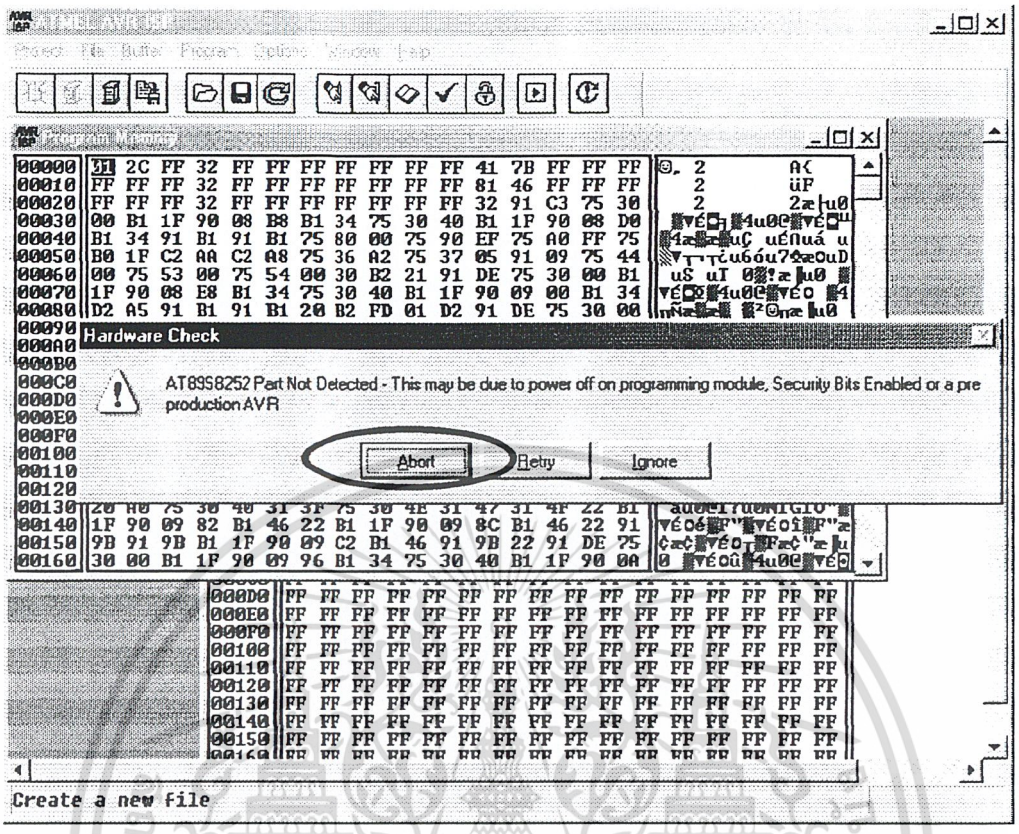
รูปภาคผนวกที่ 1.6

3.4 เมื่อทำถูกต้องได้ตามรูปภาคผนวกที่ 1.8 แล้ว ทำการเลือกตัวเลือกดังรูปภาคผนวกที่ 1.8 จากนั้นกด OK ตกลง

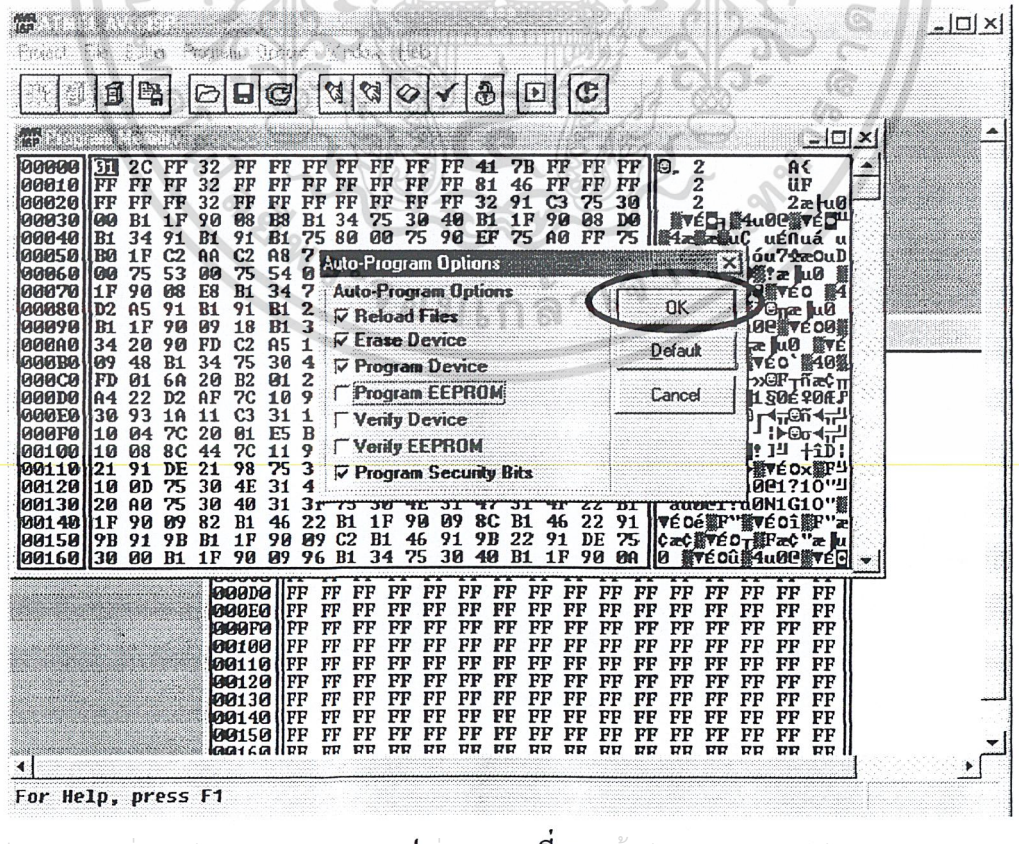
3.5 จากนั้นทำการเลือก Program -> Auto-Program หรือ Click ที่ปุ่มไอคอน หรือ กดปุ่ม F5 ดังรูปภาคผนวกที่ 1.9

3.6 เสร็จแล้ว โปรแกรมจะเริ่มทำการดาวน์โหลดโปรแกรม ดังรูปภาคผนวกที่ 1.10 จนเสร็จสิ้น ก็จะปรากฏหน้าต่างดังรูปภาคผนวกที่ 1.11 กด OK ตกลง ก็เป็นอันเสร็จสิ้นการดาวน์โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

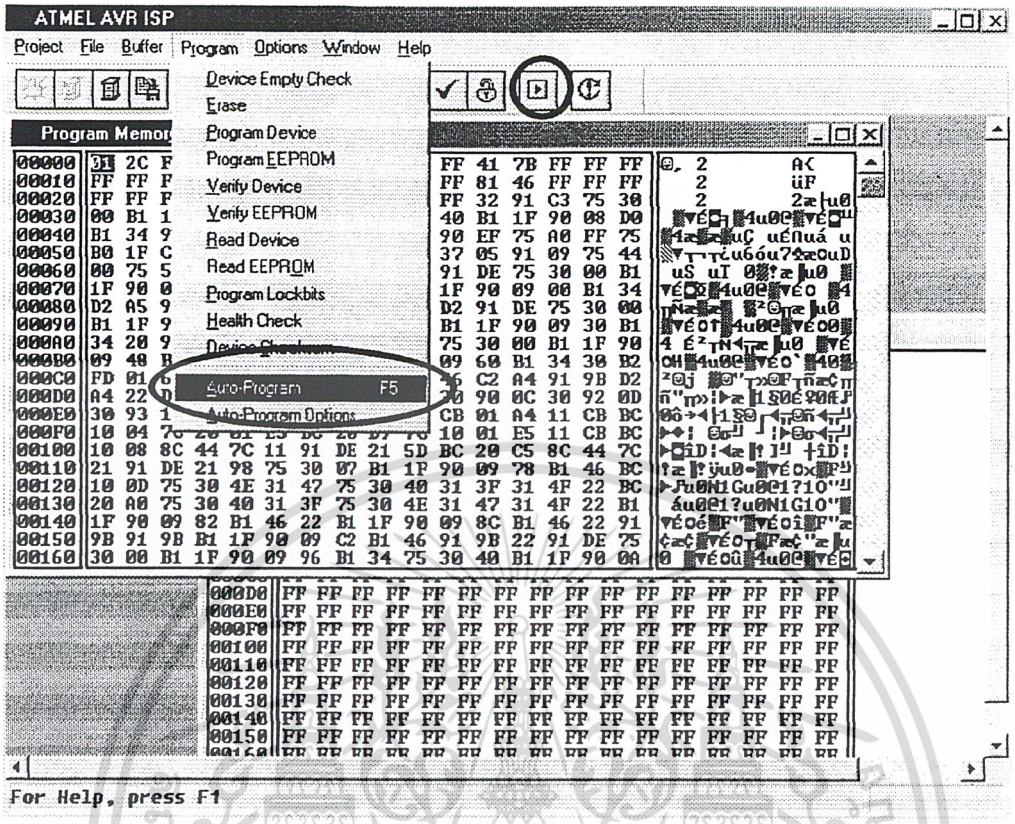


รูปภาคผนวกที่ 1.7

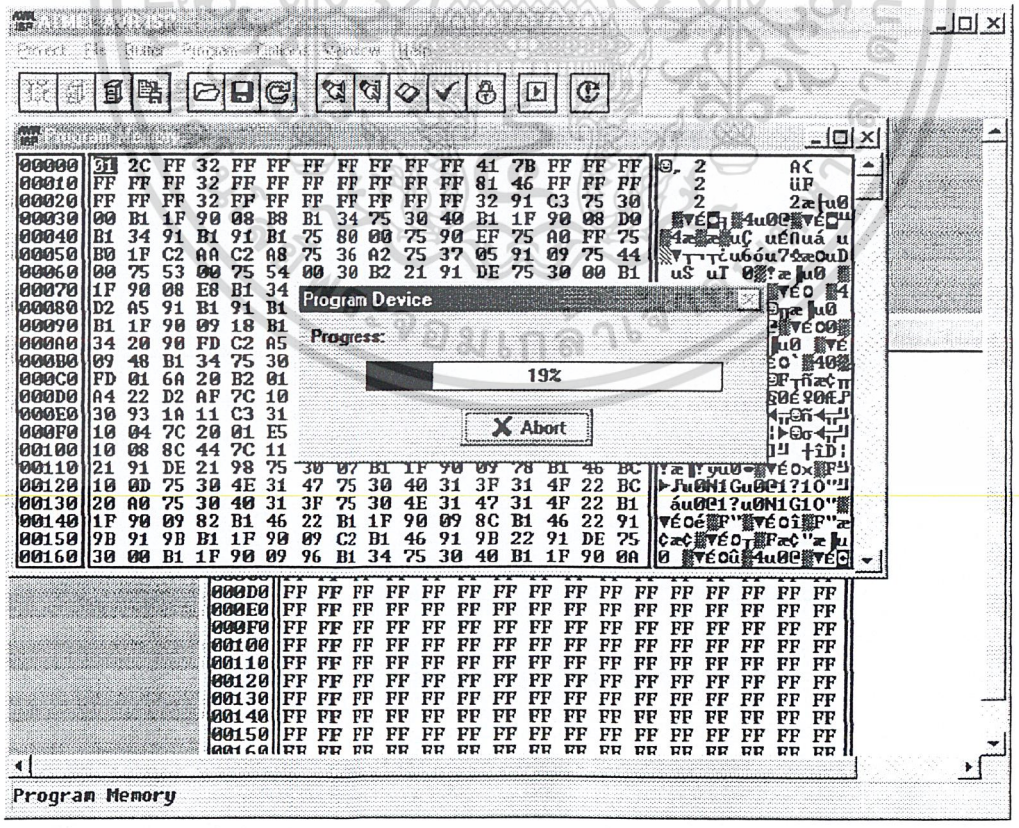


รูปภาคผนวกที่ 1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

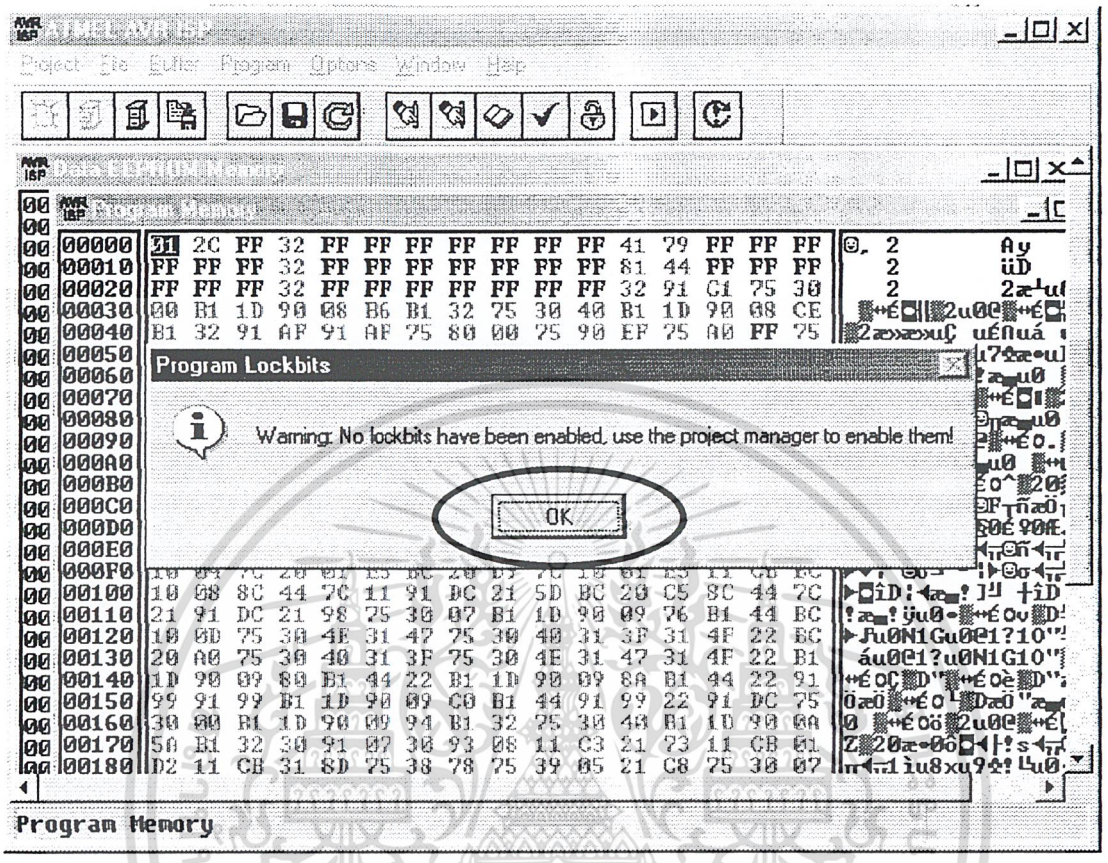


รูปภาคผนวกที่ 1.9

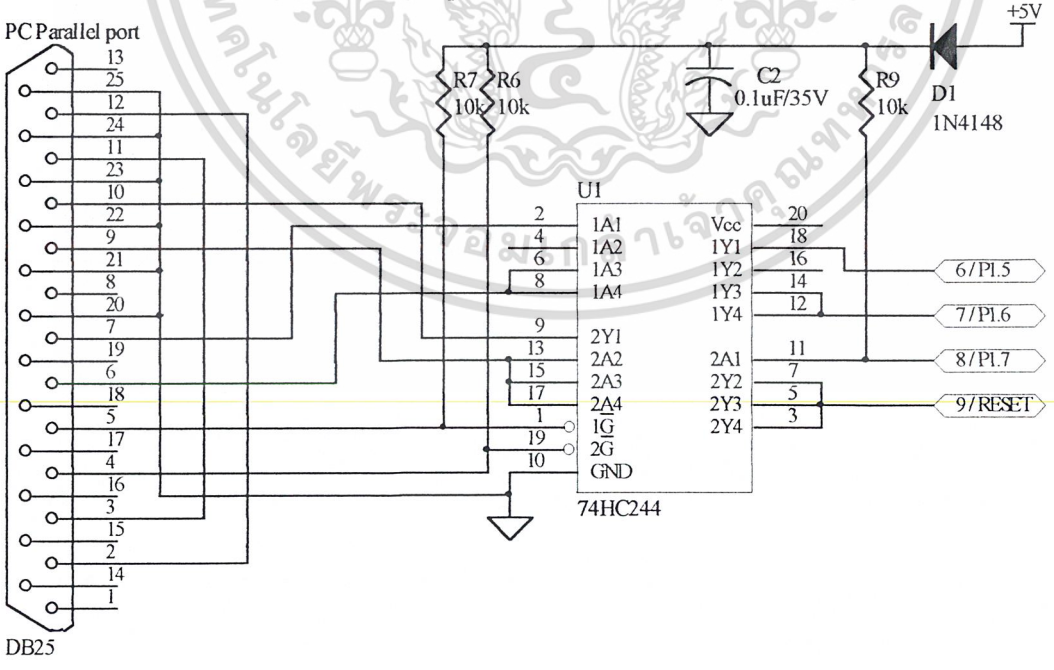


รูปภาคผนวกที่ 1.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

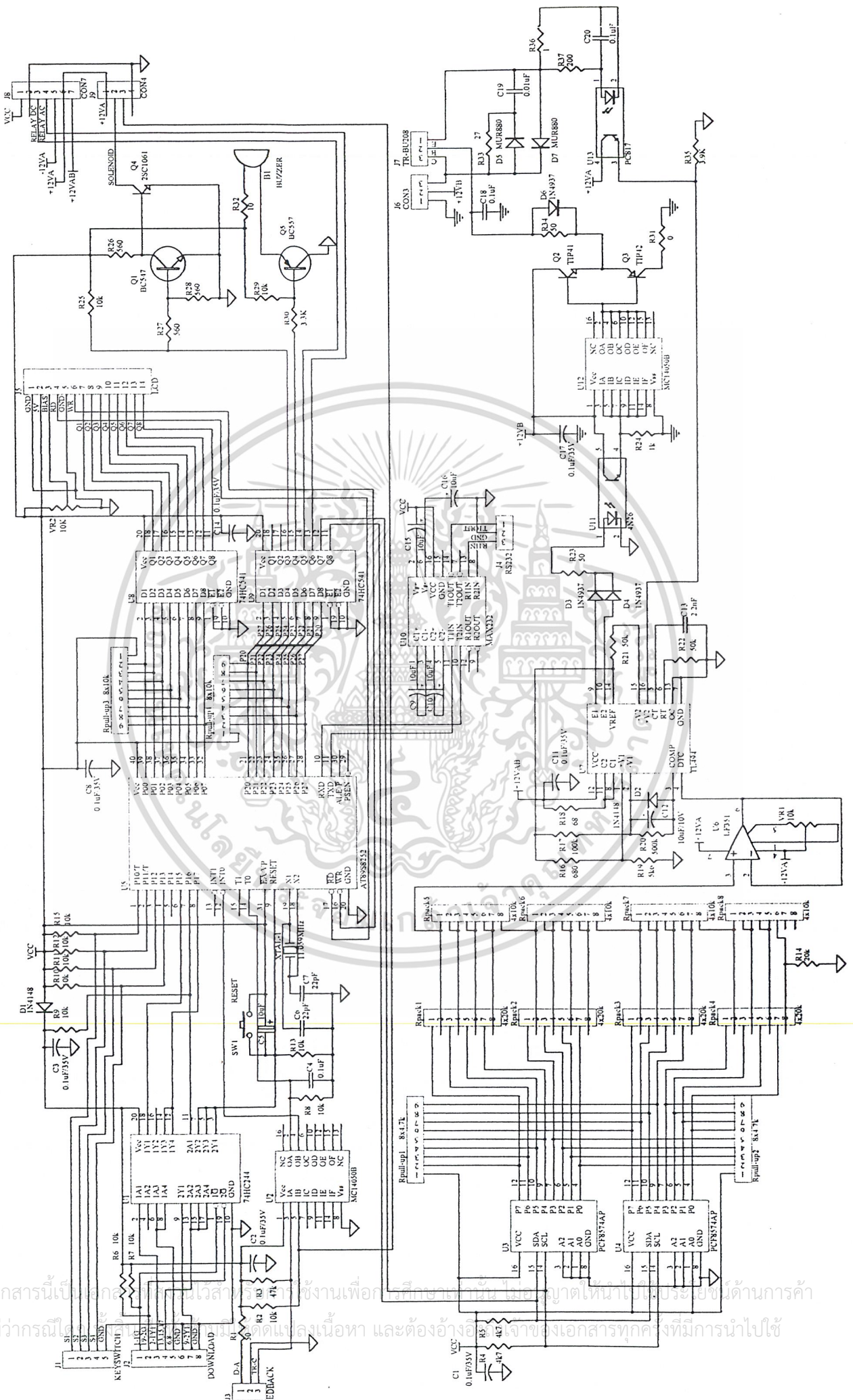


รูปภาคผนวกที่ 1.11

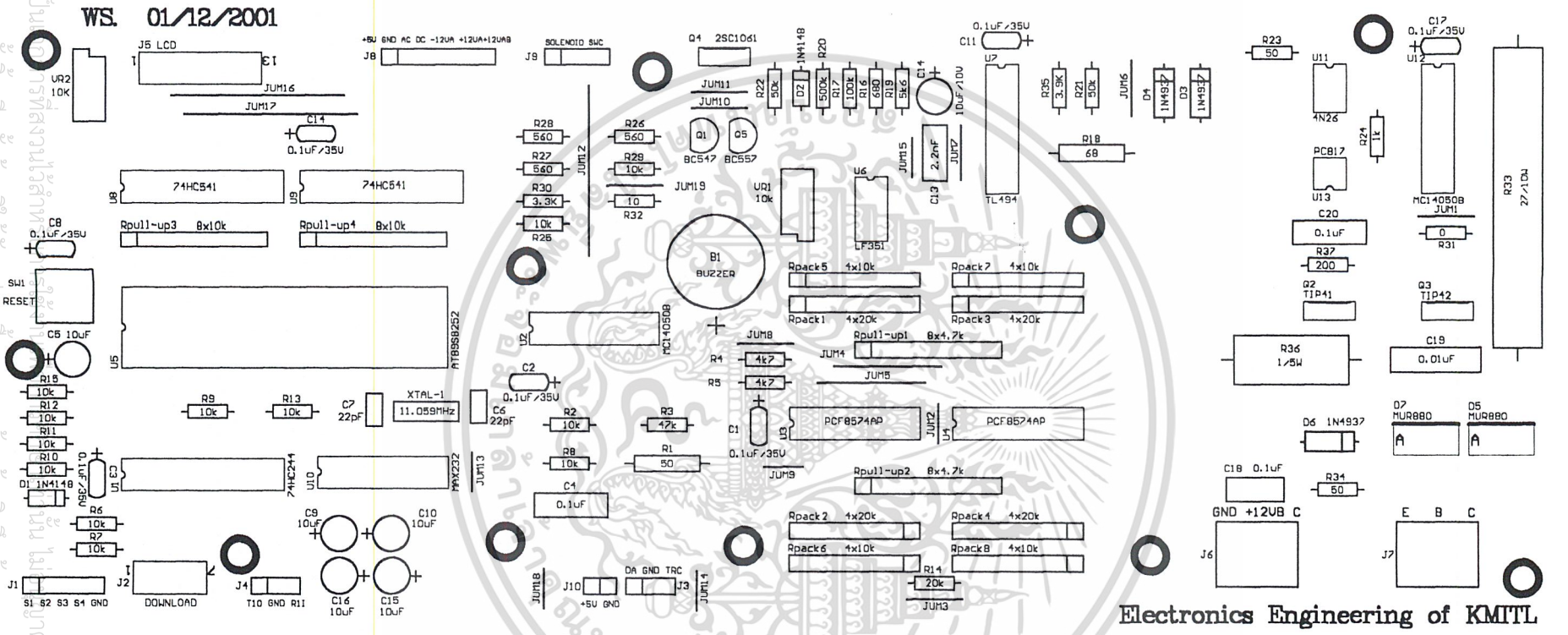


รูปภาคผนวกที่ 1.12 แสดงการต่อวงจรส่วนที่ใช้ดาวน์โหลดโปรแกรมกับพอร์ตขนาน

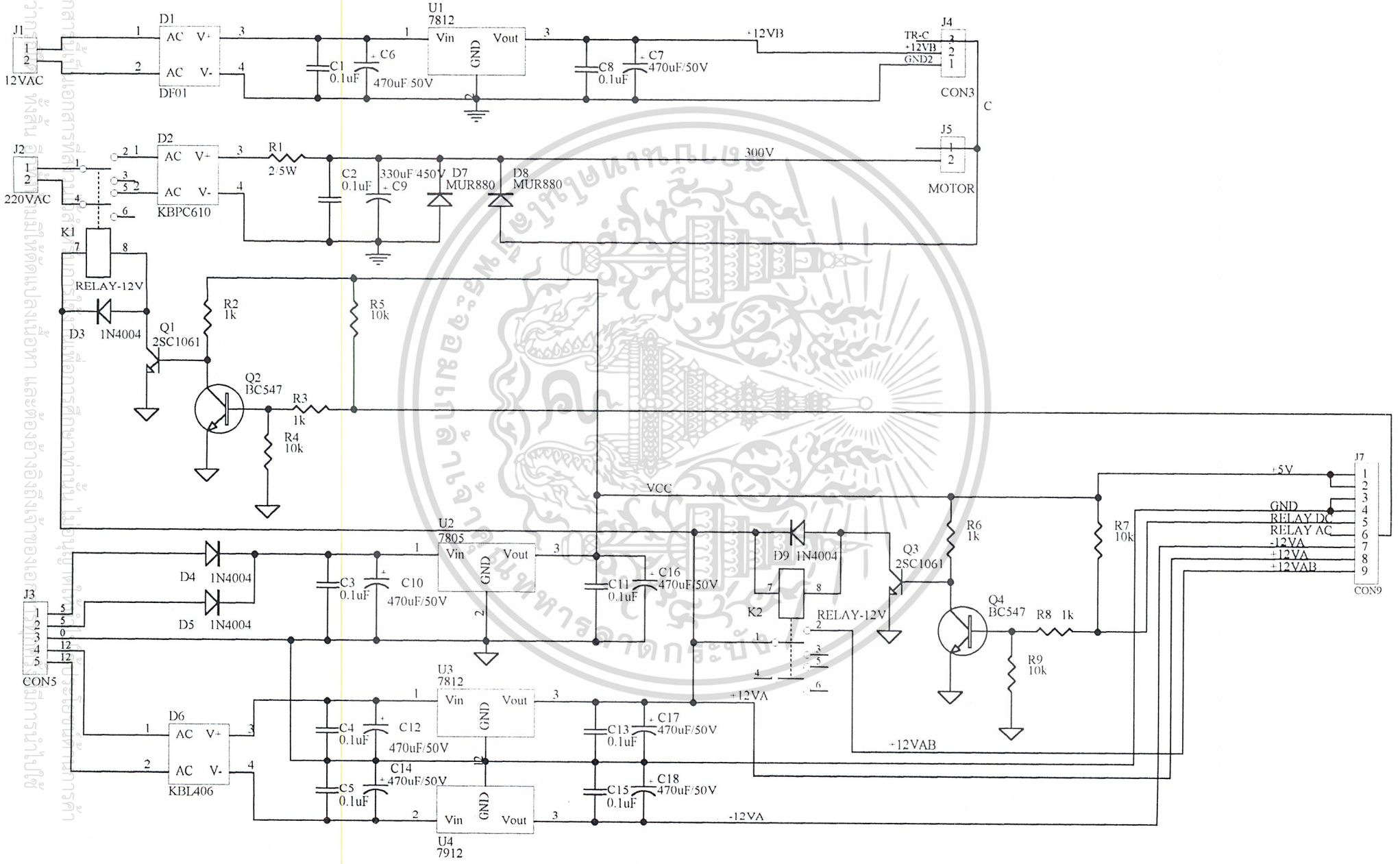
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

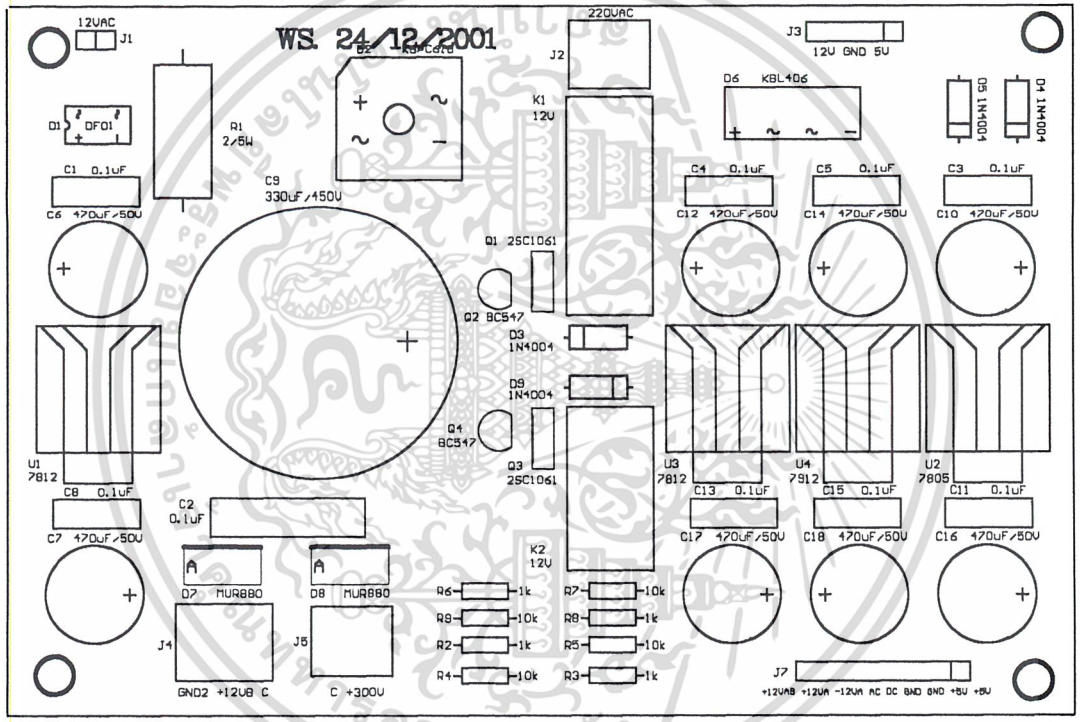


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

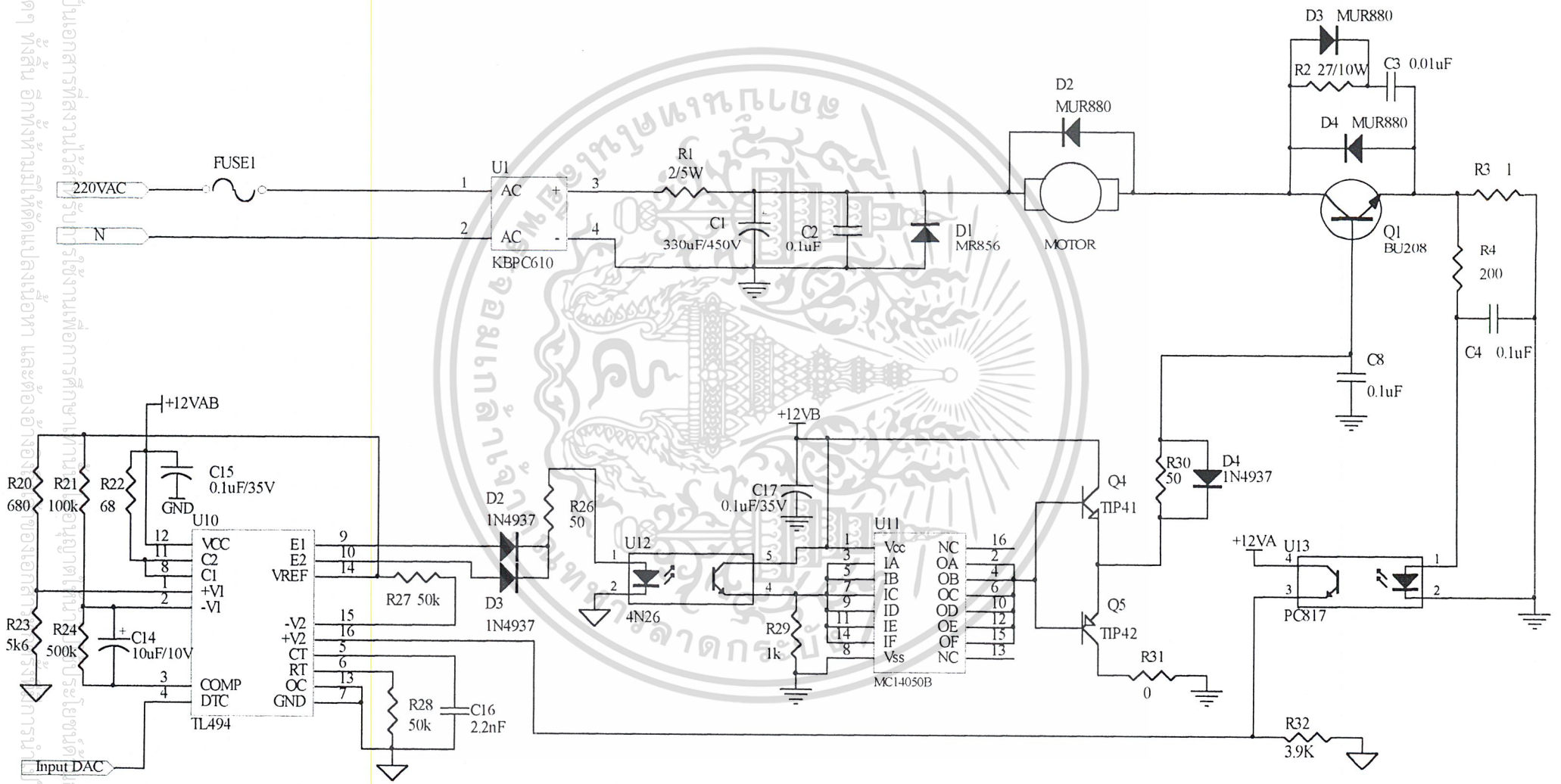

WS. 01/12/2001
J5 LCD
VR2 10K
JUM16
JUM17
C14 0.1uF/35V
+5V GND AC DC -12VA +12VA+12VAB
J8
SOLENOID SWC
J9
Q1 2SC1061
JUM11
JUM10
R22 50k
D2 1N4148
R20 500k
R17 100k
R16 680
R19 5k6
C14 10uF/10V
C11 0.1uF/35V
U7 TL494
R35 3.9K
R21 50k
JUM6
D4 1N4937
D3 1N4937
R23 50
U11 4N26
C17 0.1uF/35V
U12
R24 1k
PC817
U13
C20 0.1uF
R37 200
Q2 TIP41
Q3 TIP42
R36 1/5W
C19 0.01uF
MC14050B
JUM1
0 R31
R33 27/10W
R28 560
R27 560
R30 3.3K
R26 560
R29 10k
10 R32
JUM12
JUM19
Q1 BC547
Q5 BC557
JUM15
2.2nF C13
JUM7
R18 68
U6 LF351
VR1 10k
B1 BUZZER
U8 74HC541
U9 74HC541
Rpull-up3 8x10k
Rpull-up4 8x10k
C8 0.1uF/35V
SW1 RESET
C5 10uF
U5 AT89S8252
U2 MC14050B
C2 0.1uF/35V
R15 10k
R12 10k
R11 10k
R10 10k
D1 1N4148
R9 10k
R13 10k
C7 22pF
XTAL-1 11.059MHz
C6 22pF
R2 10k
R8 10k
C4 0.1uF
R3 47k
R1 50
C1 0.1uF/35V
JUM8
R4 4k7
R5 4k7
JUM4
JUM5
Rpull-up1 8x4.7k
Rpack5 4x10k
Rpack7 4x10k
Rpack1 4x20k
Rpack3 4x20k
U3 PCF8574AP
JUM2
U4 PCF8574AP
JUM9
Rpull-up2 8x4.7k
Rpack2 4x20k
Rpack4 4x20k
Rpack6 4x10k
Rpack8 4x10k
R14 20k
JUM3
D7 MUR880
D5 MUR880
D6 1N4937
C18 0.1uF
R34 50
GND +12VB C
J6
E B C
J7
Q1 TIP42
U1 74HC244
U10 MAX232
JUM13
R6 10k
R7 10k
C9 10uF
C10 10uF
C16 10uF
C15 10uF
J1 S1 S2 S3 S4 GND
J2 DOWNLOAD
J4 T10 GND R11
JUM18
J10 +5V GND
DA GND TRC
J3
JUM14
Electronics Engineering of KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]ที่พัฒนาขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

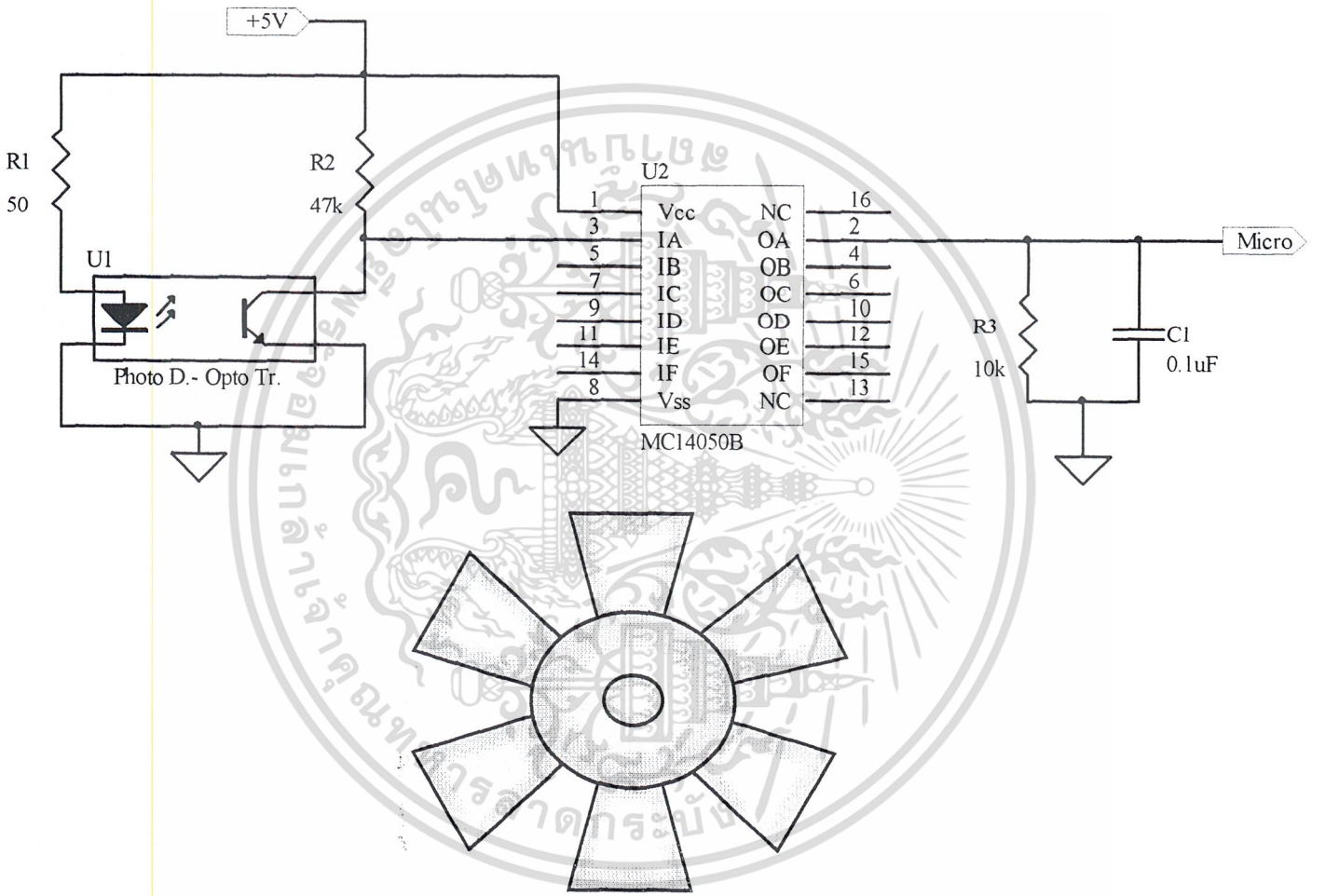

J1
12VAC
D1
DF01
U1
7812
C1
0.1uF
C6
470uF/50V
C8
0.1uF
C7
470uF/50V
+12VB
J4
CON3
J2
220VAC
D2
KBPC610
R1
2/5W
C2
0.1uF
330uF/450V
C9
D7
MUR880
D8
MUR880
300V
J5
MOTOR
K1
RELAY-12V
D3
1N4004
Q1
2SC1061
R2
1k
R5
10k
Q2
BC547
R3
1k
R4
10k
VCC
U2
7805
D4
1N4004
D5
1N4004
C3
0.1uF
C10
470uF/50V
C11
0.1uF
C16
470uF/50V
D9
1N4004
K2
RELAY-12V
Q3
2SC1061
R6
1k
R7
10k
Q4
BC547
R8
1k
R9
10k
J7
CON9
+5V
GND
RELAY DC
RELAY AC
-12VA
+12VA
+12VAB
J3
CON5
D6
KBL406
U3
7812
C4
0.1uF
C12
470uF/50V
C13
0.1uF
C17
470uF/50V
C14
470uF/50V
C5
0.1uF
C15
0.1uF
C18
470uF/50V
+12VA
+12VAB
-12VA
U4
7912


WS. 24/12/2001
12VAC
J1
220VAC
J2
J3
12V GND 5V
D1 DF01
R1 2/5W
C1 0.1uF
C6 470uF/50V
C9 330uF/450V
D6 KBL406
D5 1N4004
D4 1N4004
C4 0.1uF
C12 470uF/50V
C5 0.1uF
C14 470uF/50V
C3 0.1uF
C10 470uF/50V
K1 12V
Q1 2SC1061
Q2 BC547
D3 1N4004
D9 1N4004
Q4 BC547
Q3 2SC1061
U1 7812
C8 0.1uF
C7 470uF/50V
C2 0.1uF
U3 7812
U4 7912
U2 7805
C13 0.1uF
C17 470uF/50V
C15 0.1uF
C18 470uF/50V
C11 0.1uF
C16 470uF/50V
K2 12V
D7 MUR880
D8 MUR880
R6 1k
R8 10k
R2 1k
R4 10k
R7 10k
R8 1k
R5 10k
R3 1k
J4
J5
GND2 +12V8 C
C +30OV
J7
+12VA8 +12VA -12VA AC DC GND GND +5V +5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์และส่วนขับมอเตอร์



วงจรส่วนที่ใช้วัดความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้หลักการทางแสง

Bill of Material for Micro_da02.Bom

1	0	R31
3	0.1uF	C4 C18 C20
1	0.01uF	C19
7	0.1uF/35V	C1 C2 C3 C8 C11 C14 C17
1	1	R36
1	1N4004	D2
1	1N4148	D1
3	1N4937	D3 D4 D6
1	1k	R24
1	2.2nF	C13
1	2SC1061	Q4
1	3.3K	R30
1	3.9K	R35
1	4N26	U11
2	4k7	R4 R5
4	4x10k	Rpack5 Rpack6 Rpack7 Rpack8
4	4x20k	Rpack1 Rpack2 Rpack3 Rpack4
1	5k6	R19
2	8x4.7k	Rpull-up1 Rpull-up2
2	8x10k	Rpull-up3 Rpull-up4
1	10	R32
2	10K	VR1 VR2
12	10k	R2 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12 R13 R15 R25 R29
5	10uF	C5 C9 C10 C15 C16
1	10uF/10V	C12
1	11.059MHz	XTAL-1
1	20k	R14
2	22pF	C6 C7
1	27	R33
1	47k	R3
2	50	R23 R34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	50	R1
2	50k	R21 R22
1	68	R18
1	74HC244	U1
2	74HC541	U8 U9
1	100k	R17
1	200	R37
1	500k	R20
3	560	R26 R27 R28
1	680	R16
1	AT89S8252	U5
1	BC547	Q1
1	BC557	Q5
1	BUZZER	B1
1	CON3	J6
1	CON4	J9
1	CON7	J8
1	DOWNLOAD	J2
1	FEEDBACK	J3
1	KEYSWITCH	J1
1	LCD	J5
1	LF351	U6
1	MAX232	U10
2	MUR880	D5 D7
1	PC817	U13
2	PCF8574AP	U3 U4
1	RESET	SW1
1	RS232	J4
1	TIP41	Q2
1	TIP42	Q3
1	TL494	U7
1	TR-BU208D	J7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bill of Material for Supply.Bom

1	0.1uF/630V	C2		
8	0.1uF/100V	C1 C3 C4 C5 C8 C11 C13 C15		
1	330uF/450V	C9		
8	470uF/50V	C6 C7 C10 C12 C14 C16 C17 C18		
4	1N4004	D3 D4 D5 D9		
2	MUR880	D7 D8		
1	DF01	D1	D-70	Diode Bridge
1	KBL406	D6	D-37R	Diode Bridge
1	KBPC610	D2	D-46	Diode Bridge
4	1k	R2 R3 R6 R8		
1	2/5W	R1		
4	10k	R4 R5 R7 R9		
2	2SC1061	Q1 Q3		
2	BC547	Q2 Q4		
1	7805	U2		
2	7812	U1 U3		
1	7912	U4		
1	RELAY-12V	K1	RELAY_H	
1	RELAY-12V	K2	RELAY_L	
1	12VAC	J1	SIP-2	Connector
1	220VAC	J2	POWER2	Connector
1	MOTOR	J5	POWER2	Connector
1	CON3	J4	POWER3	Connector
1	CON5	J3	SIP-5	Connector
1	CON9	J7	SIP-9	Connector

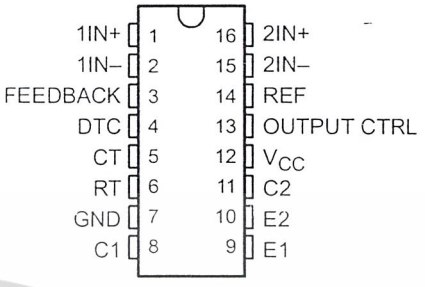
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

- Complete PWM Power Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

D, N, NS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



description

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from –0.3 V to V_{CC} – 2 V. The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from 0°C to 70°C. The TL494I is characterized for operation from –40°C to 85°C.

FUNCTION TABLE

INPUT TO OUTPUT CTRL	OUTPUT FUNCTION
V_I = GND	Single-ended or parallel output
V_I = V_{ref}	Normal push-pull operation

Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

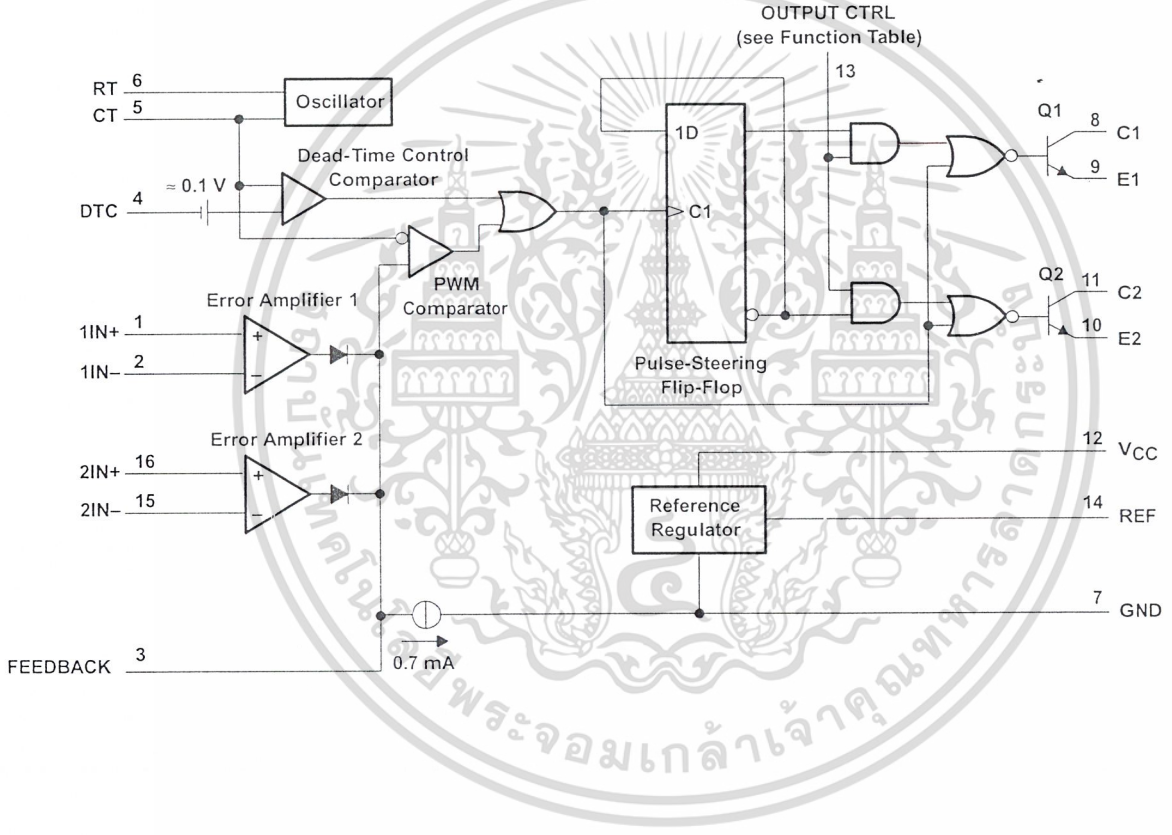
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AVAILABLE OPTIONS

T_A	PACKAGED DEVICES				CHIP FORM (Y)
	SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)	SMALL OUTLINE (NS)	SHRINK SMALL OUTLINE (PW)	
0°C to 70°C	TL494CD	TL494CN	TL494CNS	TL494CPW	TL494Y
–40°C to 85°C	TL494ID	TL494IN	—	—	—

The D, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR). Chip forms are tested at 25°C.

functional block diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในกิจการของทางราชการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

		TL494	UNIT
Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)		41	V
Amplifier input voltage, V_I		V_{CC}+0.3	V
Collector output voltage, V_O		41	V
Collector output current, I_O		250	mA
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 2 and 3)	D package	73	°C
	N package	88	
	NS package	64	
	PW package	108	
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D, N, or PW package	260	°C
Storage temperature range, T_{stg}		–65 to 150	°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
2. Maximum power dissipation is a function of $T_J(max)$, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(max) - T_A)/\theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can impact reliability.
3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51, except for through-hole packages, which use a trace length of zero.

recommended operating conditions

		TL494		UNIT
		MIN	MAX	
Supply voltage, V_{CC}		7	40	V
Amplifier input voltage, V_I		–0.3	V_{CC}–2	V
Collector output voltage, V_O			40	V
Collector output current (each transistor)			200	mA
Current into feedback terminal			0.3	mA
Oscillator frequency, f_{osc}		1	300	kHz
Timing capacitor, C_T		0.47	10000	nF
Timing resistor, R_T		1.8	500	kΩ
Operating free-air temperature, T_A	TL494C	0	70	°C
	TL494I	–40	85	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, V_{CC} = 15 V, f = 10 kHz (unless otherwise noted)

reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Output voltage (REF)	I_O = 1 mA	4.75	5	5.25	V
Input regulation	V_{CC} = 7 V to 40 V		2	25	mV
Output regulation	I_O = 1 mA to 10 mA		1	15	mV
Output voltage change with temperature	ΔT_A = MIN to MAX		2	10	mV/V
Short-circuit output current§	REF = 0 V		25		mA

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.
§ Duration of the short circuit should not exceed one second.

oscillator section, C_T = 0.01 µF, R_T = 12 kΩ (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency¶	All values of V_{CC}, CT, RT, and T_A constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	V_{CC} = 7 V to 40 V, T_A = 25°C		1		Hz/kHz
Frequency change with temperature#	ΔT_A = MIN to MAX			10	Hz/kHz

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.
¶ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

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

Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

error-amplifier section (see Figure 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS		TL494, TL494I			UNIT
			MIN	TYP‡	MAX	
Input offset voltage	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V			2	10	mV
Input offset current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V			25	250	nA
Input bias current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V			0.2	1	µA
Common-mode input voltage range	V_{CC} = 7 V to 40 V		–0.3 to V_{CC}–2			V
Open-loop voltage amplification	ΔV_O = 3 V,	R_L = 2 kΩ, V_O = 0.5 V to 3.5 V	70	95		dB
Unity-gain bandwidth	V_O = 0.5 V to 3.5 V,	R_L = 2 kΩ		800		kHz
Common-mode rejection ratio	ΔV_O = 40 V,	T_A = 25°C	65	80		dB
Output sink current (FEEDBACK)	V_{ID} = –15 mV to –5 V,	V (FEEDBACK) = 0.7 V	0.3	0.7		mA
Output source current (FEEDBACK)	V_{ID} = 15 mV to 5 V,	V (FEEDBACK) = 3.5 V	–2			mA

‡ All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, V_{CC} = 15 V, f = 10 kHz, T_A = 25°C (unless otherwise noted)

reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Output voltage (REF)	I_O = 1 mA		5		V
Input regulation	V_{CC} = 7 V to 40 V		2		mV
Output regulation	I_O = 1 mA to 10 mA		1		mV
Short-circuit output current‡	REF = 0 V		25		mA

† All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.
‡ Duration of the short circuit should not exceed one second.

oscillator section, C_T = 0.01 µF, R_T = 12 kΩ (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency§	All values of V_{CC}, CT, RT, and T_A constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	V_{CC} = 7 V to 40 V		1		Hz/kHz

† All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.
§ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

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

error-amplifier section (see Figure 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Input offset voltage	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V		2		mV
Input offset current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V		25		nA
Input bias current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V		0.2		µA
Open-loop voltage amplification	ΔV_O = 3 V, R_L = 2 kΩ, V_O = 0.5 V to 3.5 V		95		dB
Unity-gain bandwidth	V_O = 0.5 V to 3.5 V, R_L = 2 kΩ		800		kHz
Common-mode rejection ratio	ΔV_O = 40 V		80		dB
Output sink current (FEEDBACK)	V_{ID} = −15 mV to −5 V, V (FEEDBACK) = 0.7 V		0.7		mA

† All typical values, except for parameter changes with tem perature, are at T_A = 25°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, V_{CC} = 15 V, f = 10 kHz (unless otherwise noted)

output section

PARAMETER		TEST CONDITIONS		TL494, TL494Y MIN	TL494, TL494Y TYP†	TL494, TL494Y MAX	UNIT
Collector off-state current		V_{CE} = 40 V,	V_{CC} = 40 V		2	100	μA
Emitter off-state current		V_{CC} = V_C = 40 V,	V_E = 0			–100	μA
Collector-emitter saturation voltage	Common emitter	V_E = 0,	I_C = 200 mA		1.1	1.3	V
	Emitter follower	$V_{O(C1 \text{ or } C2)}$ = 15 V,	I_E = –200 mA		1.5	2.5	
Output control input current		V_I = V_{ref}				3.5	mA

† All typical values except for temperature coefficient are at T_A = 25°C.

dead-time control section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494, TL494Y MIN	TL494, TL494Y TYP†	TL494, TL494Y MAX	UNIT
Input bias current (DEAD-TIME CTRL)	V_I = 0 to 5.25 V		–2	–10	μA
Maximum duty cycle, each output	V_I (DEAD-TIME CTRL) = 0, C_T = 0.1 μF, R_T = 12 kΩ		45%		
Input threshold voltage (DEAD-TIME CTRL)	Zero duty cycle		3	3.3	V
	Maximum duty cycle	0			

† All typical values except for temperature coefficient are at T_A = 25°C.

PWM comparator section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494, TL494Y MIN	TL494, TL494Y TYP†	TL494, TL494Y MAX	UNIT
Input threshold voltage (FEEDBACK)	Zero duty cycle		4	4.5	V
Input sink current (FEEDBACK)	V (FEEDBACK) = 0.7 V	0.3	0.7		mA

† All typical values except for temperature coefficient are at T_A = 25°C.

total device

PARAMETER	TEST CONDITIONS		TL494, TL494Y MIN	TL494, TL494Y TYP†	TL494, TL494Y MAX	UNIT
Standby supply current	RT = V_{ref}, All other inputs and outputs open	V_{CC} = 15 V		6	10	mA
		V_{CC} = 40 V		9	15	
Average supply current	V_I (DEAD-TIME CTRL) = 2 V,	See Figure 1		7.5		mA

† All typical values except for temperature coefficient are at T_A = 25°C.

switching characteristics, T_A = 25°C

PARAMETER	TEST CONDITIONS		TL494, TL494Y MIN	TL494, TL494Y TYP†	TL494, TL494Y MAX	UNIT
Rise time	Common-emitter configuration,	See Figure 3		100	200	ns
Fall time				25	100	ns
Rise time	Emitter-follower configuration,	See Figure 4		100	200	ns
Fall time				40	100	ns

† All typical values except for temperature coefficient are at T_A = 25°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

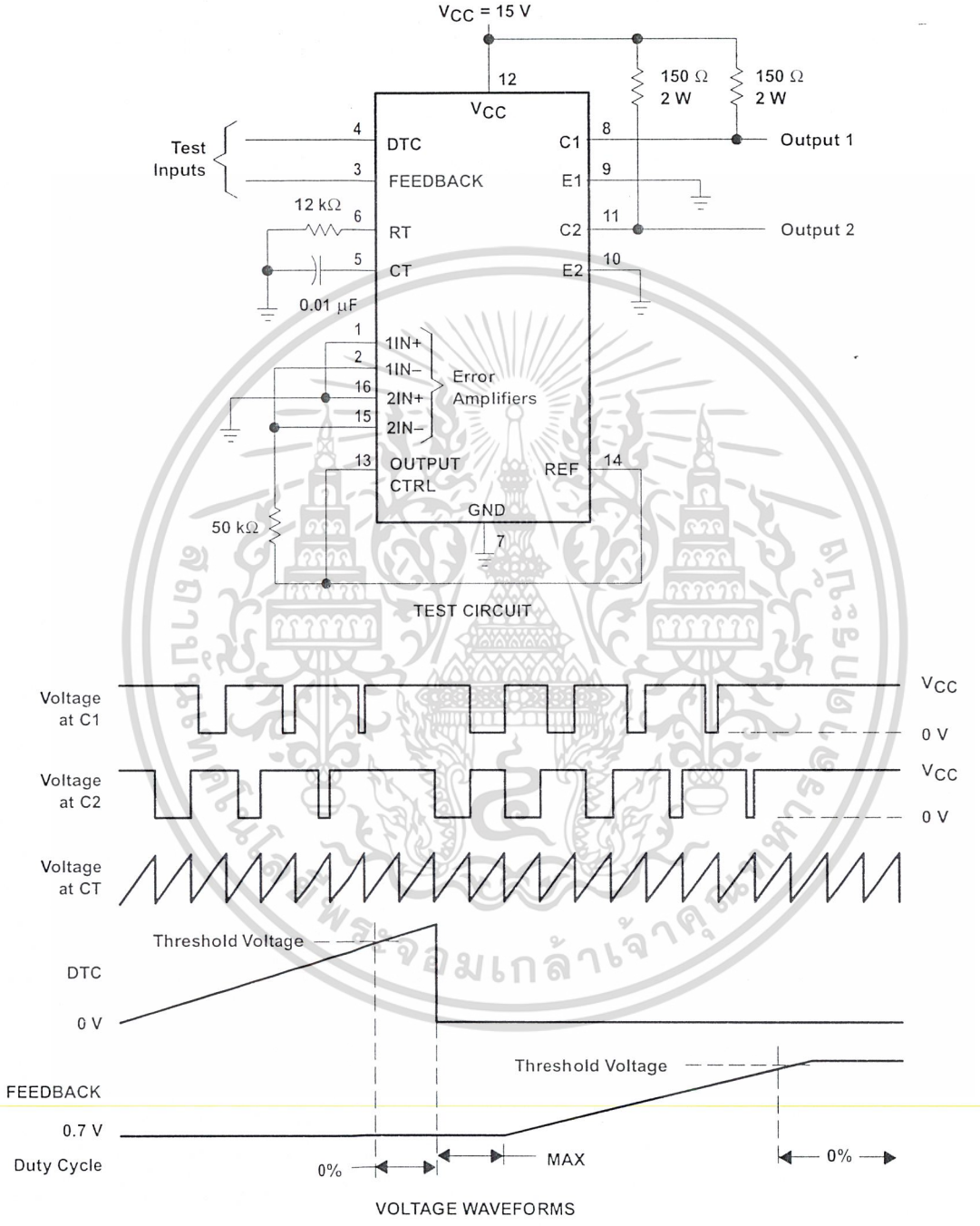


Figure 1. Operational Test Circuit and Waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

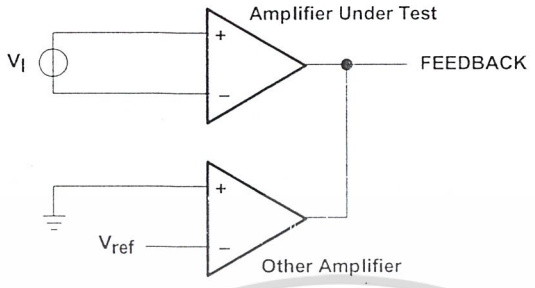
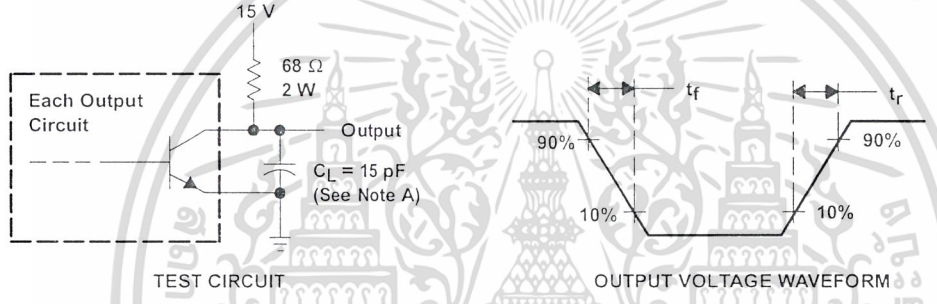
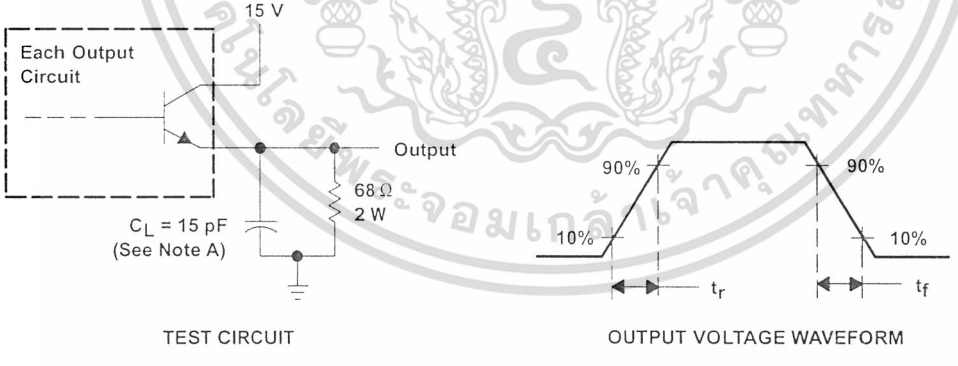


Figure 2. Amplifier Characteristics



NOTE A: C_L includes probe and jig capacitance.

Figure 3. Common-Emitter Configuration

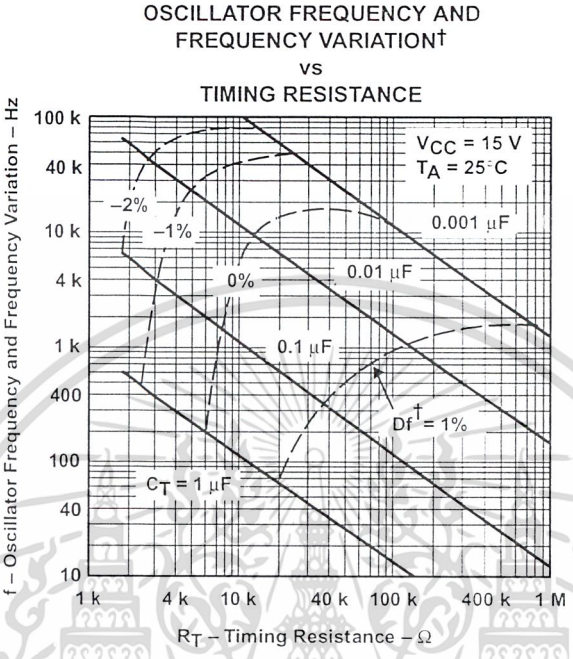


NOTE A: C_L includes probe and jig capacitance.

Figure 4. Emitter-Follower Configuration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS



† Frequency variation (Δf) is the change in oscillator frequency that occurs over the full temperature range.

Figure 5

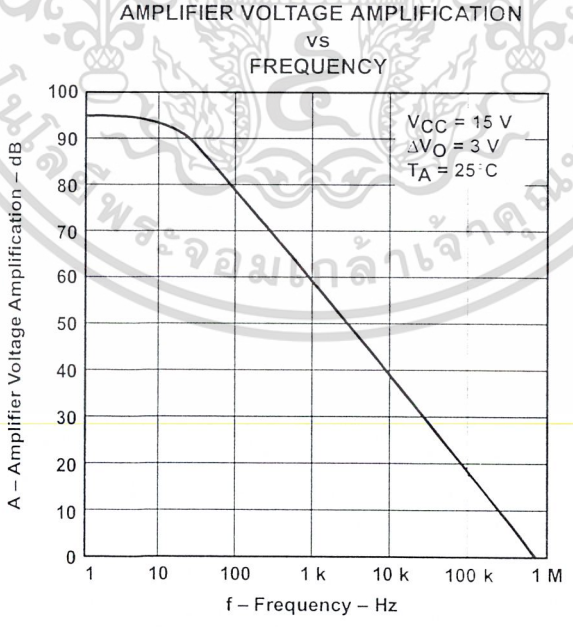


Figure 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้