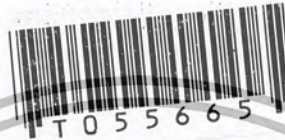
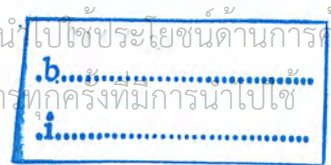


วจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์
Interface Circuit to Measure Capacitance Changes in Capacitive Sensors



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดให้ติดต่อแจ้งให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55665
วัน,เดือน,ปี 24 พ.ศ. 2548



ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเฟนเซอร์

ผู้จัดทำ

1. นายชวลิต ด้านพรประเสริฐ 44015279

2. นายวรณิตย์ ชูโต 44015298



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. คงศักดิ์ อนันตศิริภรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์
(Interface Circuit to Measure Capacitance Changes in Capacitive Sensors)

นายชวลิต คำนพรประเสริฐ

นายวรนิติ์ ชูโต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. คงศักดิ์ อนันตหิรัญรัตน์

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้ เป็นการศึกษาวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมทางกรวัดอุตสาหกรรม วงจรเชื่อมต่อนี้สามารถที่จะใช้วัดค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ซึ่งข้อดีของวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ คือ สามารถปรับค่าเริ่มต้นการใช้งานคาปาซิทีฟเซนเซอร์ได้อย่างอิสระ

Abstract

This thesis presents an interface circuit to measure capacitance variation in capacitive sensor, especially suitable for industrial measurements. This interface circuit can be use with various types of capacitive sensor. The interesting is that the measurement result through this interface circuit are independent of the initial capacitance of the sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของบุคคลหลายฝ่ายซึ่งให้ความรู้ข้อมูล และกำลังใจจากเพื่อน ๆ และท่านอาจารย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านอาจารย์คงศักดิ์ อนันตศิริภูริรัตน์ เป็นที่ปรึกษาและคอยตรวจสอบผลงานในการพัฒนาของข้าพเจ้า ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจช่วยเหลือและสนับสนุน ข้าพเจ้าตลอดมา ผู้จัดทำระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้



นายชวลิต ด้านพรประเสริฐ
นายวรนิทย์ ชูโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ

1

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจร

3

2.1 วงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

3

2.2 วงจรดีฟเฟอเรนเชียลเอเคอร์

4

2.3 วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น

8

2.4 วงจรกรองผ่านความถี่

11

2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

14

2.6 วงจรรวมสัญญาณ

15

2.7 ไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ PIC16F87x

17

2.7.1 การทำงานของไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

19

2.7.2 การเลือกความถี่สัญญาณนาฬิกาของการแปลงสัญญาณ

21

2.7.3 กระบวนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

21

2.7.4 แรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

22

2.7.5 การใช้งานไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

23

2.8 การขับไมโครแสดงผลแบบผลึกเหลว

25

2.8.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมไมโคร LCD

26

2.8.2 ไมโคร LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด (LCD 16 × 1)

28

2.8.3 คำสั่งควบคุมไมโคร LCD

28

2.8.4 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่ไมโคร LCD

31

2.8.5 จังหวะการทำงานของ LCD ไมโคร

32

2.9 วงจรไจเรเตอร์

32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลอง	35
3.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ตั้งแต่ 1 pF – 1nF	35
3.1.1 ผลการคำนวณวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์	35
ส่วนที่ 1 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล	35
ส่วนที่ 2 วงจรโวลเทจเฟอเดอเรเตอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล	37
3.1.2 ผลการทดลองเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์	40
3.1.3 ความผิดพลาดค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	44
3.2 การทดลองที่ 2 วัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ตั้งแต่ 1 nF – 470 nF	45
3.2.1 ผลการคำนวณวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์	45
ส่วนที่ 1 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล	45
ส่วนที่ 2 วงจรโวลเทจเฟอเดอเรเตอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล	47
3.2.2 ผลการทดลองวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์	50
3.2.3 ความผิดพลาดค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	54
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์	55
หนังสืออ้างอิง	

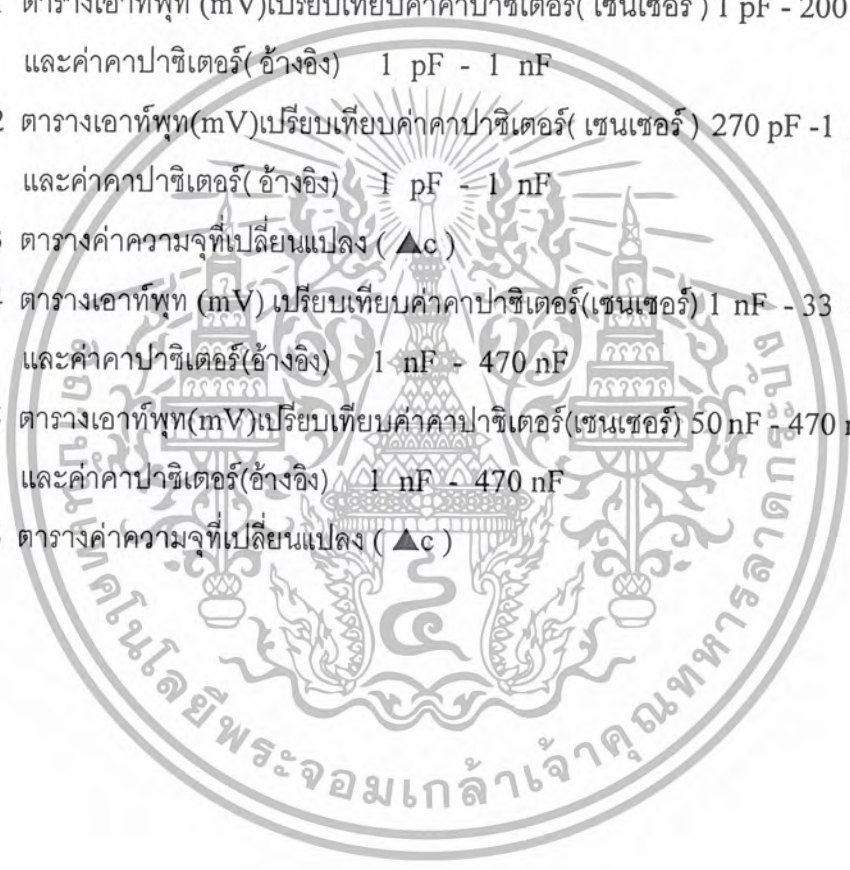
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์	3
รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานดิฟเฟอเรนเชียลเอมพลีฟายเออร์	4
รูปที่ 2.3 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอมพลีฟายเออร์ (<i>Differentiator amplifier</i>) แบบปรับปรุง	8
รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบวกและแบบลบ	9
รูปที่ 2.5 วงจรหาค่าสัมบูรณ์ที่ยังตรง	11
รูปที่ 2.6 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและผลตอบสนองทางความถี่	13
รูปที่ 2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (<i>Inverting amplifier</i>)	15
รูปที่ 2.8 วงจรรวมสัญญาณ (<i>Somming amplifier</i>)	16
รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล	20
รูปที่ 2.10 โฟลวชาร์ตของโปรแกรมการใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล	24
รูปที่ 2.11 โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล	25
รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD	26
รูปที่ 2.13 รูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร	27
รูปที่ 2.14 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	33
รูปที่ 2.15 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (เปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์)	34
รูปที่ 3.1 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์ (เซนเซอร์) และค่าคาปาซิเตอร์ (อ้างอิง)	42
รูปที่ 3.2 กราฟค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	44
รูปที่ 3.3 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์ (เซนเซอร์) และค่าคาปาซิเตอร์ (อ้างอิง)	52
รูปที่ 3.4 กราฟค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	54

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร	14
ตาราง 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของคาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลกับความถี่สูงสุดของสัญญาณนาฬิกา	22
ตาราง 2.3 แสดงความสัมพันธ์การทำงานของขา RS,R/W และ E ของโมดูลLCDแบบอักษร	27
ตาราง 3.1 ตารางเอาต์พุต (mV)เปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 1 pF - 200 pF และค่าคาปาซิเตอร์(อ่างอิง) 1 pF - 1 nF	40
ตาราง 3.2 ตารางเอาต์พุต(mV)เปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 270 pF -1 nF และค่าคาปาซิเตอร์(อ่างอิง) 1 pF - 1 nF	41
ตาราง 3.3 ตารางค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	43
ตาราง 3.4 ตารางเอาต์พุต (mV) เปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 1 nF - 33 nF และค่าคาปาซิเตอร์(อ่างอิง) 1 nF - 470 nF	50
ตาราง 3.5 ตารางเอาต์พุต(mV)เปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 50 nF - 470 nF และค่าคาปาซิเตอร์(อ่างอิง) 1 nF - 470 nF	51
ตาราง 3.6 ตารางค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (Δc)	53



บทที่ 1

บทนำ

วงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งนอกจากจะวัดค่าค่าปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงแล้วยังสามารถปรับค่าเริ่มต้นของค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ได้อย่างอิสระ จึงควรได้รับการสนใจและทำวิจัยโดยเฉพาะการวิจัยเพื่อหาวงจรรองรับวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ที่เหมาะสม กล่าวคือ แต่ละบริษัทที่ผลิตค่าปาซิทีฟเซนเซอร์มีค่าเริ่มต้นการใช้งานที่หลากหลาย ดังนั้นเราจึงต้องปรับค่าเริ่มต้นค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ให้มีมาตรฐานเดียวกัน เพื่อการใช้งานที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.1 ขอบเขตการศึกษา

- 1.) ศึกษาออกแบบวงจรดีฟเฟอร์เรนเชียลเพื่อรองรับวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์
- 2.) ศึกษาว่าเราสามารถนำวงจรดีฟเฟอร์เรนเชียลนี้มาใช้งานเป็นวงจรตรวจจับค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ได้หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการสร้างวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟ

- 1.) เพื่อสามารถปรับค่าเริ่มต้นของค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ได้อย่างอิสระ
- 2.) เพื่อการใช้งานค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ในแต่ละชนิดที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3 ความเป็นมาของโครงการ

จากการที่ได้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานอุตสาหกรรมไทยในการวัดค่าค่าปาซิแตนซ์ในของเหลวหรือการวัดค่าค่าปาซิแตนซ์ในความชื้น การประสบปัญหาการใช้งานค่าเริ่มต้นของค่าปาซิทีฟเซนเซอร์ ราคาเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่แพง โครงการงานการศึกษาวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์จึงได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยโครงการนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าปาซิแตนซ์ในค่าปาซิทีฟเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรดีฟเฟอเรนเชียลเพื่อรองรับวงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ และศึกษาว่าเราสามารถนำวงจรดีฟเฟอเรนเชียลนี้มาใช้งานเป็นวงจรตรวจจับค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ได้หรือไม่

ผู้จัดทำคาดหวังว่าโครงการนี้จะได้รับการพัฒนาต่อไปเพื่อเป็นประโยชน์กับโรงงานอุตสาหกรรมไทยและช่วยพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไม่มากนักน้อย



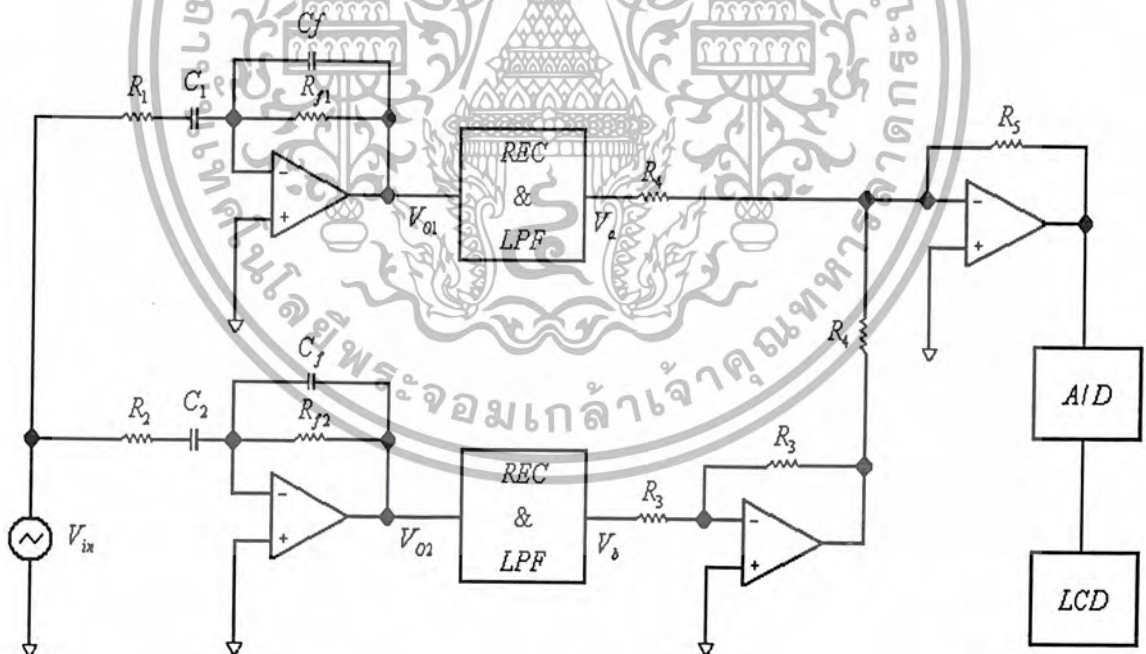
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจร

2.1 วงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

วงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนที่สัญญาณเป็นไฟตรงจากการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ โดยนำคาปาซิทีฟเซนเซอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์มาตรวจจับค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลง (โดยแทนคาปาซิทีฟเซนเซอร์ด้วย C_1) เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) $2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$ ที่ V_{in} และเมื่อ C_1 ตรวจจับค่าคาปาซิแตนซ์ได้ที่ค่า ๆ หนึ่งจะทำให้วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์สร้างสัญญาณคลื่นโคไซน์ (Cosine wave) ซึ่งมีแอมพลิจูดที่ค่า ๆ หนึ่ง (V_{o1}) และนำไปต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแสที่เที่ยงตรงเต็มลูกคลื่นและวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อแปลงสัญญาณเป็นไฟตรง (V_a)



รูปที่ 2.1 วงจรเชื่อมต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

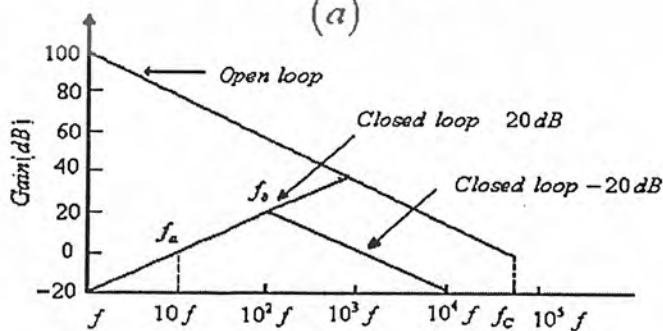
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่ใช้สร้างแรงดันเปรียบเทียบไฟตรง โดยนำวงจรโวลเทจเฟอเดอเรเตอร์ใช้งานร่วมกับวงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์เพื่อสร้างแรงดันเปรียบเทียบ (โดยแทนวงจรถิฟเฟอเดอเรเตอร์ด้วย C_2) เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ $2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$ ที่ V_{in} เราจะปรับค่าคาปาซิแตนซ์โดย C_2 เพื่อให้วงจรถิฟเฟอเดอเรเตอร์สร้างสัญญาณคลื่นโคไซน์ซึ่งมีแรงดัน (V_{O2}) เท่ากับวงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์วงจรรวม (V_{O1}) จากนั้นนำไปต่อร่วมกับวงจรรีจิสเตอร์ที่เรียงตรงเต็มลูกคลื่นและวงจรรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อแปลงสัญญาณเป็นไฟตรง (V_b) และนำไปต่อกับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสเพื่อปรับสัญญาณไฟตรงให้กลับเฟส จากนั้นจะนำไปต่อเข้ากับวงจรรวมสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟตรงจากทั้ง 2 ส่วน และนำสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณผ่านโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลของ PIC16F87x เพื่อแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอล และนำไปแสดงผลทางโมดูลแสดงผล (LCD) โดยนำแรงดันเอาต์พุตของวงจรถิฟเฟอเดอเรเตอร์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลง เพื่อหาค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง ดังรูป 2.2

2.2 วงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ (Differentiator)



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.2 วงจรถิฟเฟอเรนชิเอเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.2 เป็นวงจรถิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์ซิงซึ่งการทำงานในทางคณิตศาสตร์ของวงจรมี คือสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาได้มาจากผลของสัญญาณอินพุต โดยวงจรถิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์ซิง สร้างจากพื้นฐานของวงจรถิฟเฟอเรนเชียล (Inverting amplifier) โดยการแทนค่าความต้านทาน R_f ด้วยค่าตัวเก็บประจุ C_1 สำหรับค่าแรงดันเอาต์พุต (Output voltage) สามารถที่จะหาได้จาก กฎการไหลกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ สมการที่ได้เมื่อมองจากโหนด V_2 เป็น

$$i_c = i_b + i_f$$

เนื่องจาก $i_b = 0$ V

$i_c = i_f$

$C_1 \frac{d}{dt}(V_m - V_2) = \frac{(V_2 - V_0)}{R_f}$

แต่ $V_1 = V_2 = 0$ V ดังนั้น

$C_1 \frac{d}{dt} V_m = -\frac{V_0}{R_f}$

หรือ

$V_0 = -R_f C_1 \frac{d}{dt} V_m$

และทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$\frac{V_0}{V_m} = -R_f C_1 s$

ดังนั้นค่าเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับค่า $R_f C_1$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตต่อเวลา เนื่องจากวงจรถิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์ซิง จะปฏิบัติตัวเป็นส่วนกลับกับ Integrator's function ถ้าเราป้อนสัญญาณคลื่นโคไซน์เป็นอินพุตสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นซายน์และถ้าเราป้อนสัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular wave) จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อย่างไรก็ตามวงจรถิฟเฟอเรนเชียลอินเวอร์ซิงในรูปที่ 2.2 จะไม่นำมาทำเพราะมันจะมีปัญหาในทางปฏิบัติค่าอัตราขยายของ (Gain) วงจร (R_f/X_{C1}) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ที่

อัตราขยาย 20 dB/decade ที่จุดนี้วงจรจะไม่เสถียรโดยค่าอิมพีแดนซ์ (X_{C1}) จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้วงจรมีความไวต่อสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงเมื่อทำการขยายสัญญาณรบกวนนี้จะมีผลต่อค่าสัญญาณเอาต์พุตที่มีผลทำให้ผิดเพี้ยนไปได้ ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินพุตพื้นฐานจะโชว์ในรูป 2.2(b) f_a เป็นความถี่ที่ซึ่งมีอัตราขยายเป็น 0 dB และมีสมการดังนี้

$$f_a = \frac{1}{(2\pi R_f C_1)}$$

โดย f_c คือ *Unity gain-bandwidth* ของ *Op-amp* และ (f_a) เป็นความถี่ช่วงทำงาน

การแก้ปัญหาทั้งในเรื่องของเสถียรภาพและสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูงสามารถทำได้ โดยการเพิ่มค่า R_f และ C_f ดังที่โชว์ในรูป 2.3(a) วงจรนี้จะเป็นวงจรที่นำไปใช้จริง จากความถี่ f ถึง f_L ค่า *Gain* จะเพิ่มขึ้น 20 dB/decade อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่ถึง f_H ค่า *Gain* จะลดลง 20 dB/decade การเปลี่ยนแปลงที่ 40 dB/decade นี้ค่า *Gain* โดย $R_f C_f$ และ $R_f C_1$ จะมีความสัมพันธ์กันโดย *Gain-limiting frequency* (f_b) คือ

$$f_L < f_b < f_H$$

โดย

$$f_L = \frac{1}{(2\pi R_f C_1)}$$

$$f_H = \frac{1}{(2\pi R_f C_f)} < f_c$$

$$f_c = \text{Unity gain-bandwidth}$$

สัญญาณอินพุตจะถูกแบ่งถ้า *Time period* (T) ของสัญญาณอินพุตใหญ่กว่าหรือเท่ากับ $R_f C_f$ นั่นคือ

$$T \geq R_f C_f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปขั้นตอนการออกแบบวงจร

- 1) เลือก f_b ให้อยู่ในระหว่าง $\frac{1}{(2\pi R_1 C_1)}$ กับ $\frac{1}{(2\pi R_f C_f)}$ แล้วคำนวณหาค่า R_1, R_f, C_f
- 2) เลือกค่า $R_f C_f > R_1 C_1$ or $R_f C_f$

การออกแบบวงจร

ออกแบบวงจรดีฟเฟอเรนเชียลโดยสัญญาณอินพุตไม่เกิน 4 MHz

Solution

$$f_L = \frac{1}{(2\pi R_1 C_1)}$$

ให้ $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 100 \text{ pF}$ แล้วจะได้

$$f_L = \frac{1}{(2 \times \pi \times 50 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12})} = 31.847 \text{ kHz}$$

$$f_H = \frac{1}{(2\pi R_f C_f)}$$

ให้ $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $C_f = 1 \text{ pF}$ แล้วจะได้

$$f_H = \frac{1}{(2 \times \pi \times 100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-12})} = 1.59 \text{ MHz}$$

เพราะฉะนั้น $f_L < f_b < f_H$

และ $R_f C_f > R_1 C_1$ or $R_f C_f$

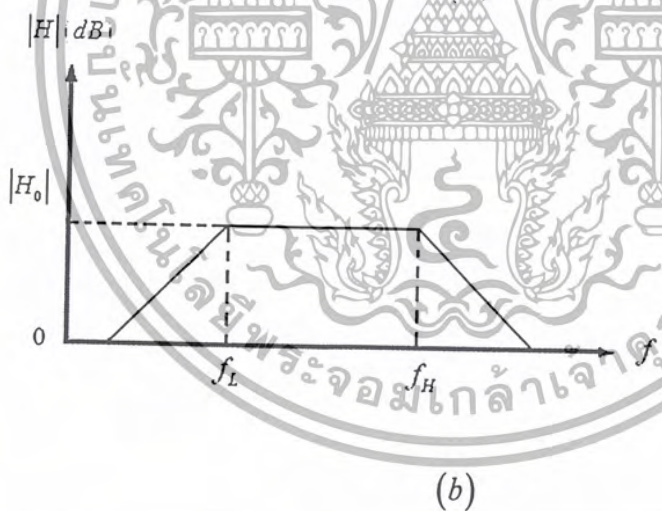
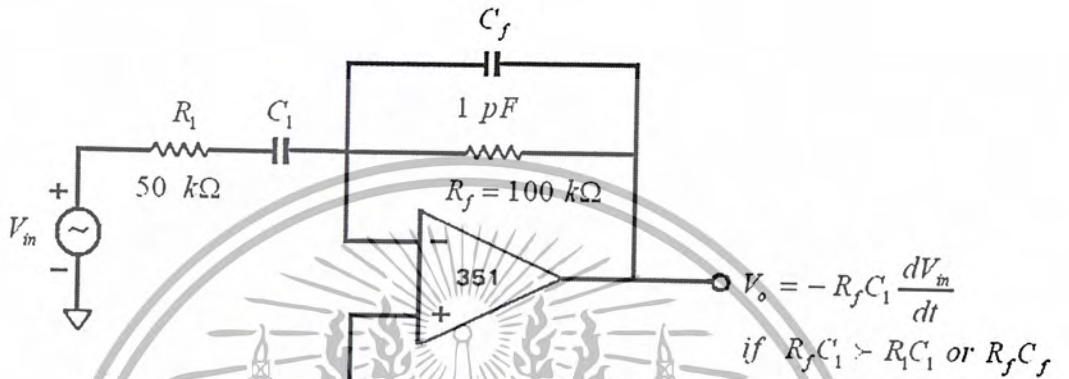
$$R_f C_f = 100 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ pF} = 10 \times 10^{-6}$$

$$R_1 C_1 = 50 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ pF} = 5 \times 10^{-6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_f C_f = 100 \text{ k}\Omega \times 1 \text{ pF} = 0.1 \times 10^{-6}$$

เพราะฉะนั้น $R_f C_1 > R_1 C_1$ or $R_f C_f$

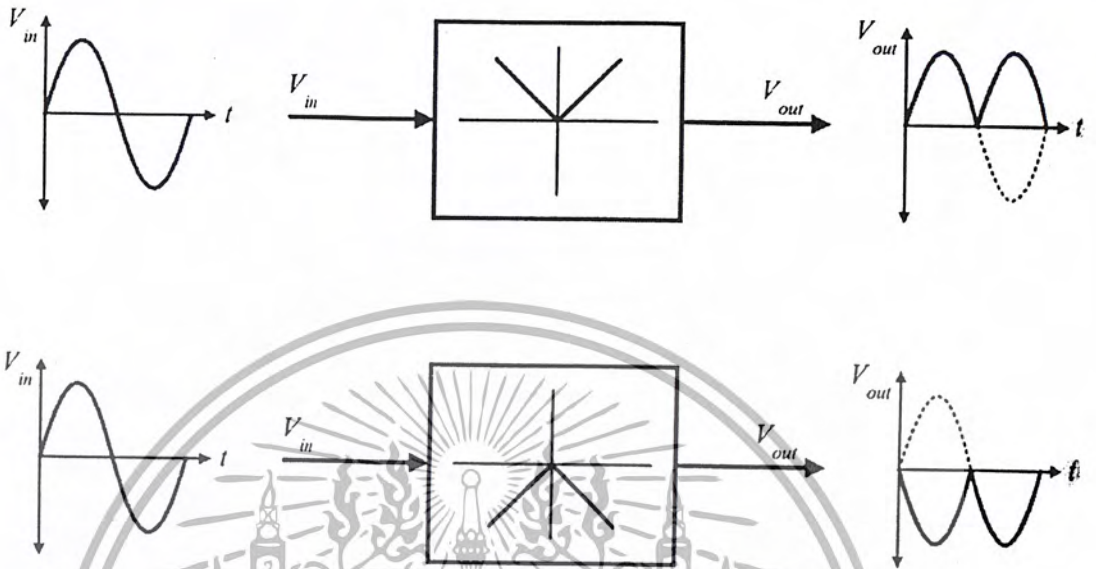


รูปที่ 2.3 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอตอร์ (Differentiator amplifier) แบบปรับปรุง

2.3 วงจรเรียงกระแสที่ยังตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-wave Rectifiers)

วงจรเรียงกระแสที่ยังตรงเต็มลูกคลื่นจะรับสัญญาณอินพุตไฟสลับแล้วส่งผ่านไปเป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่เป็นเฉพาะสัญญาณด้านบวกหรือด้านลบเพียงอย่างเดียวโดยที่เฟสของสัญญาณเอาต์พุตอาจกลับเฟสหรือไม่กลับเฟสก็ได้ดังหลักการทำงานของวงจรซึ่งแสดงได้

ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบวกและแบบลบ

การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบวก (*Positive full – wave rectifier*)

$$V_{out} = |V_{in}|$$

และการทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบลบ (*Negative full – wave rectifier*)

$$V_{out} = -|V_{in}|$$

ดังนั้นจากหลักการทำงานของวงจรข้างต้นบางครั้งอาจจะเรียกวจรแบบนี้อีกชื่อหนึ่งว่า
 “ วงจรหาค่าสัมบูรณ์เที่ยงตรง (*Precision absolute – value circuit*) ”

วงจรถ่ายค่าสัมบูรณ์เที่ยงตรงพื้นฐาน (Simple Precision Absolute-Vale Circuit)

วงจรถ่ายค่าสัมบูรณ์เที่ยงตรงดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยวงจรถ่ายเรียงกระแสเที่ยงตรงครึ่งลูกคลื่น A_1 และวงจรรวมสัญญาณ A_2 การทำงานของวงจรถ่ายได้ดังนี้ คือเมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าเป็นลบจะทำให้แรงดันเอาต์พุตของ A_1 มีค่าเป็นศูนย์ ($A_1 = 0$) แต่ถ้ามีค่าเป็นบวกแรงดันเอาต์พุตของ A_1 จะมีค่าเท่ากับ $A_1 = (R_2/R_1)$ และเนื่องจากการทำงานของวงจรรวมสัญญาณ A_2 จะได้ดังนั้นผลการทำงานของวงจรถ่ายจึงสรุปได้เป็น

$$V_{out} = -A_n V_{in} \text{ เมื่อ } V_{in} < 0 V$$

และ

$$V_{out} = A_p V_{in} \text{ เมื่อ } V_{in} > 0 V$$

โดยที่

$$A_p = \frac{R_5}{R_4}$$

และ

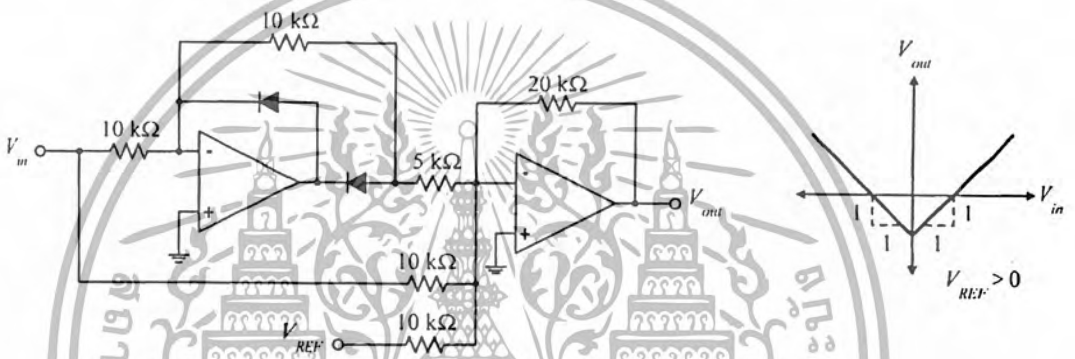
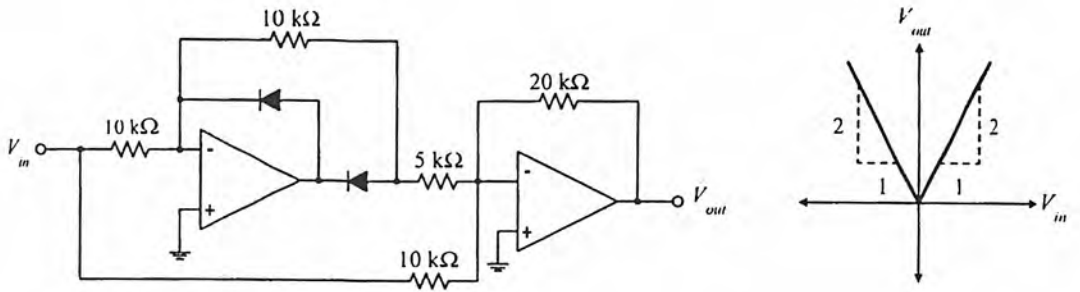
$$A_n = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - A_p$$

ถ้ากำหนดให้ $A_p = A_n = A$ แล้วแรงดันเอาต์พุตของวงจรถ่ายจะถูกระบายด้วยอัตราขยายสัญญาณที่เท่ากันหรือนั่นคือ $V_{out} = -AV_{in}$ เมื่อ $V_{in} < 0 V$ และ $V_{out} = AV_{in}$ เมื่อ $V_{in} > 0 V$ ซึ่งทำให้

$$V_{out} = A|V_{in}|$$

การหาค่าสัมบูรณ์เที่ยงตรงในรูปแบบต่าง ๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรหาค่าสัมบูรณ์เที่ยงตรง

2.4 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low-pass Filter)

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 2.6(ก) ประกอบด้วยโครงข่าย RC และวงจรออปแอมป์ซึ่งต่อเป็นวงจรมัฟเฟอร์อินที่นี้ตัวต้านทานป้อนกลับ R_f ต้องมีค่าเท่ากับ R ทั้งนี้เพื่อลดผลของออฟเซตไฟตรงของวงจรถ่วงคือ กรณีสัญญาณไฟตรงค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive reactance) ของตัวเก็บประจุ C จะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinite) ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าพิจารณาที่ขาอินพุทบวก (ขา 3) และขาอินพุทลบ (ขา 2) ของออปแอมป์มีค่าเท่ากัน ($R = R_f$) และเป็นผลให้แรงดันไฟตรงที่ขาอินพุททั้งสองมีค่าเท่ากัน ($V^+ = V^-$) หรือนั่นคือแรงดันอินพุทออฟเซตมีค่าประมาณศูนย์

เนื่องจากแรงดันผลต่างระหว่างขา 2 กับขา 3 มีค่าประมาณ $0 V$ และวงจรออปแอมป์ต่อเป็นวงจรมัฟเฟอร์ ดังนั้นแรงดันไฟสลับตกคร่อม C จึงมีค่าประมาณแรงดันเอาท์พุท V_{out} ของวงจรถ่วงแบ่งแรงดันหาค่าแรงดันตกคร่อม C จะได้เท่ากันโดยที่ค่าความถี่ของแรงดันอินพุท V_{in} ในหน่วยของเรเดียนต่อวินาที (Radian per second, rad/s) มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ และ j คือค่าจินตภาพมีค่าเท่ากับ $\sqrt{-1}$ จากสมการนำมาเขียนใหม่ในรูปของอัตราขยายแรงดันลูปปิด A_{cl} (Closes-loop voltage gain) ของวงจรถ่วงจะได้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

หากทำการพิจารณาอัตราขยายแรงดันรูปปิด A_{CL} จากสมการที่โดยแปรค่าความถี่จากความถี่ต่ำ ($\omega \Rightarrow 0$) จนถึงความถี่สูง ($\omega \Rightarrow \infty$)

$$|A_{CL}| = 1 \quad \text{หรือ} \quad 0 \text{ dB}$$

จะได้ว่า ณ. ความถี่ต่ำ ($\omega \Rightarrow 0$) ซึ่งพบว่าเมื่อความถี่แปรค่าสูงขึ้น ผลตอบสนองของวงจรจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ -20 dB ต่อความถี่ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปสิบเท่า (*decade*) หรือเรียกว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -20 dB/decade ณ. ที่ความถี่มีค่าเท่ากับความถี่คัตออฟ ($\omega = \omega_c$) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ $|A_{CL}|$ เป็นดังนี้คือ

$$|A_{CL}| \text{ dB} = -20 \log(\omega_c RC) = 0 \text{ dB}$$

โดยที่ ω_c คือ ค่าความถี่คัตออฟ มีหน่วยเป็น rad/s และ f_c คือค่าความถี่คัตออฟในหน่วยของเฮิรตซ์ (*Hertz, Hz*) R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม (*Ohm, \Omega*) และ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (*Farad, F*) ดังนั้นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจึงแสดงได้ดังรูปที่ 2.6(z) ซึ่งจะเห็นว่า ณ. ที่ความถี่ต่ำได้ $|A_{CL}|$ เท่ากับ 1 หรือ 0 dB และเมื่อความถี่มีค่าเท่ากับความถี่คัตออฟ ω_c ขนาดของ $|A_{CL}|$ จะมีค่าเท่ากับ 0.707 หรือ -3 dB หลังจากนั้นเมื่อความถี่แปรค่าสูงขึ้น ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น -20 dB/decade

สรุปขั้นตอนการออกแบบ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำดังรูปที่ 2.6(n) จะได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- 1) เลือกค่าความถี่คัตออฟ ω_c หรือ f_c ของวงจร
- 2) ทำการเลือกค่า C ที่ใช้ในวงจรซึ่งโดยทั่วไปควรมีค่าอยู่ในช่วง $0.001 \mu\text{F}$ ถึง $0.1 \mu\text{F}$
- 3) คำนวณหาค่า R

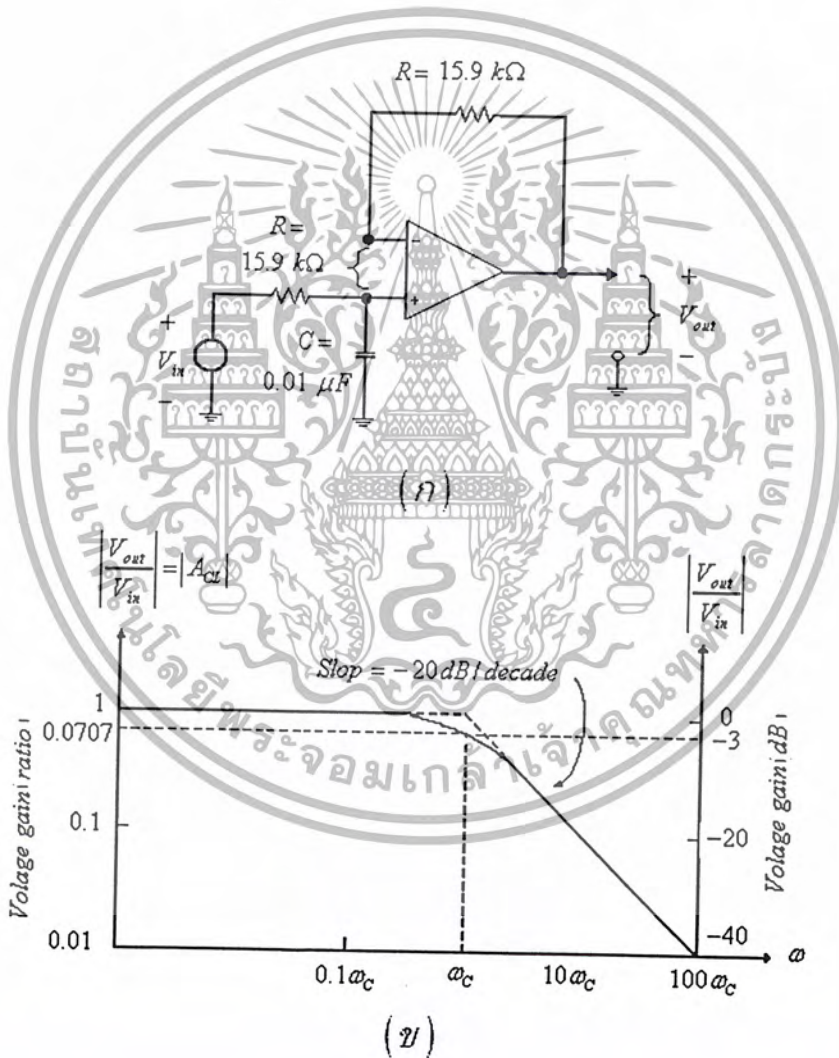
การออกแบบวงจร

ออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำให้มีความถี่คัตออฟของวงจรเท่ากับ 1 kHz โดยเลือกใช้

$$C = 0.01 \mu F$$

Solution

$$R = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{(2 \times \pi \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6})} = 15.9 \text{ k}\Omega$$



รูปที่ 2.6 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและผลตอบสนองทางความถี่

(ก) วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ -20 dB/decade

(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร (Frequency Response)

ω	$ A_{CL} $	มุมเฟส (องศา)
$0.1\omega_c$	1.0	-6
$0.25\omega_c$	0.97	-14
$0.5\omega_c$	0.89	-27
ω_c	0.707	-45
$2\omega_c$	0.445	-63
$4\omega_c$	0.25	-76
$10\omega_c$	0.1	-84

ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสมีการต่อวงจรดังรูปที่ 2.7 วงจรนี้จะให้สัญญาณต่างเฟสไป 180° และขั้วอินพุทกลับเฟสที่โหนด A จะมีแรงดันเท่ากับศูนย์ ($V_i = V_{out} / A_{OL} = 0$) ความต้านทาน R_s และ R_f ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันระหว่าง V_{out} กับ V_{in} และโหนด A จะมีความต่างศักย์ประมาณศูนย์

คุณสมบัติของออปแอมป์จะได้ว่า $Z_{in} \Rightarrow \infty$ และ $i_b = 0$ ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_f ก็คือตัวเดียวกัน

$$i_{R_s} \cong i_{R_f}$$

โดยที่ $i_{R_s} = \frac{V_{in} - V_s}{R_s}$ และ $i_{R_f} = \frac{V_s - V_{out}}{R_f}$ เขียนสมการได้ใหม่ คือ

$$\frac{V_{in} - V_s}{R_s} = \frac{V_s - V_{out}}{R_f}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $V_s = 0$ เพราะว่า $A_{OL} \Rightarrow \infty$ ทำให้

$$\frac{V_{in}}{R_s} \cong -\frac{V_{out}}{R_f}$$

เพราะฉะนั้น

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_s}$$

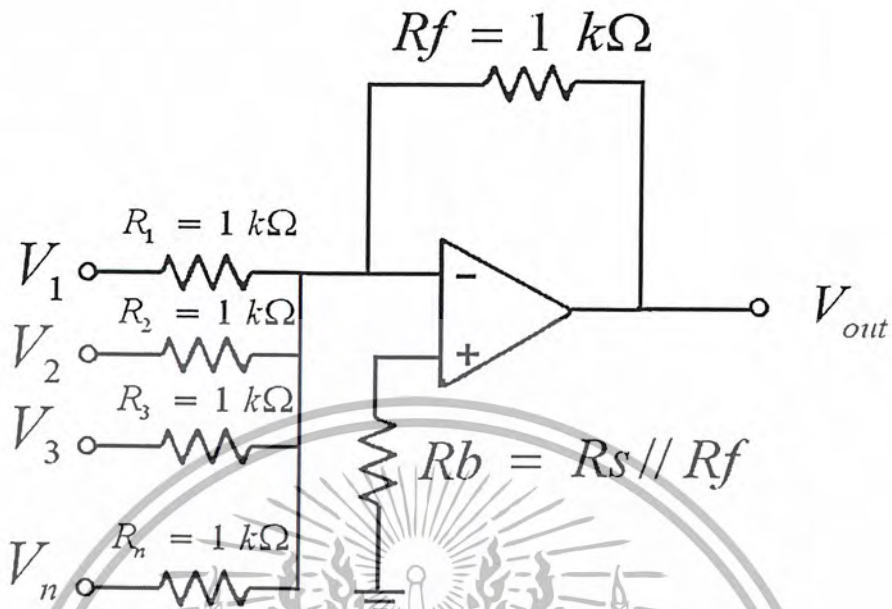


รูปที่ 2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting amplifier)

2.6 วงจรรวมสัญญาณ (Summing amplifier)

จากวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสหากทำการปรับปรุงโดยต่อขั้วอินพุตเพิ่มเข้าไปที่ โหนด A ทางขั้วอินพุตกลับเฟสแล้วจะเรียกวงจรในลักษณะนี้ว่าวงจรรวมสัญญาณหรือก็คือ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีหลายๆอินพุตนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรรวมสัญญาณ (Somming amplifier)

โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมนี้จะเกิดจากอินพุตแต่ละตัวคูณด้วยอัตราขยายของอินพุตนั้นๆรวมกันเป็นสัญญาณที่จุดเอาต์พุตความสัมพันธ์ของ V_{out} กับ $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ หาได้จากรูปพิจารณาที่โหนด A โดยอาศัยกฎของกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวดังนี้

$$i_{R1} + i_{R2} + i_{R3} + \dots + i_{Rn} = i_{Rf}$$

หรือ
$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} + \frac{V_2 - V_A}{R_2} + \frac{V_3 - V_A}{R_3} + \dots + \frac{V_n - V_A}{R_n} = \frac{V_A - V_{out}}{R_f}$$

แต่เนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า $V_i = 0V$ ดังนั้นแรงดันที่โหนด A ประมาณ $V_A = 0V$ จากสมการจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับผลรวมของสัญญาณอินพุตคูณกับอัตราขยายของอินพุตนั้นๆ โดยมีมุมต่างเฟสของสัญญาณเท่ากับ 180° ตามคุณสมบัติของวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสนั่นเองแต่ถ้าเลือก $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R_s$ แล้วสมการสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_s}(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

กรณีนี้จะสามารถควบคุมอัตราขยายสัญญาณของวงจรได้ด้วยค่า R_f กับ R_s และถ้าให้ค่าต้านทานทุกตัวในวงจรมีค่าเท่ากันหมดสมการจะกลายเป็น

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

2.7 ไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ PIC16F87x

อีกหนึ่งไมโครสำคัญที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ต้องมี คือ ไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลและสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F87x มีความละเอียด 10 บิต 5 ช่องอินพุตสำหรับรุ่น 28 ขา และ 8 ช่องอินพุตสำหรับรุ่น 40 ขา โดยขาพอร์ตที่ใช้งานร่วมด้วยคือขาพอร์ต RA0-RA3-RA5 และ RE0-RE3 (เฉพาะในรุ่น 40 ขา) ในการทำงานเพื่อรองรับอินพุตจำนวนมากจะใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์ ซึ่งควบคุมด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์

สำหรับการทำงานของไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลใน PIC16F87x เป็นแบบซิงโครนัสซีฟแอฟฟริกซิมแซมปลิงรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง มีทั้งสิ้น 4 ตัว โดยแบ่งเป็นรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงาน 2 ตัวคือ ADCON0 ซึ่งมีแอดเดรสอยู่ที่ 0X1F และ ADCON1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 0X9F ส่วนอีก 2 ตัวคือ รีจิสเตอร์ ADRESH และ ADRESL ซึ่งใช้ในการเก็บผลลัพธ์ของการแปลงสัญญาณ โดย ADRESL มีแอดเดรสอยู่ที่ 0X9F ในแบงก์ 1 รีจิสเตอร์ทั้งสองมีขนาดตัวละ 8 บิต ต้องทำงานร่วมกันเพื่อรองรับข้อมูลดิจิตอล 10 บิต ที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาลอก

รีจิสเตอร์ ADCCON0 มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 0X1F ในแบงก์ 0 เป็นรีจิสเตอร์หลักที่ใช้ควบคุมการทำงานของไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล รายละเอียดการใช้งานมีดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
ADCS1	ADCS2	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	-	ADON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADCS1, ADCS0 (A/D Conversion Clock Select bits)

เลือกความถี่ของสัญญาณ

นาฬิกาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

"00" ความถี่สัญญาณนาฬิกาหาร 2 (FOSC/2)

"01" ความถี่สัญญาณนาฬิกาหาร 8 (FOSC/8)

"10" ความถี่สัญญาณนาฬิกาหาร 32 (FOSC/32)

"11" ให้ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากวงจร RC (FRC)

นอกจากนั้นยังใช้ร่วมกับบิต ADCS2 (บิต 6 ในรีจิสเตอร์ ADCON 1) เฉพาะในอนุกรม PIC16F87xA เพื่อเลือกความถี่สัญญาณนาฬิกาได้มากขึ้น

CHS2, CHS1, CHS0 (Analog Channel bits บิต 5, 4 และ 3) บิตเลือกช่องสัญญาณอนาลอก

"000" ช่อง 0 (AN0/RA0)

"001" ช่อง 1 (AN1/RA1)

"010" ช่อง 2 (AN2/RA2)

"011" ช่อง 3 (AN3/RA3)

"100" ช่อง 4 (AN4/RA5)

"101" ช่อง 5 (AN5/RE0) ไม่มีในรุ่น 28 ขา

"110" ช่อง 6 (AN6/RE1) ไม่มีในรุ่น 28 ขา

"111" ช่อง 7 (AN7/RE2) ไม่มีในรุ่น 28 ขา

GO/DON (A/D Conversion Status bit บิต2) บิตแสดงสถานการณ์แปลงสัญญาณ

ทำงานร่วมกับบิต ADON

กรณีบิต ADON เป็น "1"

"0" การแปลงสัญญาณเสร็จสมบูรณ์ หรือยังไม่เริ่มการแปลงสัญญาณ

"1" ยังอยู่ในระหว่างการแปลงสัญญาณ

บิตนี้สามารถเคลียร์ได้ด้วยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ 2 ลักษณะคือ เมื่อการแปลงเสร็จสมบูรณ์ จะเคลียร์เองอัตโนมัติ และเคลียร์เนื่องจากเกิดเพาเวอร์อนรีเซต

บิต 1 ไม่ใช้งาน กำหนดเป็น "0"

ADON (A/D bit บิต 0) บิตเปิดการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

"0" ปิดการทำงาน

"1" เปิดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ ADCON 1

เป็นรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นดิจิทัลที่ต้องทำงานร่วมกับ ADCON 0 มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 0x9F ในแบงก์ 1 โดยรีจิสเตอร์ตัวนี้ใช้กำหนดการทำงานของขาพอร์ตที่เกี่ยวข้องกับโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และใช้เลือกรูปแบบของข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงสัญญาณมีรายละเอียดของการทำงานดังนี้

ADFM(A/D Result Format Select bit บิต 7) บิตเลือกรูปแบบผลลัพธ์ของการแปลงสัญญาณ

"0" เลือกผลลัพธ์แบบชิดซ้าย (left justified)

"1" เลือกผลลัพธ์แบบชิดซ้าย (left justified)

ADCS2 (A/D Conversion Clock Select bits – บิต 6) บิตเลือกความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลบิตนี้มีเฉพาะในอนุกรม PIC16F87xA ต้องใช้ร่วมกับบิต ADCS1 และ ADCS0 ในรีจิสเตอร์ ADCON0

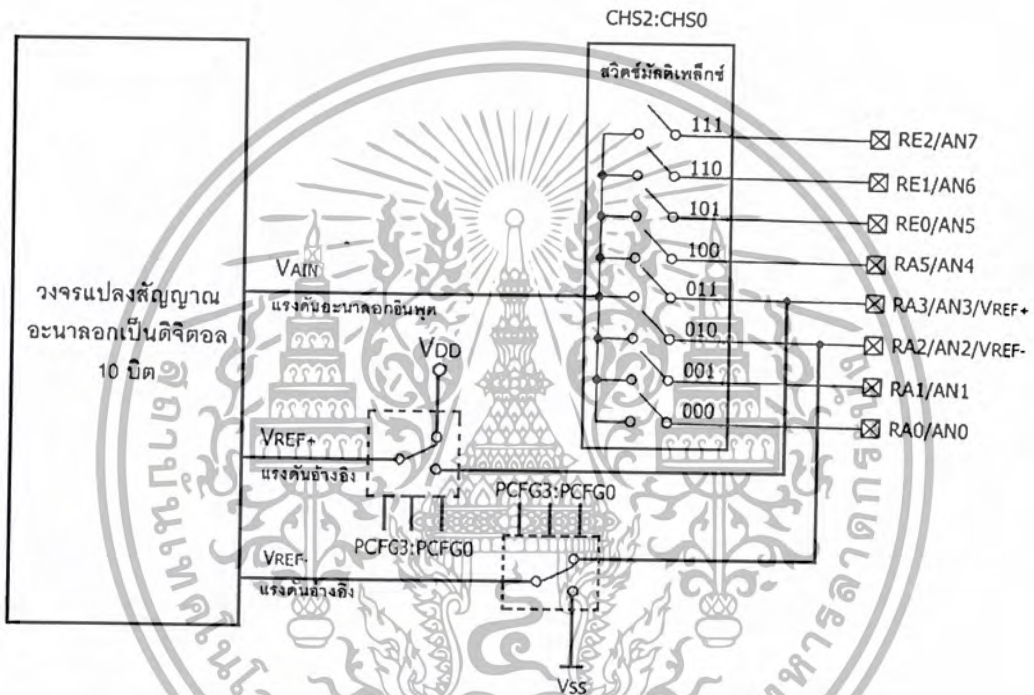
2.7.1 การทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

โดยอะแกรกรรมการทำงานของขาพอร์ตที่ใช้เป็นอินพุตอนาล็อกจะต้องได้รับการกำหนดมาจากบิต PCFG3, PCFG0 ในรีจิสเตอร์ ADCON1 ที่จะให้ขาพอร์ตใดเป็นพอร์ตรับสัญญาณอนาล็อกพอร์ตได้รับแรงดันอ้างอิงหรือพอร์ตใดเป็นพอร์ตดิจิทัล จากนั้นสัญญาณอนาล็อกที่ต้องการแปลงจะถูกส่งผ่านวงจรเลือกของสัญญาณซึ่งควบคุมด้วยบิต CHS2, CHS0 ในรีจิสเตอร์ ADCON0 ภาคอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายใน PIC16F87x แสดงด้วยวงจรสมมูลประกอบด้วยวงจรสุ่มและเก็บสัญญาณ (Sample and hold) ที่มีตัวเก็บประจุ 120 พิโกฟารัดทำหน้าที่เก็บแรงดันทางอินพุตไว้ให้กับวงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อกและวงจรเปรียบเทียบภายในนอกจากยังมีตัวต้านทานอีก 3 ตัว ที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ นั่นคือ ความต้านทานของแหล่งจ่ายสัญญาณภายนอกและความต้านทานของสวิทช์สุ่มสัญญาณ หรือ สมการถ้าตัวเก็บประจุมีค่าคงที่แล้ว ดังนั้นค่าของเวลาจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวต้านทานทั้งสามตัวโดยค่าสูงสุดนั้นมีค่าประมาณ (ข้อมูลจากผู้ผลิต) ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนตามแรงดันที่ใช้ ซึ่งสามารถหาค่าโดยประมาณได้จากกราฟ ส่วนค่าอื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งไม่ควรเกินค่าเวลานี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เนื่องจากเป็นเวลาที่ตัวเก็บประจุจะต้องใช้ในการประจุแรงดัน

ให้เต็มซึ่งมีผลต่อผลลัพธ์ของการแปลงสัญญาณ กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ถ้ากำหนดเวลาของ T_c สั้นเกินไปจะทำให้ค่าผลลัพธ์ดิจิตอลที่ได้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอนาล็อกทางอินพุต ซึ่งจะเห็นความผิดพลาดนี้ได้อย่างชัดเจนในกรณีที่แรงดันอินพุตมีค่ามาก
2. ถ้ากำหนดเวลาของ T_c มากเกินไปทำให้เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณยาวนานขึ้น ความเร็วในการทำงานโดยรวมของระบบจึงลดลง
 ดังนั้นจะต้องเลือกค่าของ T_c นี้ให้เหมาะสมและถูกต้องที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เสมอ



รูปที่ 2.9 ไตอะแกรมการทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลใน PIC16F87x

ค่าเวลาแอกควิซิชัน (Acquisition time : T_{ACQ})

เป็นค่าเวลารวมที่ใช้จัดการสัญญาณอนาล็อกก่อนเข้าสู่การแปลงแปลงสัญญาณคำนวณได้จาก

$$T_{ACQ} = T_{AMP} + T_c + T_{COFF}$$

โดยที่ T_{AMP} คือ ค่าเวลาของการขยายและปรับแต่งสัญญาณ (Amplifier settling time) มีหน่วยเป็นวินาที ปกติมีค่าเท่ากับ 2 ไมโครวินาที

T_c คือ เวลาในการประจุแรงดันของตัวเก็บประจุ C_{HOLD} มีหน่วยเป็นวินาที

T_{COFF} คือ ค่าเวลาสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคำนวณได้จาก (ค่าอุณหภูมิที่ใช้งาน -25 องศาเซลเซียส) x ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(มีหน่วยเป็นวินาที / องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุณหภูมิใช้งานปกติจะเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าเวลา T_{COFF} มีค่าเท่ากับศูนย์หรือน้อยมาก ๆ จนสามารถไม่นำมาพิจารณาได้ ดังนั้นเมื่อเขียนโปรแกรมให้ไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลทำงาน ต้องคำนึงถึงค่าเวลานี้ด้วย นั่นคือต้องหนดวงเวลาให้นานพอจนกระทั่งวงจรสุ่มและรักษาค่าสัญญาณเตรียมแรงดันสำหรับการแปลงสัญญาณมีค่าถูกต้องมากที่สุด

2.7.2 การเลือกความถี่สัญญาณนาฬิกาของการแปลงสัญญาณ

การเลือกความถี่สัญญาณนาฬิกาของการแปลงสัญญาณนี้ มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีผลต่อค่าเวลาในการแปลงสัญญาณโดยไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ PIC16F87x ต้องใช้เวลาแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นข้อมูลดิจิตอล 10 บิตเท่ากับ $12 T_{AD}$ โดยค่าเวลา T_{AD} คือค่าเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณต่อบิต และค่า T_{AD} ที่น้อยที่สุดที่ยังคงให้ผลการแปลงสัญญาณที่ถูกต้องคือ 1.6 ไมโครวินาที ดังนั้นการเลือกความถี่สัญญาณนาฬิกาต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้ด้วยการเลือกความถี่ทำได้โดยกำหนดข้อมูลในบิต ADCS1 และ ADCS0 ในอนุกรม PIC16F87x มาตรฐานและสามารถใช้บิต ADCS2 เพิ่มในกรณีไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรม PIC16F87xA แสดงถึงความสัมพันธ์ของการเลือกคาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลกับความถี่สูงสุดของสัญญาณนาฬิกาหลักเพื่อให้ได้ค่า T_{AD} เท่ากับ 1.6 ไมโครวินาที

2.7.3 กระบวนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

เมื่อสั่งให้ไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลทำงาน บิต GO/DONE ที่ใช้แสดงสถานะการทำงานจะเซต ถ้าหากมีการเคลียร์บิตนี้เกิดขึ้นในขณะที่การแปลงสัญญาณยังดำเนินอยู่การแปลงสัญญาณจะถูกหยุดลงทันที แต่ข้อมูลของการแปลงสัญญาณที่ไม่สมบูรณ์จะไม่ได้รับการนำไปใช้งาน นั่นคือถ้าแปลงไม่สมบูรณ์ค่าในรีจิสเตอร์ ADRESH และ ADRESL จะยังเป็นค่าเดิมก่อนหน้านี้แสดงกระบวนการแปลงสัญญาณที่สัมพันธ์กับค่าเวลาและบิตแสดงสถานะ

คาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของโมดูล ADC	ADCS2 : ADCS1 : ADCS0	ความถี่สูงสุดของสัญญาณ นาฬิกาหลัก (MHz)
2T _{osc}	000	1.25
4T _{osc}	100	2.50
8T _{osc}	001	5
16T _{osc}	101	10
32T _{osc}	010	20
64T _{osc}	110	20
RC ^(1,2)	X11	(2)

เฉพาะในอนุกรม PIC16F87xA เท่านั้น

(1) เมื่อใช้วงจร RC ค่า TAD ปกติจะเท่ากับ 4 ไมโครวินาที แต่สามารถมีค่าได้ระหว่าง 2-6 ไมโครวินาที

(2) ถ้าหากความถี่สัญญาณนาฬิกาหลักมากกว่า 1 MHz ควรใช้สัญญาณนาฬิกาจากวงจร RC ในกรณีทำงานในโหมดสลีป

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของคาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลกับความถี่สูงสุดของสัญญาณนาฬิกาหลักของ PIC16F87xA

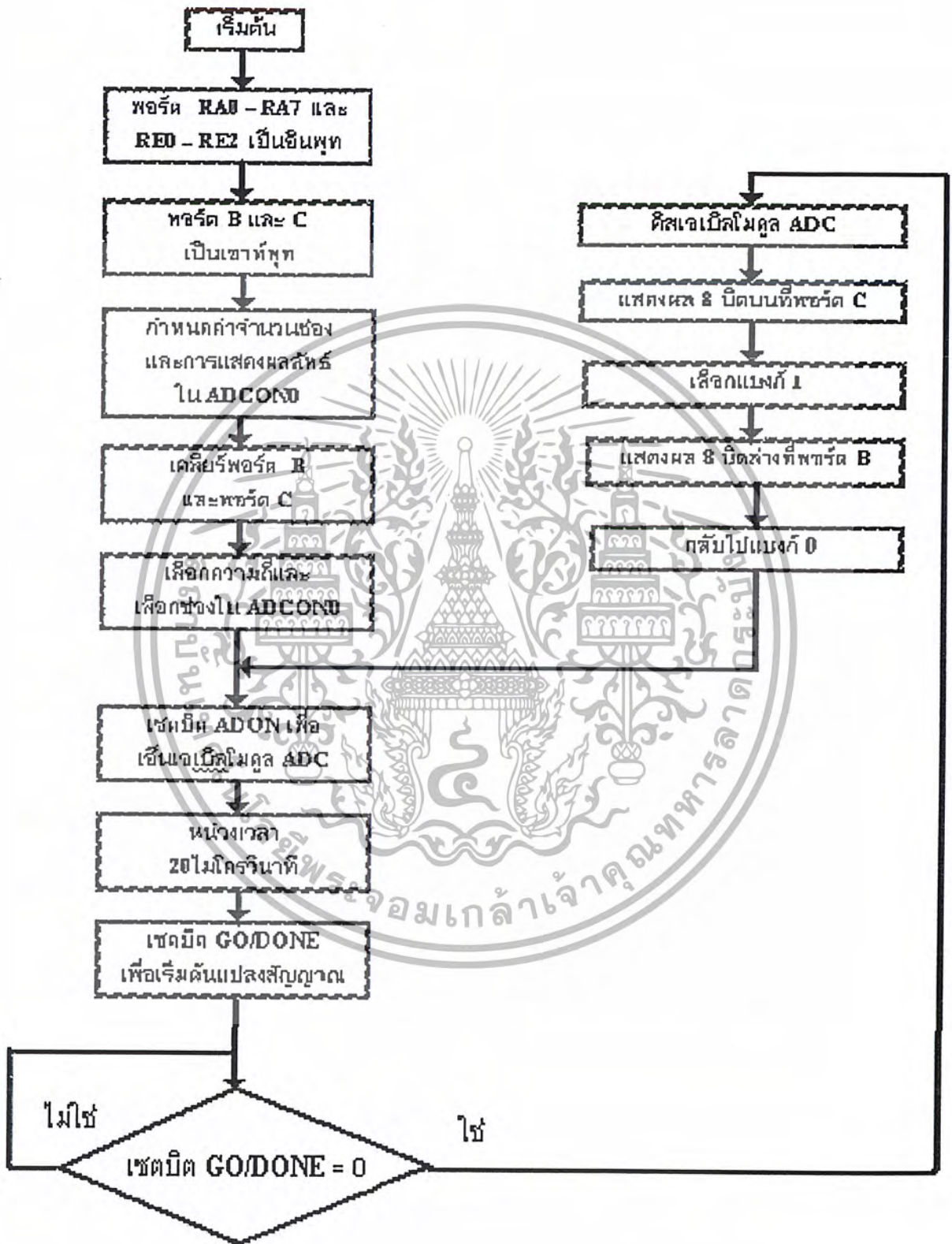
2.7.4 แรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลใน PIC16F87xA

ในการใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจ คือ ค่าของแรงดันอ้างอิง ซึ่งต้องเลือกค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF+} และ V_{REF-} ให้ถูกต้องและเหมาะสมด้วย โดยเลือกได้ที่บิต PCFG3 : PCFG0 ในรีจิสเตอร์ ADCON1 ซึ่งสามารถเลือกใช้แรงดันอ้างอิงได้จาก 2 แหล่งกำเนิด คือ จากภายในจะทำให้อินพุต V_{REF+} ถูกต่อเข้ากับขาไฟเลี้ยง V_{DD} และอินพุต V_{REF-} ถูกต่อเข้ากับขากราวด์หรือ V_{SS} ซึ่งก็คือแรงดันไฟเลี้ยงนั่นเองแต่ถ้าใช้จากภายนอก อินพุต V_{REF+} จะต่อเข้ากับขาพอร์ต RA3 อินพุต V_{REF-} ต่อเข้ากับขาพอร์ต RA2 ดังนั้นเมื่อใช้แรงดันอ้างอิงภายนอกควรกำหนดให้ขาพอร์ตทั้งสอง (RA3 และ RA2) เป็นอินพุตเสมอ ประโยชน์ของการใช้แรงดันอ้างอิง V_{REF+} และ V_{REF-} คือ เพิ่มความละเอียดในการวัดแรงดันต่ำ ๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.7.5 การใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

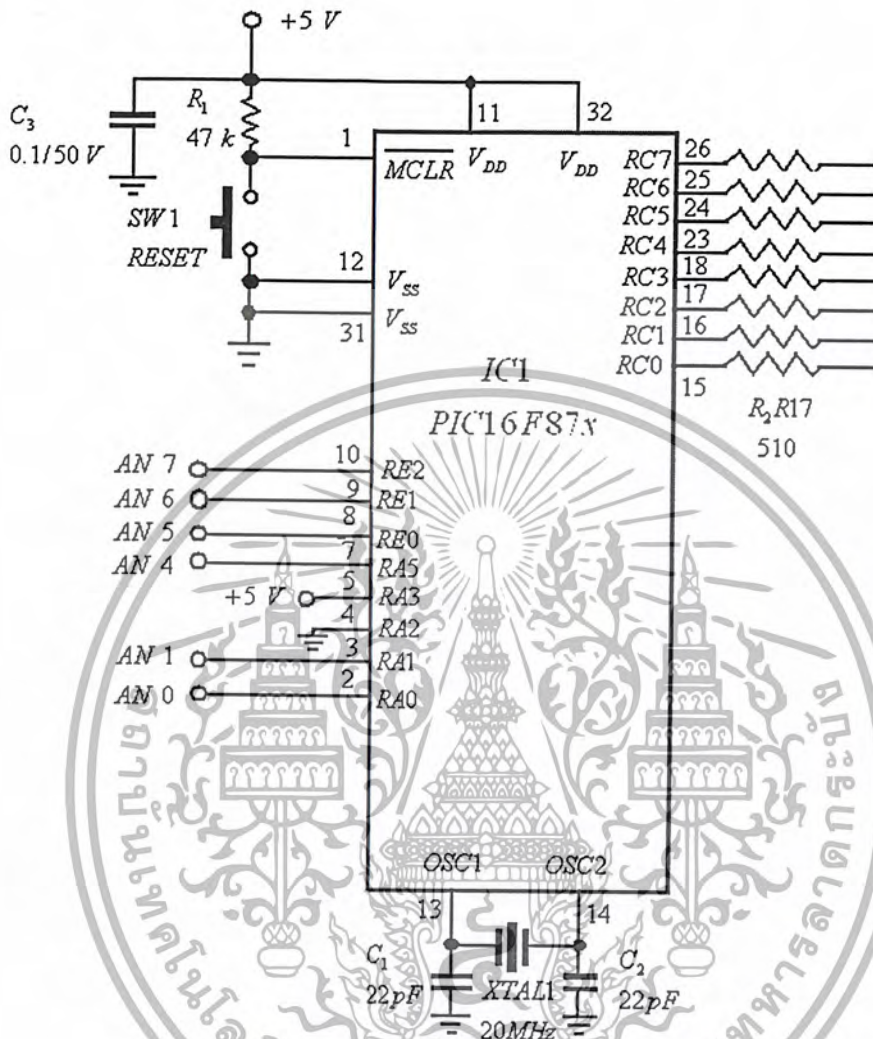
ขั้นตอนการใช้งานโดยสรุปมีดังนี้

- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นต่าง ๆ
 - 1.1 กำหนดให้ขาพอร์ตที่ใช้งานเป็นอินพุตโดยเซตบิตในรีจิสเตอร์ TRISA หรือ TRISE
 - 1.2 เลือกจำนวนช่องและแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงที่บิต PCFG3 : PCFG0 ในรีจิสเตอร์ ADCON1
 - 1.3 เลือกรูปแบบผลลัพธ์จากบิต ADFM ในรีจิสเตอร์ ADCON1
 - 1.4 เลือกช่องสัญญาณผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1 และ ADCON0
 - 1.5 เลือกสัญญาณนาฬิกาจากข้อมูลที่บิต ADCS1 : ADCS0 ในรีจิสเตอร์ ADCON0
 - 1.6 เ็นเอเบิลโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลโดยเซตบิต ADON ในรีจิสเตอร์ ADCON0
- 2) ถ้ามีการใช้งานอินเทอร์รัพท์ให้กำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้(ถ้าไม่ใช้การอินเทอร์รัพท์ให้ข้ามไปข้อ 3)
 - 2.1 เคลียร์บิต ADIF ในรีจิสเตอร์ PIR1
 - 2.2 เซตบิต ADIE ในรีจิสเตอร์ PIE1
 - 2.3 เ็นเอเบิลการอินเทอร์รัพท์โดยเซตบิต GIE ในรีจิสเตอร์ INTCON
- 3) หนดเวลาเพื่อให้พ้นช่วงเวลาแอกควิซิชัน (Acquisition time)
- 4) เริ่มต้นการแปลงสัญญาณด้วยการเซตบิต GO/DONE ในรีจิสเตอร์ ADCON0 (ห้ามเซตบิตนี้ในคำสั่งเดียวกับที่เซตบิต ADON เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการแปลงสัญญาณได้)
- 5) หนดเวลา เพื่อรอให้จบกระบวนการแปลงสัญญาณ ซึ่งทำได้โดย
 - 5.1 วนรอค่าที่บิต GO/DONE ถ้าเป็น "0" หมายถึง เสร็จสิ้นการแปลงสัญญาณ
 - 5.2 รอให้เกิดอินเทอร์รัพท์ขึ้น
- 6) อ่านผลลัพธ์จากรีจิสเตอร์ ADRESH : ADRESL
- 7) ถ้าต้องการให้เกิดการแปลงสัญญาณอย่างต่อเนื่องให้หนดเวลาอย่างน้อย $2T_{AD}$ แล้วกลับไปทำในข้อ 3) (ถ้ามีการใช้งานอินเทอร์รัพท์ให้กลับไปทำข้อ 2.1)



รูปที่ 2.10 ฟลิวชาร์ตของโปรแกรมการใช้งานไมโครแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานใน PIC16F87X เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลใน PIC16F87x

2.8 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD Module)

รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD

โมดูล LCD จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ 3 ส่วน ดังนี้

ตัวแสดงผล (Display) ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมองข้อมูลที่แสดงบนจอ LCD

ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุม

โดยเฉพาะชิปที่นิยมใช้ คือ เบอร์ HD44780 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบ

อักษรส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟิก

ไม่ทราบแน่ชัดว่า... ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

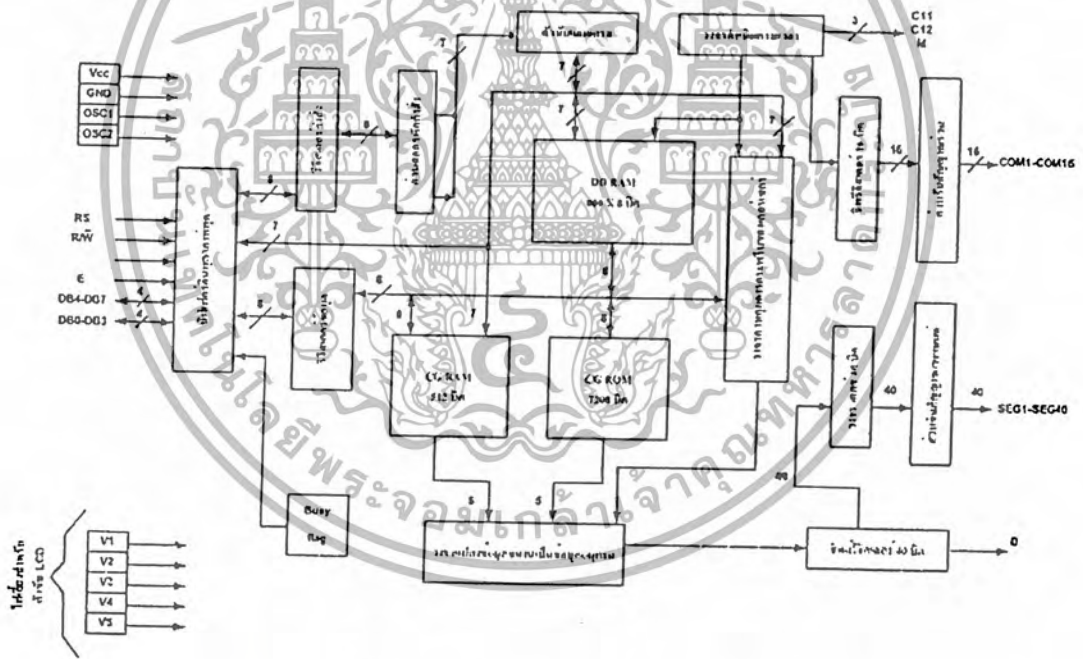
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวขับ (Driver)เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด
ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับนี้ได้แก่ เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

2.8.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD อักษร

ในการใช้งานโมดูล LCD จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและคำสั่งที่ใช้ใน
การควบคุมให้ดีเสียก่อนในหนังสือนี้ขอยกตัวอย่างโมดูลแบบอักษรเพราะสามารถเข้าใจได้ง่ายให้
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมภายในของชิปควบคุม LCD เบอร์ HD44780 ซึ่งใช้ในโมดูล
LCD แบบอักษรประกอบด้วย

บัพเฟอร์อินพุตเอาต์พุต เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อที่จะ
ถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD

รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register : IR) เป็นรีจิสเตอร์ที่รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์
ภายนอกเพื่อนำไปควบคุมการแสดงผล

รีจิสเตอร์ข้อมูล (Data Register : DR) เป็นรีจิสเตอร์ที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอก
เพื่อถ่ายทอดต่อไปยังหน่วยความจำที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษร

เพิ่มเติมในแรมเก็บตัวอักษร

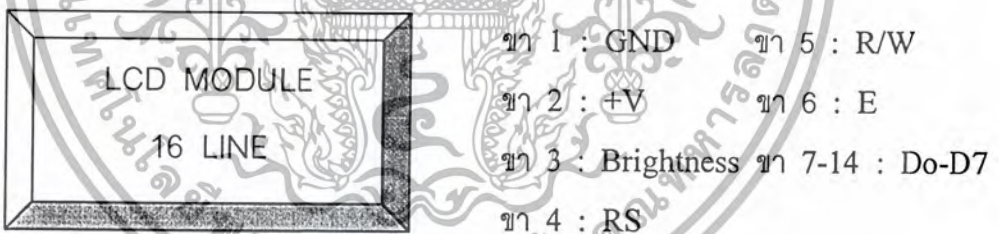
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นับว่าผิดกฎหมายหากไม่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรมเก็บข้อมูลแสดงผล (Display Data Ram : DDRAM) เป็นหน่วยความจำแรมทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR ตัวควบคุมจํานำข้อมูลใน DDRAM นี้ไปเปิดตาราง (Look up-table) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรวมและแรมเก็บตัวอักษร เพื่อนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล

แรมเก็บตัวอักษร (Charater Generator ROM : CGROM) เป็นหน่วยความจำรวมที่ใช้เก็บข้อมูลตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7,200 บิต โดยจะถูกอ่านด้วยค่าของข้อมูลใน DDRAM

แรมเก็บตัวอักษร (Charater generator ROM : CGROM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นมาใหม่ ในกรณีที่ตัวอักษรใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้นทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน CGROM แล้วตัวควบคุมจะมาอ่านค่าจาก CGROM เอง

แฟล็ก BUSY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่าตัวควบคุมพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้นก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมต้องตรวจสอบสถานะของแฟล็ก BUSY นี้เสียก่อน



รูปที่ 2.13 รูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร

RS	R/W	E	การทำงาน
0	0	0	เขียนคำสั่ง
0	1	1	อ่านสถานะของโมดูล LCD
1	0	0	เขียนข้อมูล
1	1	1	อ่านข้อมูล

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์การทำงานของขา RS,R/W และ E ของโมดูล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้าแบบอักษร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด (LCD 16 × 1)

สำหรับโมดูล LCD ที่ยกมาใช้ในการเรียนรู้ในการทดลอง เป็นขนาด 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด เนื่องจากราคาถูก ง่าย และเป็นโมดูล LCD ที่มีโครงสร้างเป็นมาตรฐาน มีผู้ผลิตหลายราย และมีการระบุเบอร์แตกต่างกันออกไปตามผู้ผลิต อาทิ LM20L ของฮิตาชิ, DMC-16117A ของคอปเทริก (Optex) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือเบอร์ HD44750 ของฮิตาชิโมดูล LCD ขนาด 16 × 1 มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา สำหรับรายละเอียดการทำงานของแต่ละขามีดังต่อไปนี้

Vee (ขา 1) : ต่อก라운드

Vdd (ขา 2) : ต่อไฟเลี้ยง + โวลต์

Vo (ขา 3) : เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

RS (ขา 4) : เป็นขาอินพุตใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น "0" ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขาเป็น "1" ข้อมูลที่มาเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

R/W (ขา 5) : เป็นขาที่ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับโมดูล LCD ถ้าเป็น "0" เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าขาเป็น "1" จะเป็นการอ่านข้อมูล

E (ขา 6) : เป็นขาสำหรับรับสัญญาณพัลส์เอ็นนาเบิลโมดูล LCD ให้ทำงาน

DO-D7 (ขา 7 - 14) : เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก ขนาด 8 บิต หนึ่งขา RS, R/W และ E จะใช้งานร่วมกันโดยมีความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 2.3

2.8.3 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม เน้นอนว่าต้องกำหนดให้ขา RS และ R/W เป็น "0" แล้วเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งควบคุมโมดูล LCD ของชิปควบคุม HD44780 ที่สำคัญมี 10 คำสั่งดังนี้

คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (Clear display)

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ Space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซ์คิวิคส์คำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผลแล้วเซตบิต I/D (ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง) ให้เป็น "1"

คำสั่ง (Return home)

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

คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล (Entry mode Set)

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 1	บิต 2	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

บิต I/D เป็นบิตที่ใช้กำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะลดลงดังนั้น ข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ได้แก่ 04H-07H (4 ข้อมูลคำสั่ง) และที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึง กำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่เคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือและแอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้น

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 ใช้ควบคุมการปิดเปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น "1" จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น "0" เป็นการปิดแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนหน้าจอแสดงผล ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น "1" ถ้ากำหนดให้เป็น "0" จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น "1" เคอร์เซอร์จะกระพริบดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H-0FH (8 รูปแบบคำสั่ง) ที่ใช้บ่อยคือ OCH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์และ 0FH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผลแสดงเคอร์เซอร์และสั่งให้เคอร์เซอร์กระพริบ

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	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผล ขึ้นอยู่กับการกำหนด S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

S/R	R/S	ลักษณะการเลื่อน	ข้อมูลคำสั่ง
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H - 17H
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H - 1BH
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา	1C - 1FH

คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน 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 และต้องการให้แสดงมากกว่า 2 บรรทัดก็กำหนดบิต N นี้ให้เป็น "1" จุดที่น่าสังเกตคือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด แม้จะมีบรรทัดแสดงผลเพียง 1 บรรทัด แต่จะต้องกำหนด N ให้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรในการแสดงผล

คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น "1" และข้อมูลอีก 6 บิตที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำงาน กำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ ก่อนที่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่าง OOH-3FH

คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น "1" และข้อมูลอีก 7 บิตที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 8CH-OFFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสยังขึ้นอยู่กับข้อกำหนดสถานะที่ บิต N เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วงคือ 8CH-OFFH และ OCOH-OC7H

คำสั่งอ่านแฟล็ก BUSY และแอดเดรส

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
BF	A	A	A	A	A	A	A

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านแฟล็ก BUSY (BF) โดยแฟล็กนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น "0" แสดงว่าตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง เมื่อต้องการอ่านแฟล็กต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น "1" ด้วย แต่สัญญาณที่ RS ยังต้องเป็น "0" อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง นอกจากนี้ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0 ถึงบิต 6 เป็นค่าข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

8.2.4 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

ในการอ่านข้อมูลเพื่อควบคุมให้โมดูล LCD แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (Intruction) แล้วกำหนดโหมดการทำงานให้แก่ LCD ก่อน จากนั้นจึงค่อยส่งข้อมูล (Data) ที่ต้องการแสดงผล เนื่องจากบัสข้อมูลของโมดูล LCD มี 8 เส้น คือ DO-D7 และใช้เป็นทางผ่านของคำสั่งและข้อมูล ดังนั้นการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องอาศัยการกำหนดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอจิกที่ขา RS ได้ลอจิก "0" หมายความว่า ข้อมูลที่ป้อนได้แก่โมดูล LCD ขณะนั้นเป็นคำสั่งในทางตรงกันข้าม หาก RS ได้รับลอจิก "1" ข้อมูลที่ป้อนให้ขณะนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ในการแสดงผลเมื่อต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลใน GGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอดเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น "1" เพื่อแจ้งให้ตัวควบคุมภายในโมดูล LCD ทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติไม่ใช่คำสั่งในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลที่ต้องการกำหนดขา R/W เป็น "1" ข้อมูลขนาด 8 บิต (หรือ 4 บิต) ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลที่อ่านออกมาได้จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสของ CGRAM หรือ DDRAMตามที่ต้องการในกรณีที่ต้องการเขียนข้อมูลต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น "1" เมื่อกำหนดแอดเดรสและป้อนลอจิก "1" ให้ขา RS แล้วต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น "0" ข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ DR จากนั้นจึงถ่ายทอกลงใน DDRAM ต่อไป

8.2.5 จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล

การติดต่อกับโมดูล LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD โมดูล แปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เรียบร้อยแล้วจากนั้นจึงรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไปดังนั้น ในการใช้โมดูล LCD ผู้เขียนโปรแกรมต้องรอประมาณ 10 มิลลิวินาที เพื่อให้โมดูล LCD ทำการเตรียมความพร้อมหรือยล (Initial) หลังจากนั้นก็กำหนดลอจิกให้แก่ขา RS ของโมดูล LCD แล้วต้องหน่วงเวลาอีกประมาณ 2 มิลลิวินาทีเพื่อให้คอนโทรลเลอร์ในโมดูล LCD แปลความหมายของลอจิกที่ขา RS ว่าข้อมูลต่อไปที่จะได้รับนั้นเป็นรหัสหรือเป็นข้อมูลที่ต้องการแสดงผล จากนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลมารอบที่บัสข้อมูล D0-D7 (กรณีทำงานในโหมด 8 บิต) ขึ้นต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณพัลส์ไปที่ขา E เพื่อเอ็นเอเบิลโมดูล LCD ให้รับข้อมูลจากบัสข้อมูลเข้าไป โดยพัลส์ที่ป้อนเข้าที่ขา E ของโมดูล LCD ต้องเป็นพัลส์ขอบขาขึ้นจากนั้นทำการหน่วงเวลา 2 มิลลิวินาทีทั้งหมดที่กล่าวมาคือขั้นตอนและจังหวะในการทำงาน 1 รอบของโมดูล LCD จะเห็นได้ว่ามีโปรแกรมย่อยที่สำคัญอยู่ 3 โปรแกรมย่อยคือโปรแกรมอินิเชียล LCD โปรแกรมหน่วงเวลาและโปรแกรมย่อยการส่งพัลส์เพื่อเอ็นเอเบิลโมดูล

2.9 วงจรใจเรเตอร์

เหตุผลในการที่ต้องนำวงจรใจเรเตอร์มาใช้คือ ในสภาวะเริ่มต้นการทำงานของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ตัวเซนเซอร์อาจให้ค่าค่าปาดันซ์ออกมาที่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งเซนเซอร์แต่ละตัวอาจจะมีค่าเริ่มต้นไม่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากันอันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิ หรือสภาพแวดล้อมต่างๆ หรือเกิดจากตัวคาปาซิทีฟเซนเซอร์เอง เราจึงต้องนำวงจรไจเรเตอร์เข้ามาเพื่อปรับแต่งค่า C เนื่องจากวงจรวจรไจเรเตอร์เปรียบเสมือนตัว C ซึ่งสามารถปรับแต่งค่าคาปาซิแตนซ์ได้ เพราะในการใช้งานจริงเราไม่สามารถที่จะเอาค่า C ที่ตายตัวมาเปลี่ยนใส่ที่ละค่าเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก ดังนั้นตัว C (Reference) จึงควรเป็น C ที่สามารถปรับค่าได้

วงจรวจรไจเรเตอร์เป็นวงจรการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวมันให้เปรียบเสมือนตัวเหนี่ยวนำ หรือสามารถทำให้เปรียบเสมือนตัวเก็บประจุได้ จากรูปที่ 2.14 เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ (Z) โดยมองที่โหนด A โดยป้อนสัญญาณตามรูปที่ 2.14 จากทฤษฎีของออปแอมป์ $V_n = V_p$ จะได้กระแสเท่ากับ



รูปที่ 2.14 วงจรวจรไจเรเตอร์

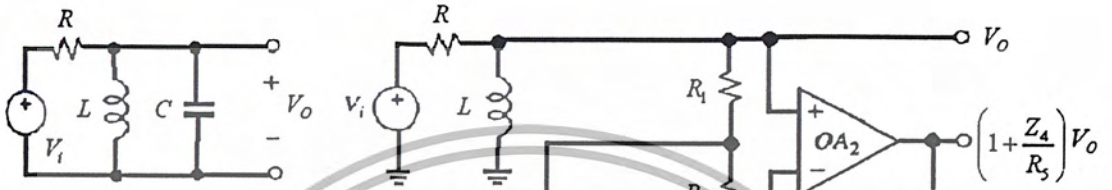
และผลรวมของกระแสที่โหนดร่วมระหว่าง Z_2 หรือ Z_3 และที่โหนดร่วมระหว่าง Z_4 และ Z_5

$$\frac{V_1 - V}{Z_2} + \frac{V_2 - V}{Z_3} = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{V_2 - V}{Z_4} + \frac{0 - V}{Z_5} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัด V_1 และ V_2 โดยใช้ $Z = V/i$

$$Z = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4}$$



รูปที่ 2.15 วงจรใจเรเตอร์ (เปรียบเสมือนค่าคาปาซิเตอร์)

ดังนั้น

$$Z = \frac{R_1 R_3 R_5}{Ls R_4}$$

$$\frac{R_1 R_3 R_5}{Ls R_4} = \frac{1}{Cs}$$

บทที่ 3

ผลการทดลอง

จากการที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ มาทำการทดลองวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเท่าใด

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) คำนวณค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์
- 2.) วัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์
- 3.) คำนวณค่าความผิดพลาด

3.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ตั้งแต่ 1 pF – 1nF

ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ตั้งแต่ 1 pF – 1nF ด้วยวงจรวจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ (จากรูปที่ 2.1) ซึ่งประกอบด้วยวงจร

- 1.) วงจรดิฟเฟอเรนเชียล
- 2.) วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น
- 3.) วงจรกรองผ่านความถี่
- 4.) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส
- 5.) วงจรรวมสัญญาณ

3.1.1 ผลการคำนวณวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

ผลจากการคำนวณวงจรรูปที่ 2.1 โดยค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 pF – 1 nF

ส่วนที่ 1 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ใช้งานร่วมกับวงจรรดิฟเฟอเรนเชียล

คำนวณค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนแปลงที่ 150 pF

วงจรรดิฟเฟอเรนเชียล (จากรูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 50 \text{ k}\Omega, R_f = 100 \text{ k}\Omega, C_1 = (\text{Capacitive Sensor}) = 150 \text{ pF}, C_f = 1 \text{ pF}$$

Solution

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f C_1 s}{1 + (R_f C_f + R_1 C_1) s + R_1 R_f C_1 C_f s^2}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-(100 \times 150 \times 10^{-6} \times 2\pi)}{1 + ([10^{-4} \times 2\pi] + [5 \times 15 \times 10^{-4} \times 2\pi]) + (5 \times 15 \times 10^{-8} \times 2\pi \times 2\pi)}$$

$$= -0.0942$$

$$V_{out} = -0.1884 V_{P-P}$$

$$V_{O1} = -0.1884 V_{P-P}$$

วงจรเรียงกระแสเชิงตรงเต็มลูกคลื่น (จากรูปที่ 2.5)

Solution $V_{O1} = V_{in} = -0.1884 V_{P-P}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left| \frac{1}{2} \right|$$

แทนค่า

$$V_{out} = \left| \frac{0.1884}{2} \right|$$

$$V_{out} = 0.0942 V_{DC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองผ่านความถี่ต่ำ (จากรูปที่ 2.6)

$$\text{Solution } V_{in} = 0.0942 V_{DC}$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{1}{1 + (2 \times \pi \times 15.9 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6})} \\ &= 1.3 \\ V_{out} &= 0.1225 V_{DC} \\ V_a &= 0.1225 V_{DC} \end{aligned}$$

ส่วนที่ 2 วงจรโอเพนคอล์ปใช้งานร่วมกับวงจรมัลติโพลีเฟสเฟส

คำนวณค่าคาปาซิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่ 47 pF

วงจรมัลติโพลีเฟสเฟส (จากรูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_2 = 50 \text{ k}\Omega, R_f = 100 \text{ k}\Omega, C_2 = (\text{Generalized}) = 47 \text{ pF}, C_f = 1 \text{ pF}$$

Solution

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f C_1 s}{1 + (R_f C_f + R_1 C_1) s + R_1 R_f C_1 C_f s^2}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-(100 \times 47 \times 10^{-6} \times 2\pi)}{1 + ([10^{-4} \times 2\pi] + [5 \times 4.7 \times 10^{-4} \times 2\pi]) + (5 \times 4.7 \times 10^{-8} \times 2\pi \times 2\pi)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -0.0295$$

$$V_{out} = -0.059 V_{P-P}$$

$$V_{O2} = -0.059 V_{P-P}$$

วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น (จากรูปที่ 2.5)

Solution $V_{O2} = V_{in} = -0.059 V_{P-P}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}$$

แทนค่า

$$V_{out} = \frac{0.059}{2}$$

$$V_{out} = 0.0295 V_{DC}$$

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (จากรูปที่ 2.6)

Solution $V_{in} = 0.0295 V_{DC}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + (2 \times \pi \times 15.9 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.3$$

$$V_{out} = 0.0384 V_{DC}$$

$$V_b = 0.0384 V_{DC}$$

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (จากรูปที่ 2.7)

Solution $V_b = V_{in} = 0.0384 V_{P-P}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_i}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{10^3}{10^3}$$

$$V_{out} = -0.0384 V_{DC}$$

วงจรรวมสัญญาณ (จากรูปที่ 2.8)

Solution $V_a = 0.1225 V_{DC}, V_b = -0.0384$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_s} (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

แทนค่า

$$V_{out} = -\frac{10^3}{10^3} (0.1225 - 0.0384)$$

$$V_{out} = -0.0841 V_{DC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ผลการทดลองวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทิฟเซนเซอร์

ผลจากการทดลองจากรูปที่ 2.1 โดยค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทิฟเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 pF – 1nF

วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเดออร์ ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 50 \text{ k}\Omega, R_f = 100 \text{ k}\Omega, C_1 = (\text{Capacitive Sensor}), C_f = 1 \text{ pF}$$

ค่า CAPACITOR (SENSOR)

	1 pF	10 pF	47 pF	100 pF	150 pF	180 pF	200 pF
1 pF	-2	3	-32	72	122	146	158
10 pF	-7	-2	29	69	117	142	153
47 pF	-36	-30	0	41	90	111	126
100 pF	-74	-71	-41	-2	49	70	85
150 pF	-123	-119	-90	-48	-2	22	38
180 pF	-143	-143	-113	-74	-24	-2	13
200 pF	-158	-153	-126	-84	-35	-14	-1
270 pF	-206	-201	-173	-132	-82	-58	-46
330 pF	-246	-244	-215	-174	-125	-104	-89
560 pF	-441	-436	-408	-366	-317	-296	-281
680 pF	-525	-521	-491	-451	-402	-381	-366
820 pF	-632	-631	-603	-562	-513	-489	-476
1 nF	-772	-770	-741	-700	-650	-626	-612

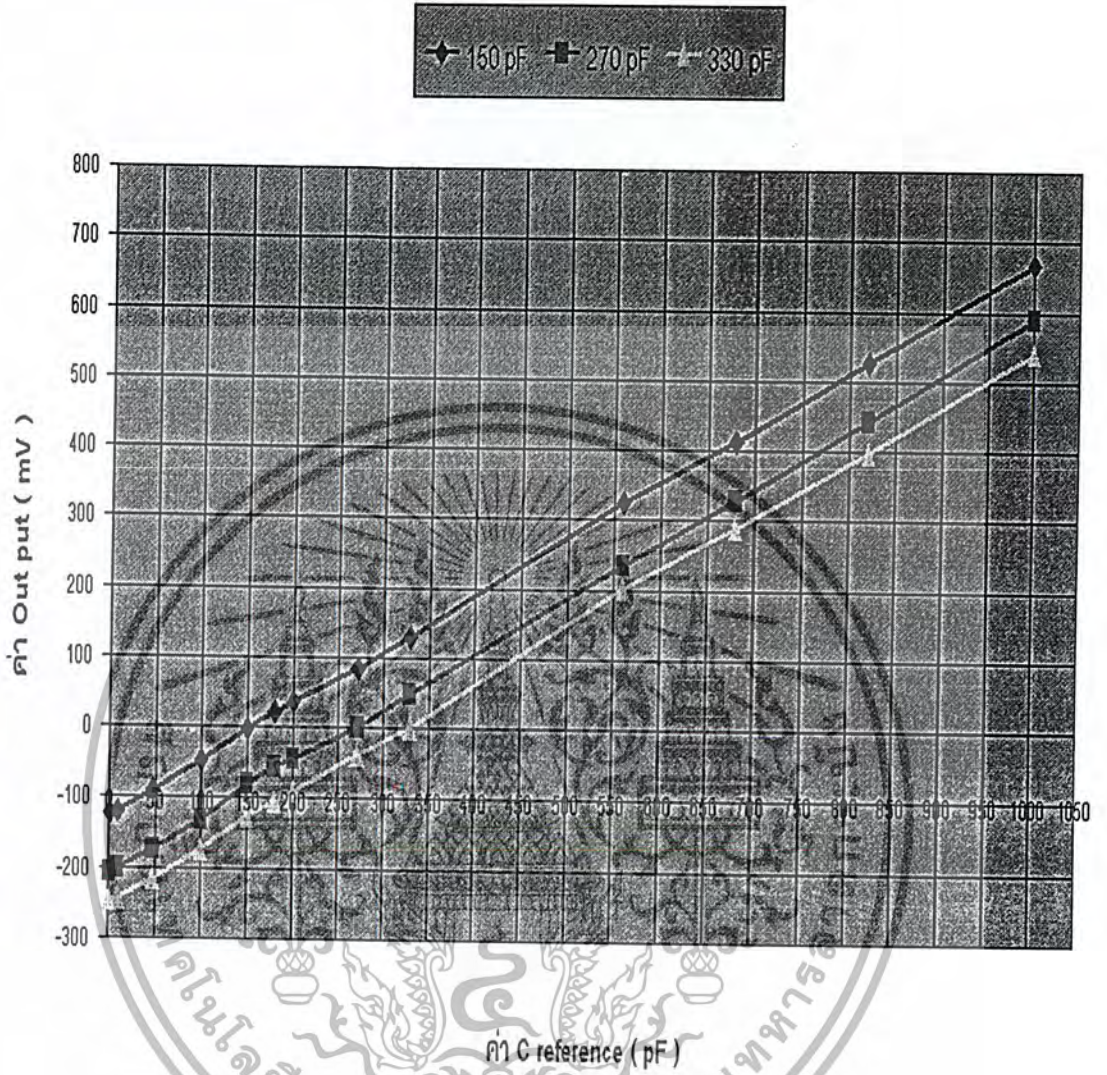
ค่า CAPACITOR (REFERENCE)

ตารางที่ 3.1 ตารางเอาต์พุต(mV)เปรียบเทียบคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 1 pF - 200 pF และคาปาซิเตอร์(อ้างอิง) 1 pF - 1 nF

ค่า CAPACITOR (SENSOR)

	270 pF	330 pF	560 pF	680 pF	820 pF	1 nF
1 pF	206	249	442	546	644	784
10 pF	202	245	440	531	634	780
47 pF	175	219	411	523	610	760
100 pF	134	178	374	463	566	717
150 pF	86	131	325	413	526	668
180 pF	63	107	301	393	498	648
200 pF	51	93	290	376	490	638
270 pF	2	49	234	328	443	590
330 pF	-40	2	201	290	398	543
560 pF	-232	-187	3	98	210	360
680 pF	-316	-273	-78	3	126	271
820 pF	-429	-385	-191	-101	3	155
1 nF	-564	-516	-325	-238	-123	3

ตารางที่ 3.2 ตารางเอาท์พุท(mV)เปรียบเทียบคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 270pF -1 nF และคาปาซิเตอร์(อ้างอิง) 1 pF - 1 nF



รูปที่ 3.1 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบค่าคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) และ คาปาซิเตอร์(อ้างอิง)

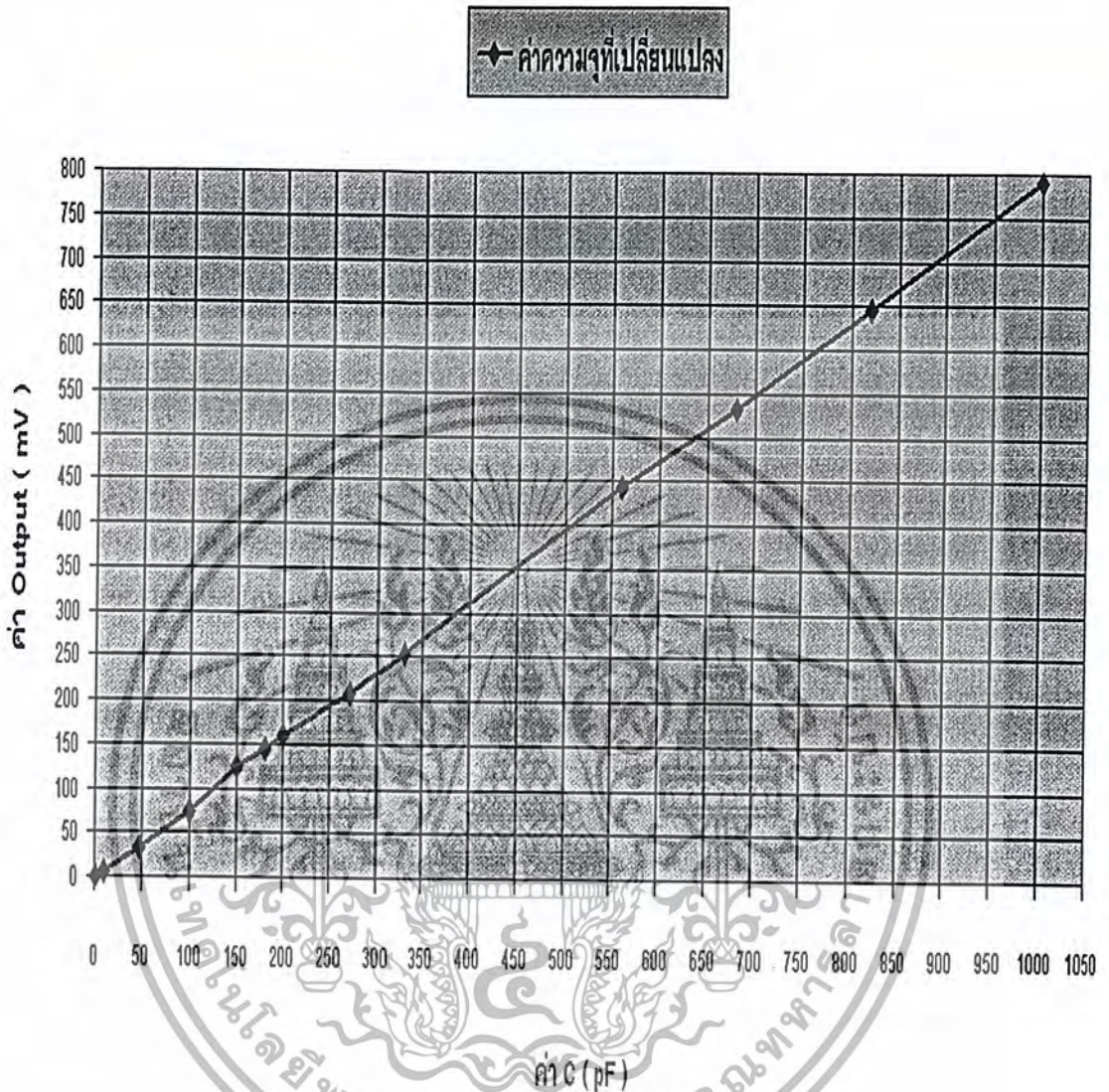
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุทของวงจรวจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (▲C)

	ค่าที่ได้จากการวัด (V)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ (V)	ค่าความผิดพลาด (V)	% ความผิดพลาด
1 pF	0.001	0.0008	0.25	25
10 pF	0.005	0.008	0.375	37.5
47 pF	0.034	0.0384	0.1146	11.46
100 pF	0.073	0.0816	0.1054	10.54
150 pF	0.124	0.1225	0.0122	12.2
180 pF	0.144	0.1469	0.0197	1.97
200 pF	0.159	0.1632	0.0257	2.57
270 pF	0.208	0.2204	0.0563	5.63
330 pF	0.253	0.274	0.0766	7.66
560 pF	0.444	0.4572	0.0289	2.89
680 pF	0.532	0.5551	0.0416	4.16
820 pF	0.645	0.6694	0.0365	3.65
1 nF	0.79	0.8164	0.0323	3.23

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (▲C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (▲ C)

3.1.3 ความผิดพลาดค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (▲ C) ที่ 100 pF

$$\begin{aligned}
 \text{ความผิดพลาด} &= \frac{\text{ค่าที่คำนวณได้} - \text{ค่าที่วัดได้}}{\text{ค่าที่คำนวณได้}} \\
 &= \frac{0.0841 - 0.073}{0.0841} \\
 &= 0.1
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ หรือ ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 10% ภาษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองที่ 2 วัดค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ตั้งแต่ 1 nF – 470 nF

ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ตั้งแต่ 1 nF – 470 nF ด้วยวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์ (จากรูปที่ 2.1) ซึ่งประกอบด้วยวงจร

- 1.) วงจรดิฟเฟอเรนเชียล
- 2.) วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น
- 3.) วงจรกรองผ่านความถี่
- 4.) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส
- 5.) วงจรรวมสัญญาณ

3.2.1 ผลการคำนวณวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

ผลจากการคำนวณจากรูปที่ 2.1 โดยค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 nF – 470 nF

ส่วนที่ 1 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

คำนวณค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนแปลงที่ 180 nF

วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (จากรูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 1 \Omega, R_f = 240 \Omega, C_1 = (\text{Capacitive Sensor}) = 180 \text{ nF}, C_f = 1 \text{ pF}$$

Solution

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f C_1 s}{1 + (R_f C_f + R_1 C_1) s + R_1 R_f C_1 C_f s^2}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-(240 \times 180 \times 10^{-9} \times 2\pi)}{1 + ([24 \times 10^{-8} \times 2\pi] + [18 \times 10^{-5} \times 2\pi]) + (24 \times 18 \times 10^{-7} \times 2\pi \times 2\pi)}$$

$$= -0.27$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = -0.54 V_{P-P}$$

$$V_{O1} = -0.54 V_{P-P}$$

วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น (จากรูปที่ 2.5)

Solution $V_{O1} = V_{in} = -0.54 V_{P-P}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left| \frac{1}{2} \right|$$

แทนค่า

$$V_{out} = \left| \frac{0.54}{2} \right|$$

$$V_{out} = 0.27 V_{DC}$$

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (จากรูปที่ 2.6)

Solution $V_{in} = 0.27 V_{DC}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+(2 \times \pi \times 15.9 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.3$$

$$V_{out} = 0.351 V_{DC}$$

$$V_a = 0.351 V_{DC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 วงจรไจเรเตอร์ใช้งานร่วมกับวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

คำนวณค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนแปลงที่ 33 nF

วงจรดิฟเฟอเรนเชียล (จากรูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_2 = 1 \Omega, R_f = 240 \Omega, C_2 = (\text{Generalized}) = 33 \text{ nF}, C_f = 1 \text{ pF}$$

Solution

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_f C_1 s}{1 + (R_f C_f + R_1 C_1) s + R_1 R_f C_1 C_f s^2}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-(240 \times 33 \times 10^{-9} \times 2\pi)}{1 + ([24 \times 10^{-8} \times 2\pi] + [33 \times 10^{-6} \times 2\pi]) + (24 \times 33 \times 10^{-14} \times 4\pi^2)}$$

$$= -0.0497$$

$$V_{out} = -0.0995 V_{p-p}$$

$$V_{O2} = -0.0995 V_{p-p}$$

วงจรเรียงกระแสเพียงตรงเต็มลูกคลื่น (จากรูปที่ 2.5)

Solution $V_{O2} = V_{in} = -0.0995 V_{P-P}$
 ทรานเฟอ์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left| \frac{1}{2} \right|$$

แทนค่า

$$V_{out} = \frac{0.0995}{2}$$

$$V_{out} = 0.0497 V_{DC}$$

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (จากรูปที่ 2.6)

Solution $V_{in} = 0.0497 V_{DC}$
 ทรานเฟอ์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+(2 \times \pi \times 15.9 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.3$$

$$V_{out} = 0.078 V_{DC}$$

$$V_b = 0.078 V_{DC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (จากรูปที่ 2.7)

Solution $V_b = V_{in} = 0.078 \quad V_{P-P}$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1}$$

แทนค่า

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{10^3}{10^3}$$

$$V_{out} = -0.078 \quad V_{DC}$$

วงจรรวมสัญญาณ (จากรูปที่ 2.8)

Solution $V_a = 0.1225 \quad V_{DC}, V_b = -0.0384$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_s} (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

แทนค่า

$$V_{out} = -\frac{10^3}{10^3} (0.351 - 0.078)$$

$$V_{out} = -0.273 \quad V_{DC}$$

3.2.2 ผลการทดลองวงจรเชื่อมต่อการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์

ผลจากการทดลองจากรูปที่ 2.1 โดยค่าคาปาซิแตนซ์ในคาปาซิทีฟเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 nF – 470 nF

วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเดออร์ ประกอบด้วย

$$V_{in} = (\text{Sine wave}) 2 V_{p-p}, 1 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 1 \Omega, R_f = 240 \Omega, C_1 = (\text{Capacitive Sensor}), C_f = 1 \text{ pF}$$

ค่า CAPACITOR (SENSOR)

	1 nF	3.9 nF	4.7 nF	10 nF	20 nF	22 nF	33 nF
1 nF	0	6	7	22	46	48	85
3.9 nF	-7	-1	0	15	29	43	77
4.7 nF	-9	-3	-2	15	26	39	73
10 nF	-20	-16	-14	-3	-17	-25	-33
20 nF	-34	-31	-28	-17	2	8	42
22 nF	-45	-42	-40	-28	-5	-1	31
33 nF	-80	-75	-74	-63	-42	-38	-6
50 nF	-83	-79	-77	-66	-46	-45	-11
120 nF	-228	-225	-221	-211	-190	-185	-153
150 nF	-245	-242	-239	-228	-209	-203	-174
180 nF	-348	-344	-342	-332	-310	-308	-278
270 nF	-536	-533	-530	-519	-499	-495	-466
330 nF	-626	-623	-620	-610	-589	-585	-549
390 nF	-754	-750	-748	-736	-713	-712	-681
470 nF	-890	-885	-882	-874	-849	-841	-813

ค่า CAPACITOR (REFERENCE)

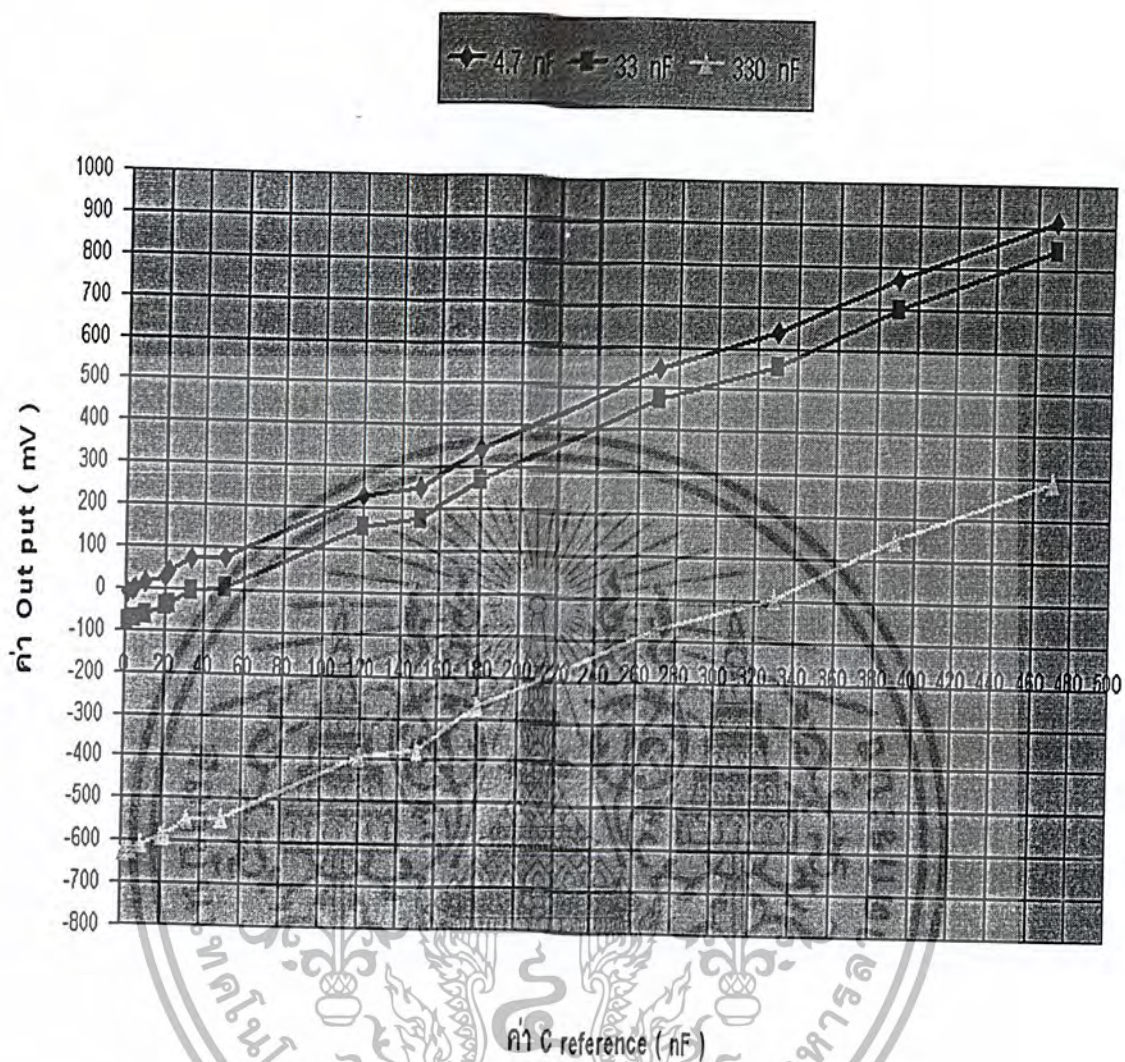
ตารางที่ 3.4 ตารางเอาท์พุท (mV) เปรียบเทียบคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 1 nF - 33 nF และคาปาซิเตอร์(อ้างอิง) 1 nF - 470 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า CAPACITOR (SENSOR)

	50 nF	120 nF	150 nF	180 nF	270 nF	330 nF	390 nF	470 nF
1 nF	87	234	257	348	552	645	777	920
3.9 nF	80	228	251	342	546	639	770	513
4.7 nF	78	226	250	341	546	638	770	912
10 nF	63	214	238	328	533	626	757	899
20 nF	52	202	226	316	522	614	748	899
22 nF	40	189	213	303	508	600	730	875
33 nF	4	155	178	269	474	555	699	844
50 nF	-2	149	173	263	406	559	690	831
120 nF	-146	5	29	119	321	402	544	685
150 nF	-164	-14	12	110	304	385	529	680
180 nF	-266	-114	-96	1	205	297	428	569
270 nF	-454	-302	-284	-179	17	109	240	381
330 nF	-544	-392	-374	-269	-75	6	150	291
390 nF	-670	-520	-501	-397	-202	-109	31	155
470 nF	-808	-697	-638	-533	-339	-246	-106	36

ตารางที่ 3.5 ตารางเอาท์พุท(mV)เปรียบเทียบคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) 50nF - 470 nF
และคาปาซิเตอร์(อ้างอิง) 1 nF - 470 nF

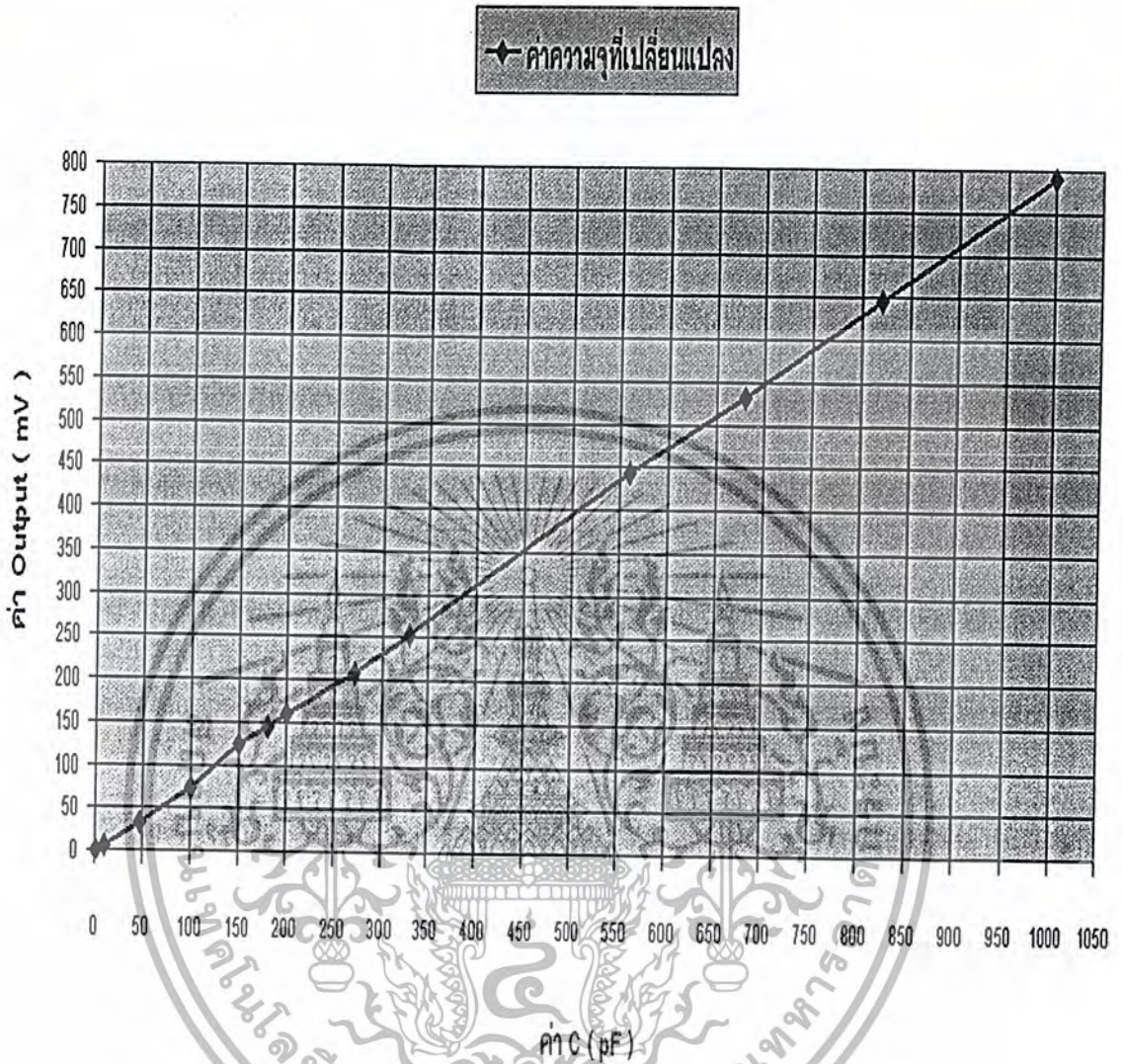


รูปที่ 3.3 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบคาปาซิเตอร์(เซนเซอร์) และ คาปาซิเตอร์(อ้างอิง)

เอาท์พุทของวงจรวจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (▲C)

	ค่าที่ได้จากการวัด (V)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ (V)	ค่าความผิดพลาด (V)	% ความผิดพลาด
1 nF	0.0020	0.0019	0.025	2.5
3.9 nF	0.0077	0.0078	0.0128	1.282
4.7 nF	0.0036	0.0039	0.0769	7.69
10 nF	0.0166	0.017	0.0235	2.35
20 nF	0.039	0.0423	0.078	7.8
22 nF	0.042	0.0455	0.0769	7.69
33 nF	0.077	0.078	0.0128	1.282
50 nF	0.079	0.080	0.0125	1.25
120 nF	0.225	0.234	0.0384	3.84
150 nF	0.243	0.26	0.0653	6.53
180 nF	0.344	0.351	0.0199	1.99
270 nF	0.532	0.5213	0.0205	2.05
330 nF	0.623	0.624	0.0016	0.16
390 nF	0.757	0.754	0.0039	0.39
470 nF	0.891	0.91	0.0208	2.08

ตารางที่ 3.6 ตารางค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (▲C)



รูปที่ 3.4 กราฟค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง (▲ C)

3.2.3 ความผิดพลาดค่าความจุที่เปลี่ยนแปลง(▲ C) ที่ 150 nF

$$\begin{aligned}
 \text{ความผิดพลาด} &= \frac{\text{ค่าที่คำนวณได้} - \text{ค่าที่วัดได้}}{\text{ค่าที่คำนวณได้}} \\
 &= \frac{0.26 - 0.243}{0.26} \\
 &= 0.0653
 \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad = 6.53 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

Sergio Franco, Design With Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, New York.

ผศ.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ , OP-AMPs and Analog signal processing;2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้