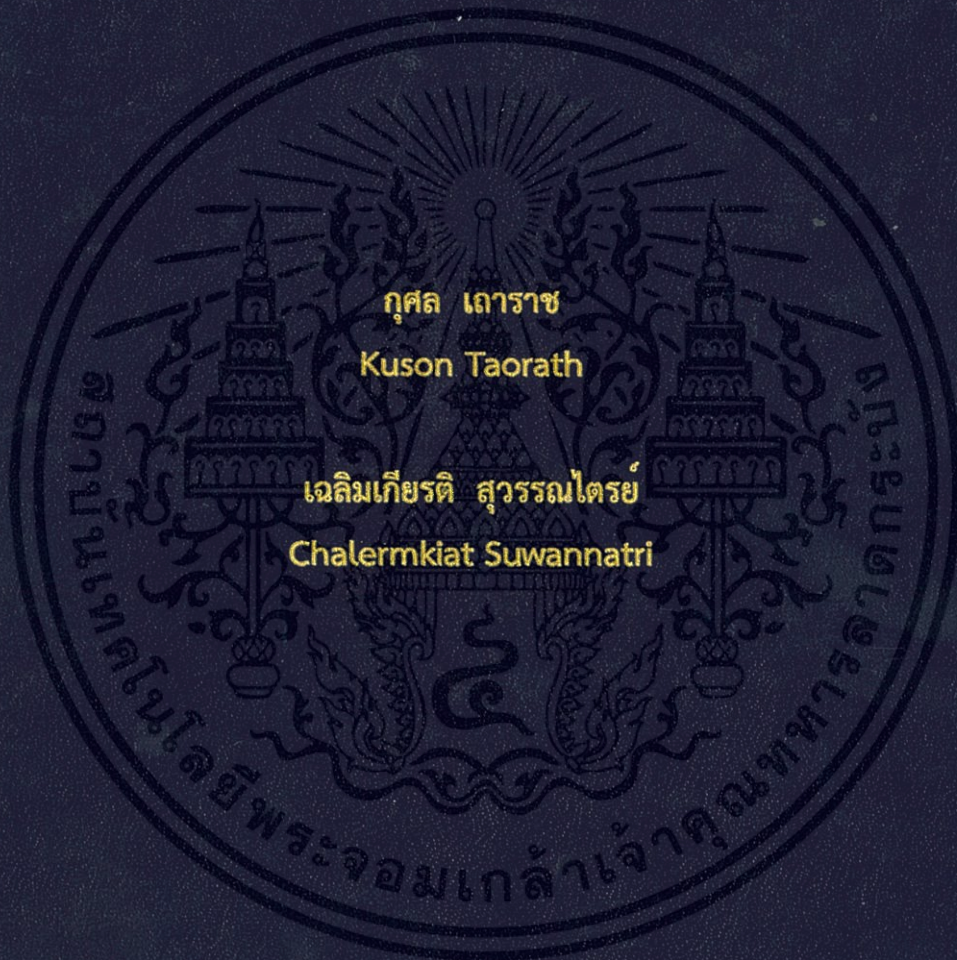


การวัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์

Respiration Inductance Phethysmography



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

การวัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์

Respiration Inductance Phethismography



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์

Respiration Inductance Plethysmography

ผู้จัดทำ

1. นายกุศล เถาราช รหัสนักศึกษา 54010123

2. นายเฉลิมเกียรติ สุวรรณไตรย์ รหัสนักศึกษา 54010253

ปริญญานิพนธ์ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



ผศ.ดร. กิตติพล ชิตสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์	
นักศึกษา	นาย กุศล เถาราช	รหัสนักศึกษา 54010123
	นาย เฉลิมเกียรติ สุวรรณไตรย์	รหัสนักศึกษา 54010253
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กิตติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา	

### บทคัดย่อ

การหยุดหายใจขณะนอนหลับ มีสาเหตุจากหลายปัจจัยและสามารถตรวจสอบได้ยากด้วยตัวผู้ป่วยเอง จนกระทั่งปรากฏอาการข้างเคียงขึ้น อุปกรณ์ตรวจวัดการหายใจที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้หลักการตรวจจับการเปลี่ยนค่าความเหนียวน้ำของอุปกรณ์สวมใส่ขณะนอนได้ โดยมีอุปกรณ์หลักๆอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนสายคาดอกซึ่งผู้ป่วยใช้สวมใส่สามารถยืดและหดได้ มีหลอดตัวนำถักแทรกเป็นรูปซิกแซกตลอดความยาวรอบอก ส่วนที่ 2 เป็นส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตรวจจับการเปลี่ยนค่าความเหนียวน้ำตามการขยายตัวของสายคาดอกซึ่งใช้หลักการของป้อนกระแสความถี่ 6.7 MHz จากออสซิลเลเตอร์แบบ Colpitts ผ่านขดลวดสายคาดอกแล้ววัดแรงดันเปลี่ยนแปลงตกคล่อม ซึ่งสามารถนำมาแสดงผลในส่วนที่ 3 ส่วนมอนิเตอร์แสดงผล จากนั้นได้ทำการทดสอบผลสัมฤทธิ์ของอุปกรณ์ตามหลักการข้างต้นกับเครื่องจำลองการขยายตัวของทรวงอก(Phantom:แฟนทอม)ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมา ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักแตนซ์ตามการขยายขนาดของสายคาดอกได้ โดยแสดงผลเป็นรูปคลื่นที่หน้าจอออสซิลโคป

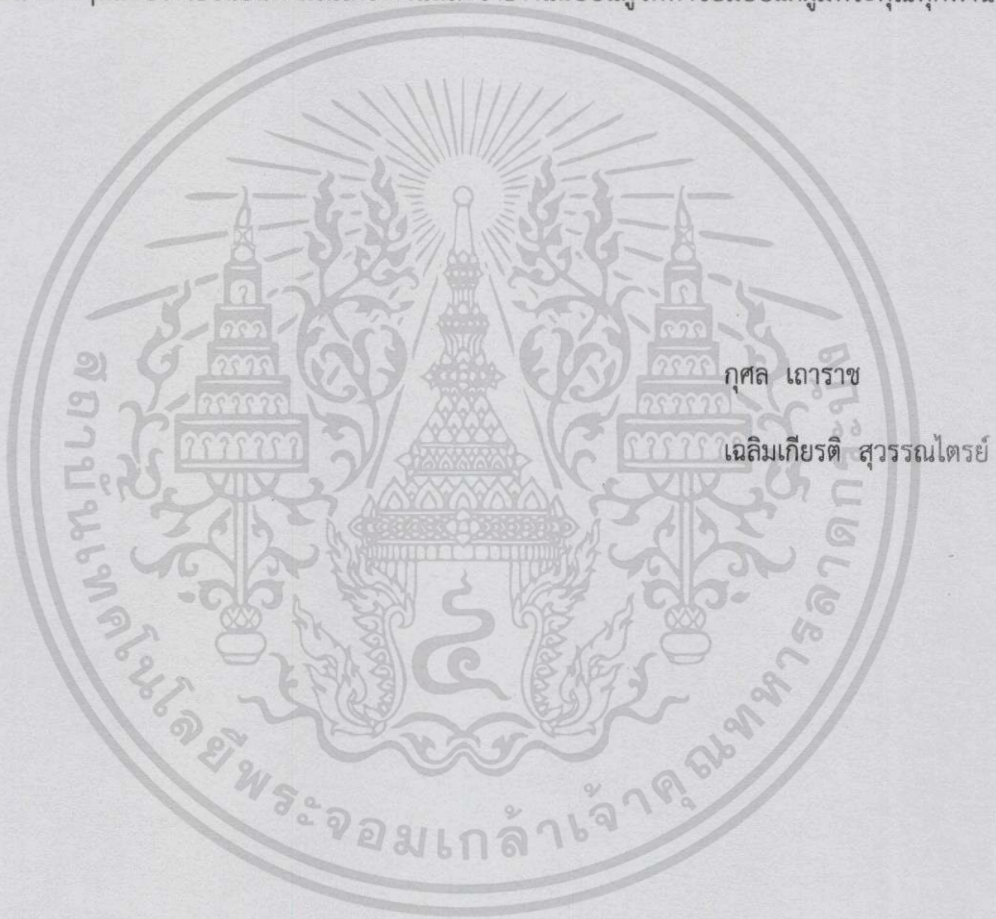
<b>Thesis Title</b>	Respiration Inductance Plethysmography	
<b>Student</b>	Mr. Kuson Taorath	Student ID 54010123
	Mr. Chalermkiat Suwannatri	Student ID 54010253
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Electronic Engineering	
<b>Year</b>	2014	
<b>Thesis Advisor</b>	Assist. Prof. Dr. Kitiphol Chitsakul (Advisor)	

### Abstract

Stop breathing while sleeping is a septum easily found in Thai population. The obstructing sleep apnea (OSA) is caused by many factors. It is also difficult to recognize by patients themselves. This respiration monitor has been developed for purpose of monitor the respiration during sleeping. The device consists of three main parts. The first one is an elastic band inserted by some tiny conductor wires in zigzag pattern wearable around the chest of the patient. The extension of the band during inhaling-exhaling provokes the change in inductance of the coil. An electronic circuit, the second part, detects this change and sends to the third part, waveform monitor. Based on general impedance measurement, alternating currents of 6.7 MHz from the Colpitts oscillator is injected into the coil attached with the band. Variations of dropping potential are detected during inhaling-exhaling. Finally the achievement of implementation was evaluated by using a developed phantom. The preliminary results have been shown that the variation of inductance change could be monitored on a oscilloscope.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการและรายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์ เพราะได้รับความแนะนำสนับสนุนและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.กิตติพล ชิตสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำโครงการและรายงานในครั้งนี้ และยังได้รับความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือจากภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านและขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ และประโยชน์อันพึงมีในโครงการและรายงานฉบับนี้ผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูปภาพ .....	VIII
สารบัญตาราง .....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและโครงสร้างเบื้องต้นของระบบ.....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.3 โครงสร้างของปริยญาภิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 การหายใจ (Respiration).....	4
2.2 วิธีการประเมินการหายใจ.....	5
2.3 หลักการการตรวจจับการหายใจแบบ Respiration Inductance Plethysmography.....	5
2.4 ความถี่รีโซแนนซ์.....	5
2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์ อนุกรม .....	6
2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์ ขนาน.....	9
2.5 Pulse Width Modulation.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
2.6 การสร้างสัญญาณ (Oscillator).....	13
2.6.1 หลักการทำงานของออสซิลเลเตอร์.....	13
2.6.2 Feedback Oscillator.....	15
2.7 การแบ่งแรงดัน (Voltage Dividers).....	20
2.7.1 การแบ่งแรงดัน (การแบ่งความต่างศักย์).....	20
2.8 การมอดูเลชัน (Modulation).....	21
2.8.1 องค์ประกอบของการมอดูเลต.....	22
2.8.2 การมอดูเลชันทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM).....	22
2.8.3 การมอดูเลชันทางความถี่ (Frequency Modulation หรือ FM).....	23
2.8.4 การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation หรือ PM).....	24
2.9 วงจร Demodulator.....	24
2.9.1 เอ็นเวลโลปดีเทคชัน.....	25
2.9.2 ซิงโครนัสดีเทคชัน.....	25
2.10 วงจรกรองความถี่ (Filter).....	27
2.10.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter).....	28
2.10.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter).....	29
2.10.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter).....	30
2.10.4 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่าน (Band Stop Filter).....	31

## สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4.4.2 วงจร Colpitts Oscillator.....	54
4.4.3 วงจรคีมอดูเลเตอร์.....	56
4.4.4 วงจรBandpass Filter.....	57
4.4.5 วงจร Amplifier.....	59
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	60
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
บรรณานุกรม.....	61
ภาคผนวก	

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 หลักการของ Inductance Plethysmography ในการวัดการหายใจ.....	1
1.2 รูปแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบรวม.....	2
2.1 วงจรวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	6
2.2 ก และ 2.2 ข .....	7
2.3 แบนวิดธ์วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม.....	9
2.4 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน.....	9
2.5 ก และ 2.5 ข .....	11
2.6 แบนวิดธ์วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน .....	12
2.7 วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น.....	14
2.8 วงจรพื้นฐาน Feedback Oscillator.....	15
2.9 วงจรพื้นฐานRC Phase-shifted Oscillator.....	17
2.10 วงจรพื้นฐานLC Colpitts Oscillator.....	18
2.11 วงจร Quartz Crystal Oscillator .....	18
2.12 วงจรแบ่งแรงดันที่ไม่มีโหลด.....	20
2.13 วงจรแบ่งแรงดันที่มีโหลด .....	20
2.14 วงจรแบ่งแรงดัน .....	21
2.15 วงจรผสมสัญญาณ.....	22
2.16 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด .....	23
2.17 การมอดูเลตทางความถี่.....	23

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

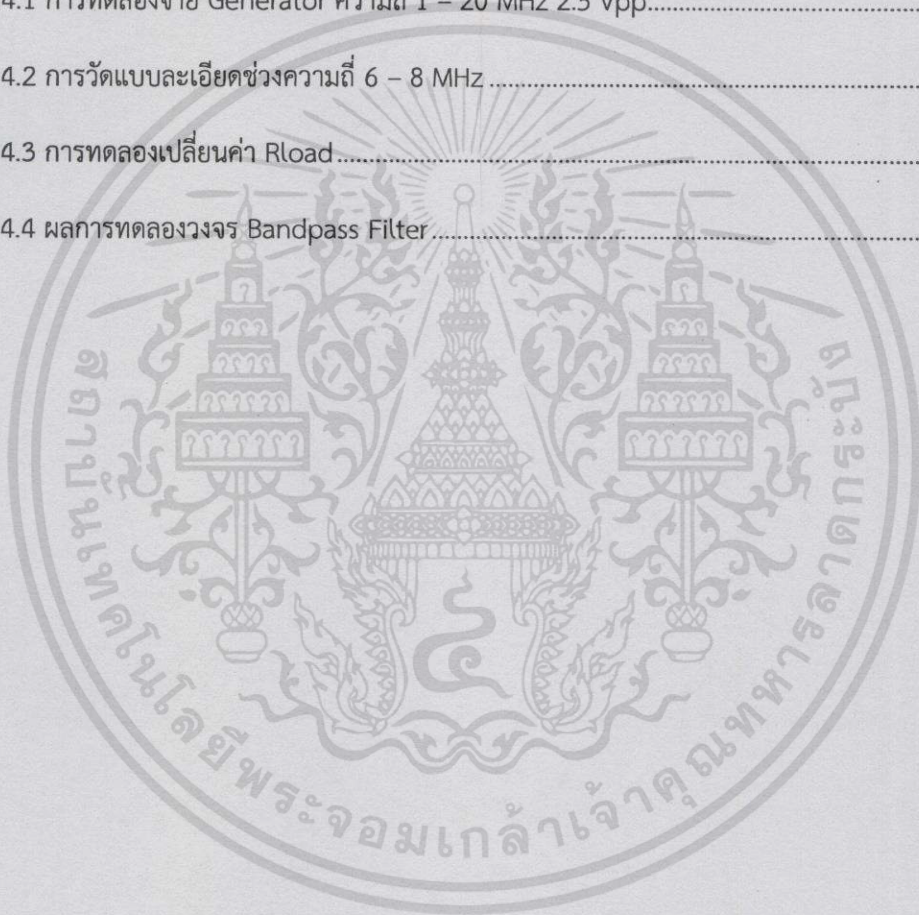
รูปที่	หน้า
2.18 การมอดูเลตทางเฟส.....	24
2.19 เอ็นเวลโลปดีเทคเตอร์.....	25
2.20 การดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC .....	27
2.21 การกรองความถี่.....	28
2.22 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวที.....	29
2.23 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปตัวพาย.....	29
2.24 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวที.....	30
2.25 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวพาย.....	30
2.26 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	31
2.27 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	31
2.28 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่านแบบขนาน.....	32
2.29 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่านแบบอนุกรม.....	32
2.30 การทำงานของมอเตอร์.....	34
2.31 การทำงานของมอเตอร์.....	34
2.32 วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ และ แปรงถ่าน.....	35
2.33 โครงสร้างและภาพจริงของอานาเจอร์.....	36
2.34 บอร์ดArduino ต่อกับ LED.....	37
2.35 บอร์ดArduino ต่อกับบอร์ด XBee Shield.....	37

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.36 การเขียนโปรแกรมบน Arduino.....	38
3.1 วงจร Colpitts Oscillator.....	41
3.2 วงจร Resonance.....	42
3.3 วงจร Demodulator.....	43
3.4 วงจร Bandpass Filter.....	44
3.5 วงจร Amplifier.....	45
3.6 เครื่องจำลองการขยายตัวของทรานซอร์.....	46
3.7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์.....	47
4.1 รูปแสดงภายนอกเครื่องต้นแบบ.....	50
4.2 ภาพรวมของวงจร.....	50
4.3 การวัดผลวงจร Resonance.....	51
4.4 รูปกราฟผลการทดลองที่ความถี่ 1 – 20 MHz 2.5 Vpp.....	52
4.5 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Resonance.....	54
4.6 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Colpitts Oscillator.....	55
4.7 กราฟแสดง Vload เมื่อเปลี่ยน Rload.....	56
4.8 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Demodulator.....	57
4.9 การตอบสนองของ Bandpass filter.....	58
4.10 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Amplifier.....	59

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตาราง2.1 ตารางอัตราการทำใจของมนุษย์.....	4
ตาราง2.2 ตารางอุปกรณ์ในย่านความถี่ต่างๆ.....	19
ตาราง4.1 การทดลองจ่าย Generator ความถี่ 1 – 20 MHz 2.5 Vpp.....	51
ตาราง4.2 การวัดแบบละเอียดช่วงความถี่ 6 – 8 MHz.....	53
ตาราง4.3 การทดลองเปลี่ยนค่า Rload.....	55
ตาราง4.4 ผลการทดลองวงจร Bandpass Filter.....	57



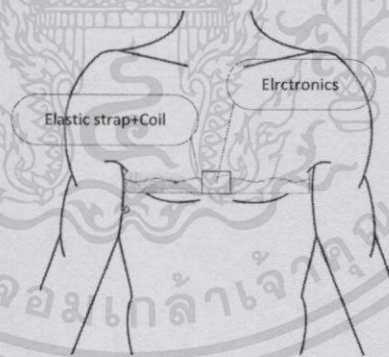
# บทที่ 1

## บทนำ

การหยุดหายใจขณะนอนหลับ มีสาเหตุจากหลายปัจจัยและสามารถตรวจสอบได้ยากด้วยตัวผู้ป่วยเอง จนกระทั่งปรากฏอาการข้างเคียงขึ้น อุปกรณ์ตรวจวัดการหายใจที่พัฒนาขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดการหายใจที่ซับซ้อนและสมบูรณ์มากขึ้น โครงการงานอุปกรณ์วัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์ใช้หลักการการยืด/ขยายตัวของขดลวดตัวเหนี่ยวนำตามการขยายตัวของทรวงอก ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ทางอิเล็กทรอนิกส์

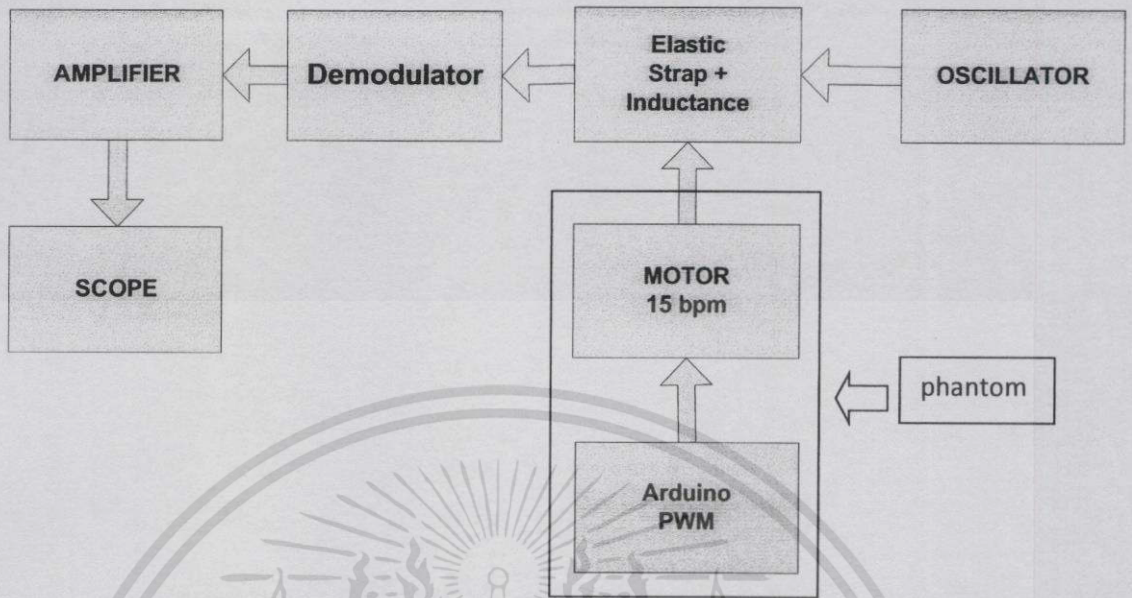
### 1.1 หลักการและโครงสร้างเบื้องต้นของระบบ

หลักการของ Inductance Plethysmography คือการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรตามการเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักแตนซ์ สามารถนำมาใช้การวัดการหายใจโดยใช้คอยล์หรืออินดักเตอร์พันโอบรอบอกหารขยายตัวของช่องอกขณะมีการหายใจจะทำให้ค่าอินดักแตนซ์เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หลักการของ Inductance Plethysmography ในการวัดการหายใจ

จากลักษณะที่ได้กล่าวในข้างต้นโครงสร้างของโครงการนี้จะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรม  
 ดังรูป 1.2



รูปที่ 1.2 รูปแสดงบล็อกไดอะแกรมของโครงการโดยรวม

จากบล็อกไดอะแกรมข้างต้น จะเห็นว่าภาพรวมของระบบทั้งหมดประกอบด้วยตัวแปรสำคัญคือ Elastic Strap+Inductance คือการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำรอบสายคาดอกวงจรนี้เรียกว่าวงจร Resonance ซึ่งเราจะต้องสร้างสัญญาณจาก Oscillator ซึ่งเราต้องหาค่าความถี่ที่เหมาะสมเพื่อจ่ายให้กับ วงจรResonanceจากนั้นก็เข้ากระบวนการแยกสัญญาณออกจากสัญญาณคลื่นพาร์แล้วนำสัญญาณที่ แยกออกแล้วไปเข้าวงจรAmplifierเพื่อขยายสัญญาณแล้วเก็บผลบันทึกการทดลองในส่วนของการหายใจ เราใช้บอร์ด Arduino ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ โดยให้มอเตอร์หมุนให้ได้ 15 รอบ/นาที ซึ่งเป็นการ หายใจเฉลี่ยปกติของมนุษย์โดยการหมุนของมอเตอร์นั้นเปรียบเทียบการหายใจของมนุษย์

## 1.2 ขอบเขตของโครงการ

- สร้างสายรัดหน้าอกยางยืดถักทอเพิ่มเติมด้วยขดลวดทองแดงวัดหรือประมาณค่าอินดักแตนซ์ของขดลวด
- สร้างสัญญาณขั้วขดลวดที่ความถี่เหมาะสมกับขดลวดและสร้างวงจรตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของอินดักแตนซ์
- สร้างเครื่องจำลองการขยายตัวของทรวงอก ขั้วเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งใช้เปรียบเป็นการขยายของทรวงอกขณะหายใจของมนุษย์
- แสดงผลด้วยออสซิลโคป

## 1.3 โครงสร้างของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นผลจากการศึกษาและทดลองตลอดสองภาคการศึกษาเพื่อออกแบบสร้างและทดสอบทดสอบอุปกรณ์วัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์ซึ่งเนื้อหาของปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆแยกเป็นบทๆไปดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและแนวคิดของโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทํางานของส่วนประกอบในโครงสร้าง

บทที่ 3 องค์ประกอบโดยรวมของระบบและการทำงาน

บทที่ 4 การออกแบบ การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการหายใจ (Respiration)

การหายใจเป็นกระบวนการในการสลายสารอาหารของสิ่งมีชีวิตซึ่งจะได้พลังงานจำนวนหนึ่งมาใช้ในการดำรงชีวิต โดยการหายใจจะกระทำโดยระบบหายใจ ซึ่งเป็นระบบที่ร่างกายแลกเปลี่ยนแก๊สโดยร่างกายจะรับแก๊สออกซิเจนที่อยู่ภายนอกเข้าสู่ร่างกายและขับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากร่างกายโดยทางเดินของอากาศในระบบหายใจของมนุษย์อากาศจากการหายใจจะเดินทางเข้าด้วยการหายใจเข้าโดยผ่านจมูกในส่วนของรูจมูกแล้วเคลื่อนที่ไปที่ช่องจมูกผ่านคอหอยเข้าสู่หลอดลมเดินทางต่อไปที่ส่วนของขั้วปอดต่อไปที่ถุงลมเป็นที่สุดท้ายเมื่อเดินทางถึงถุงลมจะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนแก๊สจนเสร็จสิ้นแล้วอากาศจะเดินทางออกด้วยการหายใจออกย้อนกลับมาตามทางเดิมจากกระบวนการเดินทางของอากาศในระบบหายใจ

อัตราการหายใจหมายถึงอัตราการใช้ออกซิเจนเพื่อสลายอินทรีย์สารให้ได้พลังงานหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสิ่งมีชีวิตอัตราการหายใจปกติขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับเพศ วัฏจักรกรรม อาชีพ ปริมาณการทำงาน การนับอัตราการหายใจจะนับการหายใจเข้าและออกนับเป็น 1 ครั้งสังเกตใน 1 นาทีดังนั้นอัตราการหายใจจึงมีหน่วยเป็นครั้งต่อนาที (Beat per Minutes; bpm) สำหรับในกรณีปกติอัตราการหายใจของวัยต่างๆเป็นดังตารางที่ 1

ตาราง 2.1 ตารางอัตราการหายใจของมนุษย์

ลำดับ	วัย	อัตราการหายใจ (bpm)
1	ทารกแรกเกิด	ประมาณ 44
2	เด็กวัยก่อนเรียน	ประมาณ 20-30
3	วัยรุ่น	ประมาณ 16-25
4	ผู้ใหญ่	ประมาณ 12-20

## 2.2 วิธีการประเมินการหายใจ

โดยปกติวิธีการการประเมินการหายใจมีดังต่อไปนี้มีหลายวิธีเช่น สังเกตการเคลื่อนไหวของทรวงอกการฟัง (Auscultation) และการใช้อุปกรณ์การแพทย์ในการวัดอัตราการหายใจในกรณี ที่ภาวะอัตราการหายใจผิดปกติ จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันดังเช่นอัตราการหายใจในผู้ใหญ่มากกว่า 24 ครั้ง/นาที เรียกว่า Tachypnea อัตราการหายใจในผู้ใหญ่น้อยกว่า 10 ครั้ง/นาทีเรียกว่า Bradypnea และ การไม่หายใจหรือหยุดหายใจเรียกว่า Apnea

## 2.3 หลักการการตรวจจับการหายใจแบบ Respiration Inductance Plethysmography

โดยหลักการจะใช้ขดลวดตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวแปรสำคัญโดยที่ขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะสอดใส่เข้าไปในช่องอกซึ่งสามารถยืด/หดได้ ซึ่งจะทำให้ขดลวดตัวเหนี่ยวนำเกิดการยืดและขยายจะเป็นส่วนทำให้เกิดความถี่รีโซแนนซ์ที่ความถี่ค่าหนึ่งจากนั้นจึงต้องสร้างสัญญาณออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่เหมาะสมกับความถี่รีโซแนนซ์ซึ่งจะนำค่าที่วัดได้ไปวัดเทียบกับค่าที่อ้างอิง แล้วจากนั้นก็ส่งต่อไปยังส่วนวงจรอื่นหรือส่วนประมวลผลต่อไป

## 2.4 ความถี่รีโซแนนซ์

Resonance (รีโซแนนซ์) คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใส่พลังงานให้กับวัตถุที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้นๆส่งผลให้วัตถุนั้นสั่นสะเทือนรุนแรงมากขึ้นจากการถ่ายเทพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้ผลลัพธ์เป็นเสียงจากการสั่นสะเทือนโดยมีความถี่ช่วงหนึ่งที่มีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติโดดเด่นขึ้นมาเป็นพิเศษ

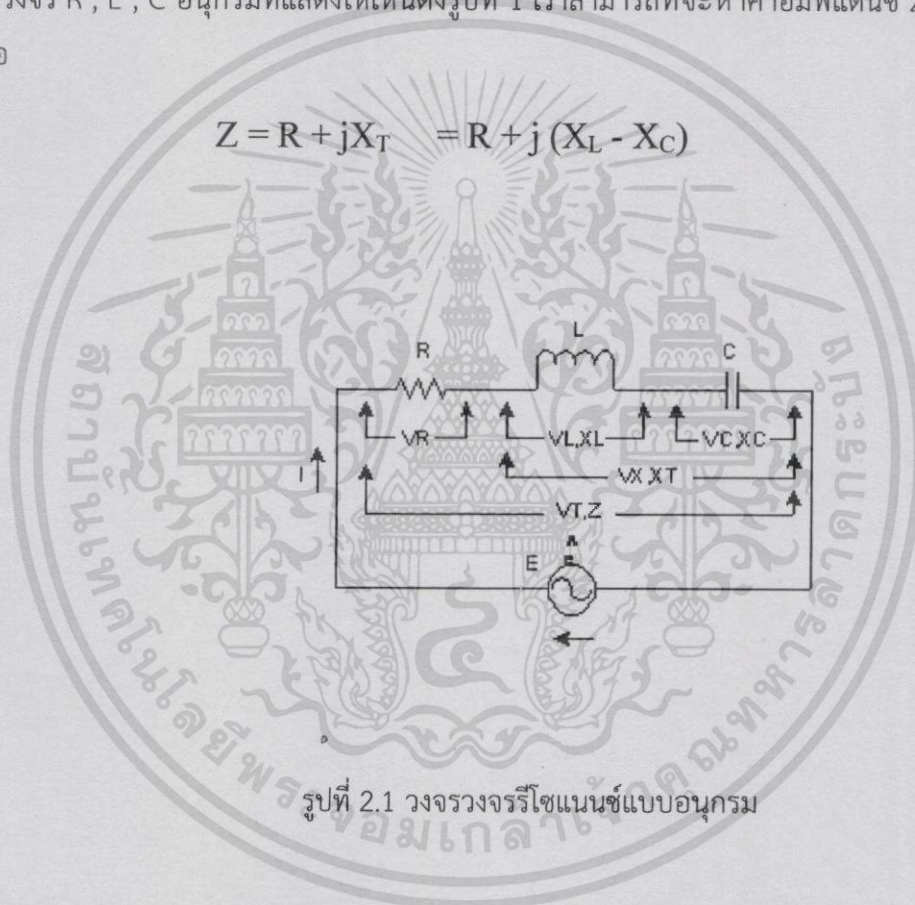
วัตถุทุกชนิดจะมีความถี่ธรรมชาติ(Resonant Frequency) มากกว่า 1 ความถี่โดยความถี่ Resonance นั้นอาจอยู่นอกเหนือ จาก Spectrum ที่เราได้ยินซึ่งการนำปรากฏการณ์ Resonance มาใช้ประโยชน์ที่เกี่ยวกับเสียงนั้นมีอยู่มากมายเช่นบรรดาเครื่องดนตรีประเภทเครื่องสาย (Strings) เป็นต้น อย่างโน้ตแต่ละตัวของกีตาร์เกิดจากการสั่นสะเทือนของสายและการสั่นสะเทือนตามตำแหน่งต่างๆของตัวกีตาร์เอง(ในที่นี้เรียกว่าตัวกีตาร์เป็น Resonator) ทำให้เรารู้สึกถึงความแตกต่างทางความดังที่ไม่เท่ากันของโน้ตต่างๆที่เล่นบนกีตาร์ตัวเดียวกันสำหรับเครื่องดนตรีประเภทลมนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเครื่องดนตรีเป็น Resonator เพราะสามารถสร้างตัวโน้ตได้จากการ “กด” ปุ่มต่างๆ ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมความยาว

ภายในตัวเครื่องดนตรีและสร้างแรงสั่นสะเทือนหรือพลังงานจาก Mouthpiece ดังนั้นสามารถพูดได้อย่างเต็มปากว่าเครื่องดนตรีทุกชนิดล้วนอาศัยปรากฏการณ์ Resonance เพื่อสร้างเอกลักษณ์เสียงของตัวเอง และถ้าหลักการของ Resonance มาใช้ในระบบเสียงแล้วจะพบว่ามันคือพฤติกรรมอย่างหนึ่งของเสียงโดยตรง เราสามารถพบเจอปรากฏการณ์นี้ได้จากห้องหรือสถานที่ที่ปิด, กรวย, ดอกลำโพง, โดอะแฟรม ไมโครโฟน, วอยซ์ลำโพง, ตู้ลำโพง, ปากฮอรรวมไปถึงเครื่องดนตรีไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

วงจร R, L, C อนุกรมที่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 1 เราสามารถที่จะหาค่าอิมพีแดนซ์ Z ของวงจรได้ดังนี้คือ

$$Z = R + jX_T = R + j(X_L - X_C) \quad (1)$$



รูปที่ 2.1 วงจรวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

ลักษณะสมบัติของวงจรรีโซแนนซ์อนุกรม เราสามารถที่จะพิจารณาได้จากสมการกล่าวคือในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์นั้นค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของวงจรจะเท่ากับหนึ่งหรือวงจรจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้นส่วนค่ารีแอกแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไปเพราะฉะนั้นค่าอิมพีแดนซ์ Z ของวงจรจะเท่ากับค่าของความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้น นั่นคือ  $Z = R$

$$X_T = j(X_L - X_C) = 0 \quad \text{หรือ} \quad X_L = X_C \quad (2)$$

$$\text{หรือ } 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_r^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

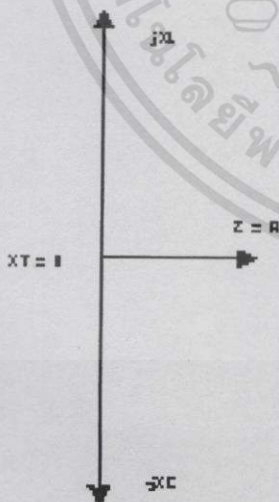
ในที่นี้  $f_r$  = ความถี่รีโซแนนซ์ (Hz)

$L$  = อินдукแตนซ์ (H)

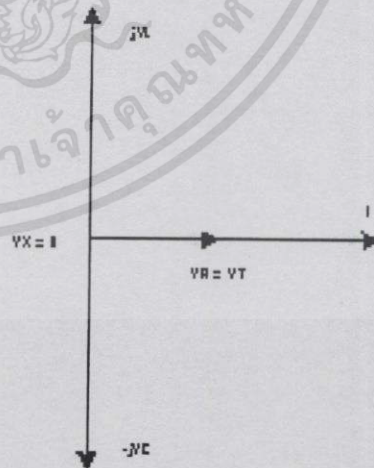
$C$  = คาปาซิแตนซ์ (F)

ในรูปที่ 2.2(ก) แสดงให้เห็นถึงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร  $R, L, C$  ที่ต่อแบบอนุกรมในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม  $L$  คือ  $jV_L$  และแรงดันตกคร่อม  $C$  คือ  $-jV_C$  จะมีค่าเท่ากัน และมีทิศทางตรงข้ามกันด้วย เพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรคือแรงดัน  $V_X$  จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $R$  คือแรงดัน  $V_R$  มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมทั้งหมดของวงจรคือแรงดัน  $V_T$

ส่วนในรูปที่ 2.2(ข) แสดงให้เห็นถึงอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของวงจร  $R, L, C$  ที่ต่อแบบอนุกรมในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณค่าอินдукติฟรีแอคแตนซ์  $jX_L$  และคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์  $-jX_C$  ที่เกิดขึ้นในวงจรจะมีค่าเท่ากันและมีทิศทางตรงข้ามกันด้วยเพราะฉะนั้นจึงทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ทั้งหมดของวงจรคือแรงดัน  $X_T$  จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นเพราะค่ารีแอคแตนซ์ทั้งหมดของวงจรหักล้างกันหมดไปและทำให้ความต้านทาน  $R$  ภายในวงจร มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์  $Z$  ของวงจร



รูปที่ 2.2ก



รูปที่ 2.2ข

### 2.4.1.1 ควอลิตีแฟคเตอร์ Q ของวงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

ค่าควอลิตีแฟคเตอร์ Q ของวงจรมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ถูกเก็บเอาไว้ต่อพลังงานที่ถูกใช้ไปสำหรับวงจร R, L, C อนุกรมค่าของ Q จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ต่อค่าความต้านทานและในวงจรรีโซแนนซ์อนุกรมพลังงานที่ถูกเก็บเอาไว้ที่อินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์จะสลับที่กันตลอดเวลา เพราะฉะนั้นในขณะเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ค่าของ Q จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่ารีแอกแตนซ์ทั้งสองต่อค่าของความต้านทานนั้นคือ

$$Q_r = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (6)$$

$$\text{หรือ} \quad X_L = X_C = Q_r R = Q_r Z \quad (7)$$

จากสมการเราสามารถที่จะเขียนใหม่ในรูปของแรงดันได้ดังนี้คือ

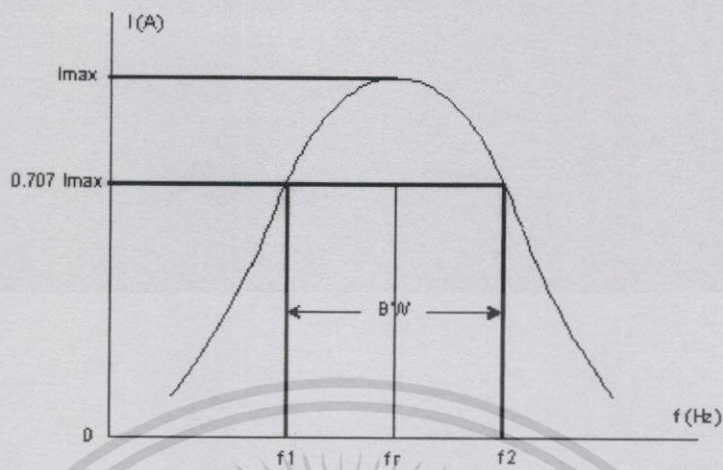
$$Q_r = \frac{V_L}{V_T} = \frac{V_C}{V_T} \quad (8)$$

$$\text{หรือ} \quad V_L = V_C = Q_r V_T \quad (9)$$

ปกติการออกแบบวงจรรีโซแนนซ์ที่ใช้ในทางปฏิบัติจะต้องให้ Q, มีค่ามากกว่า 1 เสมอเพราะฉะนั้นในวงจรรีโซแนนซ์อนุกรมทุกๆไปแล้วค่าของแรงดัน  $V_C$  และ  $V_L$  จะมีค่ามากกว่า  $V_T$  เสมอ

### 2.4.1.2 แบบวิดิธของวงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

แบบวิดิธของวงจรรีโซแนนซ์อนุกรมหมายถึงแถบความถี่จากจุดความถี่  $f_2$  ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟทางด้านความถี่สูงที่ทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าเพียงครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมายังจุดความถี่  $f_1$  ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟทางด้านความถี่ต่ำที่ทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าเพียงครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นเดียวกันและณ จุดความถี่  $f_2$  กับ  $f_1$  ดังกล่าวนี้อาจได้กระแส  $I$  ที่ไหลในวงจรมีค่าเท่ากับ  $0.707 I_{\max}$  ด้วย



รูปที่ 2.3 แบนวิดธ์วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

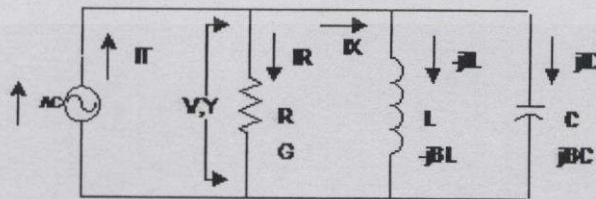
$$BW = \frac{R}{2\pi L} = \frac{F_r}{Q_r} \tag{10}$$

ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรคือ \$Q\_r\$ ยังชี้ให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของเคอร์ฟตามรูปด้วยกล่าวคือ ถ้า \$Q\_r\$ มีค่าสูงเคอร์ฟที่ได้จะแคบลงทำให้ความถี่แบนวิดธ์หรือแบนวิดธ์มีค่าน้อยลง แต่ถ้าค่า \$Q\_r\$ มีค่าต่ำเคอร์ฟที่ได้จะกว้างมากขึ้นและทำให้ความถี่แบนวิดธ์ที่ได้มีค่ามากขึ้นด้วย

2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์ขนาน

วงจร \$R, L, C\$ ขนานที่แสดงให้เห็ндังรูปที่ 4 เราสามารถที่จะหาค่าแอดมิแตนซ์ \$Y\$ ของวงจรได้ ดังนี้คือ

$$Y = G + jB_T = G + j(B_C - B_L) \tag{11}$$



รูปที่ 2.4 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติของวงจรรีโซแนนซ์ขนานเราสามารถที่จะพิจารณาได้จากสมการกล่าวคือในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์นั้นค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรจะเท่ากับหนึ่งหรือวงจรจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้นส่วนค่ารีแอกแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไปเพราะฉะนั้นค่าอิมพีแดนซ์ Z ของวงจรจะเท่ากับค่าของความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้นนั่นคือ

$$Y = G \quad (12)$$

$$B_T = j(B_C - B_L) = 0 \quad \text{หรือ} \quad B_C = B_L \quad (13)$$

$$\text{หรือ} \quad 2\pi f_r C = \frac{1}{2\pi f_r L} \quad (14)$$

$$f_r^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC} \quad (15)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (16)$$

ในที่นี้  $f_r$  = ความถี่รีโซแนนซ์ (Hz)

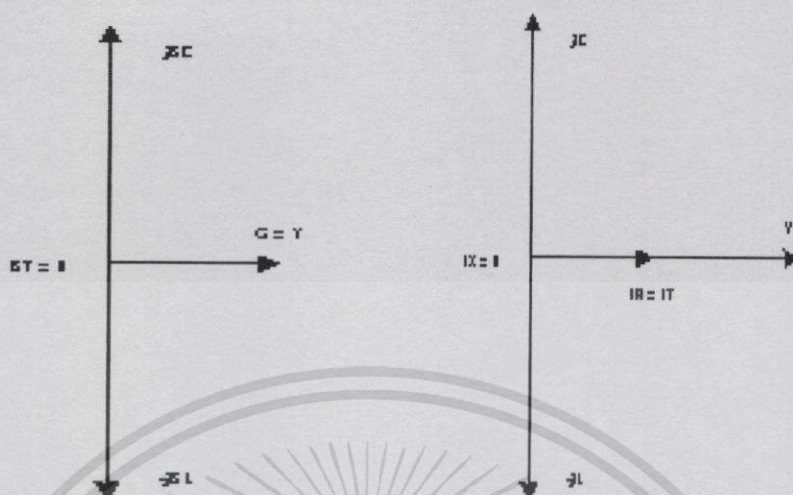
L = อินдукแตนซ์ (H)

C = คาปาซิแตนซ์ (F)

ในรูปที่ 2.5 (ก) แสดงให้เห็นถึงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร R, L, C ที่ต่อแบบขนานในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ นั้นจะได้ค่า  $jI_C = -jI_L$  และมีทิศทางตรงข้ามกันด้วยเพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมค่าซัซเซพแดนซ์ของวงจรคือ  $I_X$  จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงทำให้กระแสที่ไหลผ่าน R คือ  $I_R$  มีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลทั้งหมดของวงจรคือ  $I_T$

ส่วนในรูปที่ 2.5 (ข) แสดงให้เห็นถึงแอดมิตแตนซ์ไดอะแกรมของวงจร R, L, C ที่ต่อแบบขนานในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถที่จะเขียนแอดมิตแตนซ์ไดอะแกรมให้อยู่ในรูปของสามเหลี่ยมได้ ทั้งนี้เพราะค่าซัซเซพแดนซ์ของวงจรเกิดหักล้างกันหมดไป

$B_T = j(B_C - B_L) = 0$  จึงเหลือแต่ความนำ G เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงทำให้  $Y = G$



รูปที่ 2.5 ก

รูปที่ 2.5 ข

#### 2.4.2.1 ค่าควอลิตีแฟคเตอร์ $Q$ ของวงจรรีโซแนนซ์ขนาน

ค่าควอลิตีแฟคเตอร์  $Q$  ของวงจรมายังถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ถูกเก็บเอาไว้ต่อพลังงานที่ถูกใช้ไปสำหรับวงจร  $R, L, C$  นุกรมค่าของ  $Q$  จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างคาร์แอกแตนซ์ต่อค่าความต้านทานและในวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน พลังงานที่ถูกเก็บเอาไว้ที่อินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ จะสลับที่กันตลอดเวลาเพราะฉะนั้นในขณะเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ค่าของ  $Q$  จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าซัซเซพแตนซ์ทั้งสองต่อค่าของความนำของวงจร นั่นคือ

$$Q_r = \frac{B_C}{G} = \frac{B_L}{G} \quad (17)$$

$$\text{หรือ } B_C = B_L = Q_r G = Q_r Y \quad (18)$$

จากสมการ เราสามารถที่จะเขียนใหม่ในรูปของกระแสได้ดังนี้คือ

$$Q_r = \frac{I_C}{I_R} = \frac{I_L}{I_R} \quad (19)$$

$$\text{หรือ } I_C = I_L = Q_r I_R = Q_r I_T \quad (20)$$

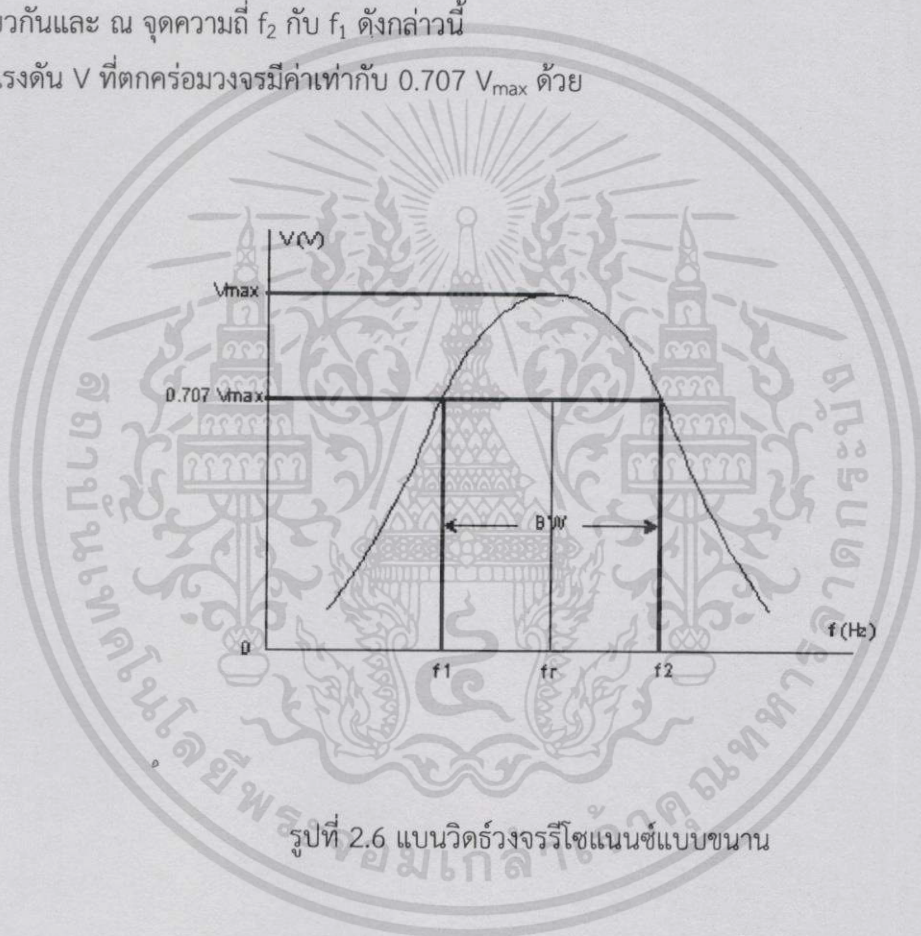
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติค่า  $Q_r$  ที่ใช้กันในวงจรโซ่แนชชันานในทางปฏิบัติจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ เพราะฉะนั้นในวงจรโซ่แนชชันานทั่วไปแล้ว ค่าของกระแส  $I_C$  และ  $I_L$  จะมีค่ามากกว่า  $I_T$  เสมอ

#### 2.4.2.2 แบนวิดธ์ของวงจรรโซ่แนชชันาน

แบนวิดธ์ของวงจรรโซ่แนชชันานหมายถึงแถบความถี่จากจุดความถี่  $f_2$  ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟทางด้านความถี่สูงที่ทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าเพียงครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมายังจุดความถี่  $f_1$  ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟทางด้านความถี่ต่ำที่ทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าเพียงครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นเดียวกันและ ณ จุดความถี่  $f_2$  กับ  $f_1$  ดังกล่าวนี้

จะได้แรงดัน  $V$  ที่ตกคร่อมวงจรมีค่าเท่ากับ  $0.707 V_{max}$  ด้วย



รูปที่ 2.6 แบนวิดธ์วงจรรโซ่แนชชันาน

$$\text{ซึ่ง } BW = \frac{R}{2\pi L} = \frac{F_r}{Q_r} \quad (21)$$

ค่าคออลลิตีแฟคเตอร์ของวงจรรคือ  $Q_r$  ยังชี้ให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของเคอร์ฟด้วยกล่าวคือ ถ้า  $Q_r$  มีค่าสูงเคอร์ฟที่ได้จะแคบลงทำให้ความถี่แบนวิดธ์หรือแบนวิดธ์มีค่าน้อยลงแต่ถ้าค่า  $Q_r$  มีค่าต่ำเคอร์ฟที่ได้จะกว้างมากขึ้นและทำให้ความถี่แบนวิดธ์ที่ได้มีค่ามากขึ้นด้วย

## 2.5 Pulse Width Modulation

PWM จะใช้หลักการที่ส่งค่าแบบดิจิตอลคือ 0-1 ด้วยความถี่ค่าหนึ่ง แต่จะส่งค่าให้มีสัญญาณสูง (1)สลับกับสัญญาณต่ำ(0) โดยให้ระยะเวลาของแต่ละชนิดสัญญาณต่างกัน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณทั้งหมดออกมาเป็นค่าที่ต้องการนั่นเอง เช่น ถ้าต้องการส่งค่าที่มีระยะสัญญาณสูงและต่ำเท่ากัน ก็จะได้ค่าเป็น 2.5 โวลต์ ถ้าให้ค่าสัญญาณสูงยาวกว่า ก็จะได้ค่ามากกว่า 2.5 และในทำนองเดียวกันถ้าให้ค่าสัญญาณต่ำยาวกว่า ก็จะได้ค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 2.5 นั่นเอง Arduino สามารถรับค่าอนาล็อกได้ 255 ระดับ ดังนั้นหมายความว่าค่าสัญญาณ 0 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ก็จะสามารถแสดงได้เป็น 0 ถึง 255 ในสัญญาณดิจิตอล โดยสามารถใช้หลักบัญญัติไตรยางค์ สามารถเปรียบเทียบค่าได้เลย ในการใช้งาน PWM จะต้องเลือกขาที่เขียนว่าเป็น PWM ของบอร์ด Arduino เท่านั้น

## 2.6 การสร้างสัญญาณ (Oscillator)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตสัญญาณออกมาซ้ำๆกันคลื่นไฟฟ้าที่ออกมาส่วนใหญ่จะเป็น sine wave และคลื่นรูปสี่เหลี่ยม Oscillators มีแหล่งจ่ายไฟเป็นกระแสตรง (DC) มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณดังกล่าวเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์,สัญญาณนาฬิกาที่ควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์ทุกชนิด

Oscillators แบ่งตามลักษณะของความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต ได้แก่:

Oscillator เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (audio frequency) ผลิตความถี่อยู่ในช่วงเสียงประมาณ 16-20 kHz.

Oscillator RF ผลิตสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ช่วงประมาณ 100 kHz ถึง 100 GHz.

Oscillator ความถี่ต่ำ (LFO) สร้างสัญญาณความถี่ต่ำกว่า 20 Hz คำนี้มักใช้ในด้านการสังเคราะห์เสียง จะแตกต่างจาก oscillator เสียง Oscillators เพื่อผลิตเอาต์พุต AC พลังงานสูงจากไฟกระแสตรงมักจะเรียกว่าอินเวอร์เตอร์

### 2.6.1 หลักการทำงานของออสซิลเลเตอร์

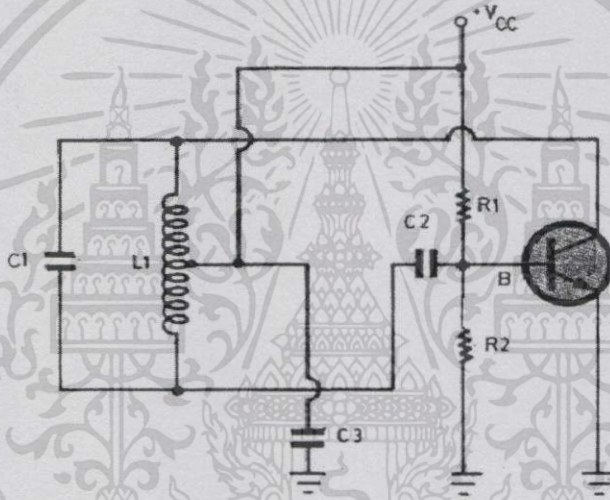
หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์วงจรออสซิลเลเตอร์ก็คือวงจรขยายชนิดหนึ่งนั่นเองแต่เป็นวงจรขยายชนิดป้อนกลับและที่สำคัญคือการป้อนกลับของสัญญาณจะมีได้ป้อนกลับในลักษณะลบเหมือนในวงจรขยายป้อนกลับ การป้อนกลับคือการพิจารณาในรูปของเฟสกลับการป้อนกลับสัญญาณป้อนกลับจากเอาต์พุตจะกลับเฟส 180 องศาแล้วป้อนผ่านเข้ามาหาอินพุตใหม่ดังนั้นสัญญาณที่เข้ามาจะมีทิศทางเสริมกับสัญญาณป้อนกลับซึ่งถ้าเฟสที่ป้อนกลับเข้ามาไม่ตรงกับวงจรขยายก็จะไม่เกิดการออสซิลเลทการออสซิลเลทหรือการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตจากค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุดมักจะเกิดการเปลี่ยนในลักษณะคลื่นรูปไซน์ความถี่ของลูกคลื่นสามารถคำนวณได้จาก ค่าคงตัวของอุปกรณ์ต่างๆในวงจรในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสซิลเลเตอร์ทั่วไปที่ใช้งานกันอยู่จะมีออสซิลเลทได้ด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปแม้แต่น้อยเพราะสัญญาณที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลทในขณะเริ่มต้นคือสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในอุปกรณ์นั้นแล้วและการออสซิลเลทจะเกิดขึ้นตลอดเวลาเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟตรงเลี้ยงวงจร

วงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปมักมีการออสซิลเลทที่ความถี่เดียว ทั้งนี้เพราะวงจรป้อนกลับที่วงจรจากเอาต์พุตมายังอินพุตกับเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์จำพวก R L และ C ซึ่งเป็นทฤษฎีที่แน่นอนว่าอุปกรณ์ L และ C ย่อมให้ผลทางด้านเฟส นั่นคือจะมีความถี่ที่เป็นผลทำให้เฟสที่ได้กลับมาเสริมกับอินพุตเกิดการออสซิลเลท

วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ทรานซิสเตอร์แสดงให้เห็นดังรูป



รูปที่ 2.7 วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น

วงจรออสซิลเลเตอร์ตามรูป ที่ 2.7 มีอีกชื่อหนึ่งว่า วงจรฮาร์ทลีย์ออสซิลเลเตอร์ การทำงานของวงจรอาศัย หลักการป้อนกลับด้วยวงจรรีโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C1 และตัวเหนี่ยวนา L1 สัญญาณป้อนกลับเอาต์พุต ทางขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะป้อนกลับผ่านวงจรจูน เมื่อกลับเฟส 180 องศาป้อนเข้ามาทางเบสของ ทรานซิสเตอร์สำหรับทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R1 และ R2 จะเป็นตัวไบแอสทรานซิสเตอร์ให้ทำงานในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณ ส่วนตัวเก็บประจุ C2 เปรียบเสมือนเป็นตัวคัปปลิ่งสัญญาณเข้ามาทางอินพุตทันที วงจรก็จะออสซิลเลทได้

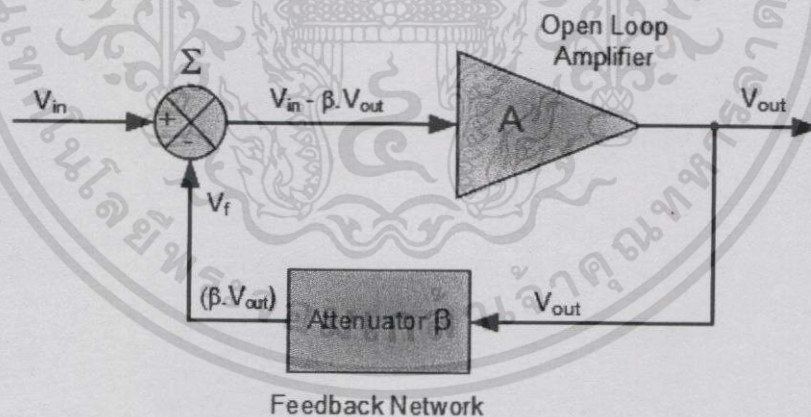
การทำงานในแต่ละรอบของการออสซิลเลทอธิบายได้ดังนี้ ในขณะเริ่มแรกของการออสซิลเลทจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นผลป้อนกลับมาทางด้านอินพุตทางเบสกระตุ้นขาเบส โดยถ้ากระแส คอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นทางค่ามากจะทำ ให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์ลดลง การป้อนกลับจะ

กระตุ้นเข้ามาที่เบสด้วยค่าแรงดันน้อยลงเป็นผลทำให้กระแสลดลงและแรงดันคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะสูงขึ้นเป็นเช่นนี้เรื่อยไป ตัวเก็บประจุ C3 ในรูป ที่ 2.7 เป็นทางผ่าน (bypass) ของสัญญาณไฟสลับ และในทำนองเดียวกันก็จะเป็นตัวกันแรงดันไฟตรงเพื่อไม่ให้ลัดลงกราวด์ ความถี่ของวงจรได้จาก ความถี่รีโซแนนซ์ของ L1 และ C1 ซึ่งเราสามารถปรับ ค่าความถี่รีโซแนนซ์ด้วยการปรับค่า L1 และ C1 นั้นเอง

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (22)$$

### 2.6.2 Feedback Oscillator

รูปแบบที่พบมากที่สุดของ Oscillator เชิงเส้นคือวงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เช่นแอมป์ทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์ที่เชื่อมต่อกับ feedback loop ที่มีเอาต์พุตป้อนกลับเป็นอินพุตโดยผ่านทางตัวกรองเฉพาะความถี่เพื่อให้เป็น positive feedback เมื่อเริ่มจ่ายไฟไปให้วงจรขยายสัญญาณ สัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเริ่มให้วงจรออสซิลเลเตอร์ทำงานสัญญาณรบกวนดังกล่าวเดินทางเป็นวงรอบในวงจรมีการขยายกำลังและถูกกรองเฉพาะความถี่ที่ต้องการออกมาเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียว



รูปที่ 2.8 วงจรพื้นฐาน Feedback Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรการคำนวณอัตราขยายของวงจร Feedback Oscillator

1. อัตราขยายปราศจากการป้อนกลับ

Oscillator Gain Without Feedback

$$\text{Gain, } A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (23)$$

$A_v =$  open loop voltage gain

$$A_v * V_{in} = V_{out} \quad (24)$$

2. อัตราขยายที่มีการป้อนกลับ

$$A_v(V_{in} - \beta V_{out}) = V_{out} \quad \beta \text{ is the feedback fraction} \quad (25)$$

$$A_v V_{in} - A_v \beta V_{out} = V_{out} \quad A\beta = \text{the loop gain} \quad (26)$$

$$A_v V_{in} = V_{out}(1 + A\beta) \quad 1 + A\beta = \text{feedback factor} \quad (27)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G_v = \frac{A}{1 + A\beta} \quad G_v = \text{the closed loop gain} \quad (28)$$

สูตรการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency)

$$X_L = 2\pi fL \quad \text{and} \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (29)$$

at resonance :  $X_L = X_C$

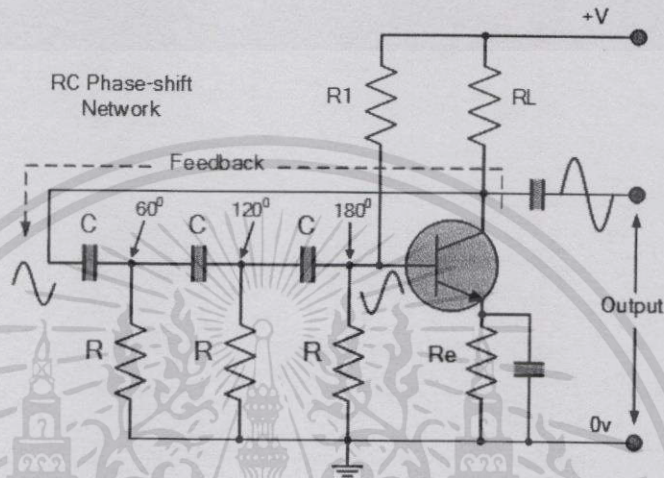
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (30)$$

$$f = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{(2\pi)^2 LC}} \quad (31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Feedback สามารถจำแนกตามชนิดของตัวกรองเลือกความถี่ ดังนี้

- วงจร RC ตัวกรองประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ RC oscillator ส่วนใหญ่จะใช้ในการสร้างความถี่ต่ำเช่นในช่วงเสียงออดิโอ ประเภททั่วไปของวงจร RC ได้แก่ Phase-shifted Oscillator และ Wien Bridge Oscillator



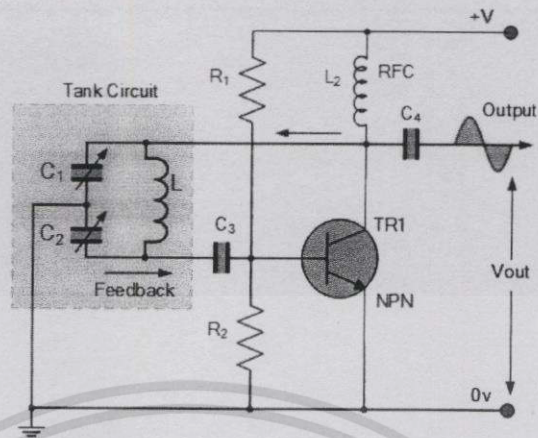
รูปที่ 2.9 วงจรพื้นฐาน RC Phase-shifted Oscillator

- วงจร LC เป็นวงจรกรองแบบปรับความถี่ได้ ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ(L) และตัวเก็บประจุ(C) เชื่อมต่อกันได้ ประจุไฟฟ้าจะไหลไปมาระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นวงจรกรองปรับความถี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่จะสั่นที่ความถี่รีโซแนนซ์ (การสั่นพ้อง, รีโซแนนซ์, ปรากฏการณ์เมื่อระบบถูกทำให้สั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบเองแล้ว การสั่นนั้นจะสั่นได้รุนแรงหรือมีช่วงกวัดงของการสั่นกว้างมากที่สุด)ของ L และ C นั้น มีการสูญเสียเล็กน้อยในวงจรดังกล่าว แต่ วงจรขยายสัญญาณสามารถชดเชยการสูญเสียเหล่านั้นได้และจ่ายพลังงานเอาต์พุตเป็นสัญญาณออกมา Oscillators LC มักจะสร้างความถี่วิทยุใช้กับงานที่ต้องมีการปรับความถี่เช่นในเครื่องสร้างสัญญาณ ในเครื่องส่งสัญญาณวิทยุและการบริหารสถานีในเครื่องรับวิทยุโดยทั่วไปจะใช้วงจร LC จะได้แก่ Hartley, Colpitts and Clapp

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (32)$$

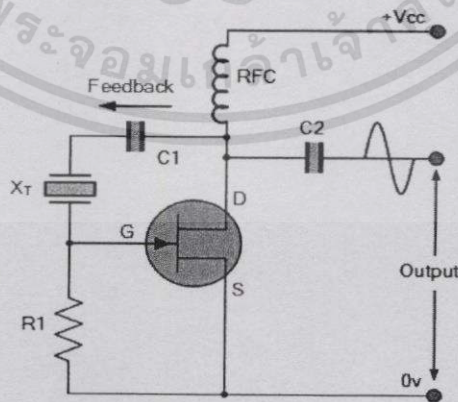
$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐาน LC Colpitts Oscillator

- วงจรคริสตัล ใช้ผลึกคริสตัลในการสร้างความถี่คริสตัลจะสั้นด้วยแรงกลทำตัวเหมือนตัวรีโซเนเตอร์ความถี่ของการสั่นสะเทือนกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ผลึกคริสตัลมีค่า Q-factor สูงมากและความมั่นคงด้านอุณหภูมิดีกว่า LC หรือ RC Oscillators จึงถูกนำมาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณวิทยุมากที่สุดและเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในคอมพิวเตอร์และนาฬิกาควอตซ์ Oscillators คริสตัลมักจะใช้วงจรเดียวกับ Oscillators LC แต่ใช้คริสตัลแทนที่วงจรการปรับความถี่วงจรเพียร์ซเป็นที่นิยมใช้ ผลึกควอตซ์มีข้อจำกัดโดยทั่วไปที่ความถี่ 30 MHz หรือต่ำกว่าคลื่นพื้นผิว (SAW) เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งของ piezoelectric resonator ที่จะทำได้ความถี่ที่สูงขึ้นมากออสซิลเลเตอร์ดังกล่าวจะใช้ในการใช้งานเฉพาะที่จำเป็นต้องมีการอ้างอิงความถี่สูงเช่นในโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 2.11 วงจร Quartz Crystal Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้งานใช้ใน Oscillators และความถี่สูงสุดโดยประมาณ

ตาราง 2.2 ตารางอุปกรณ์ในย่านความถี่ต่างๆ

อุปกรณ์	ความถี่
Triode vacuum tube	1 GHz
Bipolar transistor (BJT)	20 GHz
Heterojunction Bipolar Transistor (HBT)	50 GHz
Metal Semiconductor Field Effect Transistor (MESFET)	100 GHz
High Electron Mobility Transistor (HEMT)	200 GHz
Gunn diode, fundamental mode	100 GHz
Gunn diode, harmonic mode	200 GHz
IMPATT diode	300 GHz
Klystron tube	200 GHz
Magnetron tube	100 GHz
Gyrotron tube	300 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

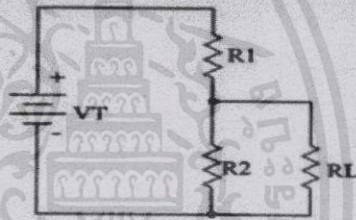
## 2.7 การแบ่งแรงดัน (Voltage Dividers)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) หมายถึงวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่ออนุกรม (Series) อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power Supply) ซึ่งค่าความต้านทานในวงจรจะทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าในวงจรโดยทั่ว ๆ ไปแล้ววงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าพัฒนามาจากกฎของโอห์มเพียงแต่การคิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวใช้วิธีของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าจะรวดเร็วและสะดวกกว่ากฎของโอห์ม วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

1. วงจรแบ่งแรงดันที่ไม่มีโหลด (Unloaded Voltage Divider)
2. วงจรแบ่งแรงดันที่มีโหลด (Load Voltage Divider)



รูปที่ 2.12 วงจรแบ่งแรงดันที่ไม่มีโหลด

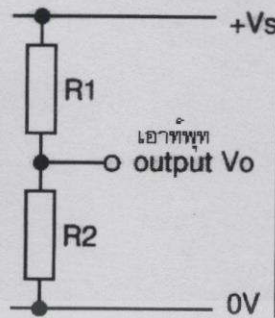


รูปที่ 2.13 วงจรแบ่งแรงดันที่มีโหลด

### 2.7.1 การแบ่งแรงดัน (การแบ่งความต่างศักย์)

วงจรแบ่งแรงดันประกอบด้วยความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ต่ออนุกรมคร่อมแหล่งจ่ายไฟ  $V_s$  แรงดันจากแหล่งจ่ายถูกแบ่งระหว่างความต้านทานทั้งสอง ให้แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ซึ่งก็คือแรงดันคร่อม  $R_2$  ค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดค่า  $R_2$  กับ  $R_1$

$$V_o = V_s \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (32)$$



รูปที่ 2.14 วงจรแบ่งแรงดัน

- หาก R2 มีค่าน้อยกว่า R1 มาก,  $V_o$  จะมีค่าน้อย (ต่ำมากใกล้ 0V) (เพราะแรงดันส่วนใหญ่อยู่ที่ตกคร่อม R1)
- หาก R2 มีค่าเท่ากับ R1,  $V_o$  จะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ  $V_s$  (เพราะแรงดันจะถูกแบ่งเท่าๆกันระหว่าง R1 และ R2)
- หาก R2 มีค่ามากกว่า R1 มาก,  $V_o$  จะมีค่ามาก (สูงมากใกล้  $V_s$ ) (เพราะแรงดันส่วนใหญ่อยู่ที่ตกคร่อม R2)

หากที่ต้องการค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  อย่างละเอียดสามารถใช้อุปกรณ์ของโอห์มมบวกับความรู้ทางคณิตศาสตร์ใช้สูตรคำนวณหาค่า  $V_o$  สูตรและกฎการประมาณนี้สมมุติว่ากระแสไหลที่เอาต์พุตน้อยมาก และค่า  $V_o$  จะถูกต้องจริงหากต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่มีความต้านทานสูงเช่น โวลท์มิเตอร์ หรือ อินพุทไอซี หากเอาต์พุตถูกต่อเข้ากับ ทรานซิสเตอร์  $V_o$  จะไม่สามารถสูงกว่า 0.7V เพราะรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ของ ทรานซิสเตอร์มีลักษณะการทำงานเหมือนไดโอด

## 2.8 การมอดูเลชัน (Modulation)

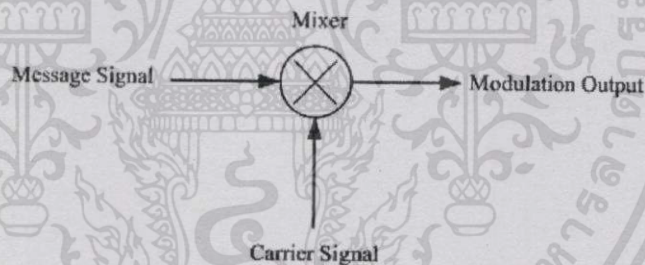
การมอดูเลชัน (Modulation) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยให้ลักษณะต่างๆของสัญญาณเป็นตัวแทนของข้อมูลเพื่อความเข้าใจที่ตรงกันระหว่างผู้ส่งสารและผู้รับสาร ตัวอย่างเช่น เมื่อผู้ส่งสารส่งลักษณะสัญญาณแบบหนึ่งแทนตัวอักษร A เมื่อผู้รับสารได้รับสัญญาณและสังเกตได้ว่าเป็นสัญญาณแทนตัวอักษร A ผู้รับสารก็จะเข้าใจว่าผู้ส่งสารได้ส่งอักษร A มาหาเขาเป็นต้น

ในระบบวิทยุกระจายเสียงกระบวนการมอดูเลตจะใช้คลื่นพาห้ความถี่สูงแล้วทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสัญญาณข่าวสารสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. การมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM) หรือเอเอ็ม
2. การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation: FM) หรือเอฟเอ็ม
3. การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation: PM) หรือพีเอ็ม

### 2.8.1 องค์ประกอบของการมอดูเลต ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ

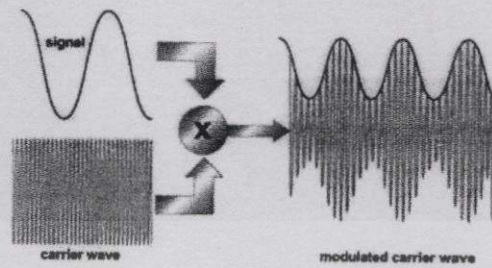
1. สัญญาณข่าวสาร (Message Frequency:  $f_m$ ) อาจจะเป็นสัญญาณเสียงสัญญาณภาพและสัญญาณข้อมูลต่างๆ
2. สัญญาณคลื่นพาห้ (Carrier Frequency:  $f_c$ ) หรือเรียกว่าคลื่นพาห้เป็นสัญญาณความถี่สูงที่จะนำพาสัญญาณข่าวสารให้แพร่กระจายออกไปในอากาศ
3. วงจรผสมสัญญาณ (Modulator) ทำหน้าที่ผสมสัญญาณข่าวสารกับสัญญาณคลื่นพาห้เข้าด้วยกันซึ่งจะกลายเป็นสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF Carrier)



รูปที่ 2.15 วงจรผสมสัญญาณ

### 2.8.2 การมอดูเลชันทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM)

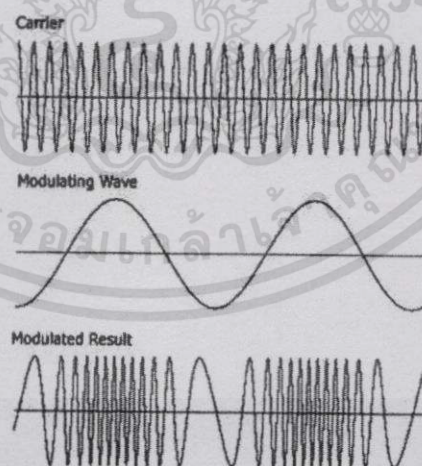
การมอดูเลตทางแอมพลิจูดหรือทางความสูงคือการนำสัญญาณเสียงหรือสัญญาณข่าวสารไปผสมกับคลื่นพาห้ความถี่สูงโดยที่สัญญาณเสียงจะไปควบคุมให้ระดับความสูง(แอมพลิจูด)ของคลื่นพาห้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นพาห้ยังคงเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.16 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด

### 2.8.3 การมอดูเลชันทางความถี่ (Frequency Modulation หรือ FM)

สัญญาณเอฟเอ็มที่มอดูเลตแล้วจะมีแอมพลิจูดคงที่แต่ความถี่ของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลข่าวสารซึ่งการมอดูเลตทางความถี่จะให้คุณภาพที่ดีกว่าการมอดูเลตทางแอมพลิจูด(AM) แต่ระบบจะมีความซับซ้อนกว่า

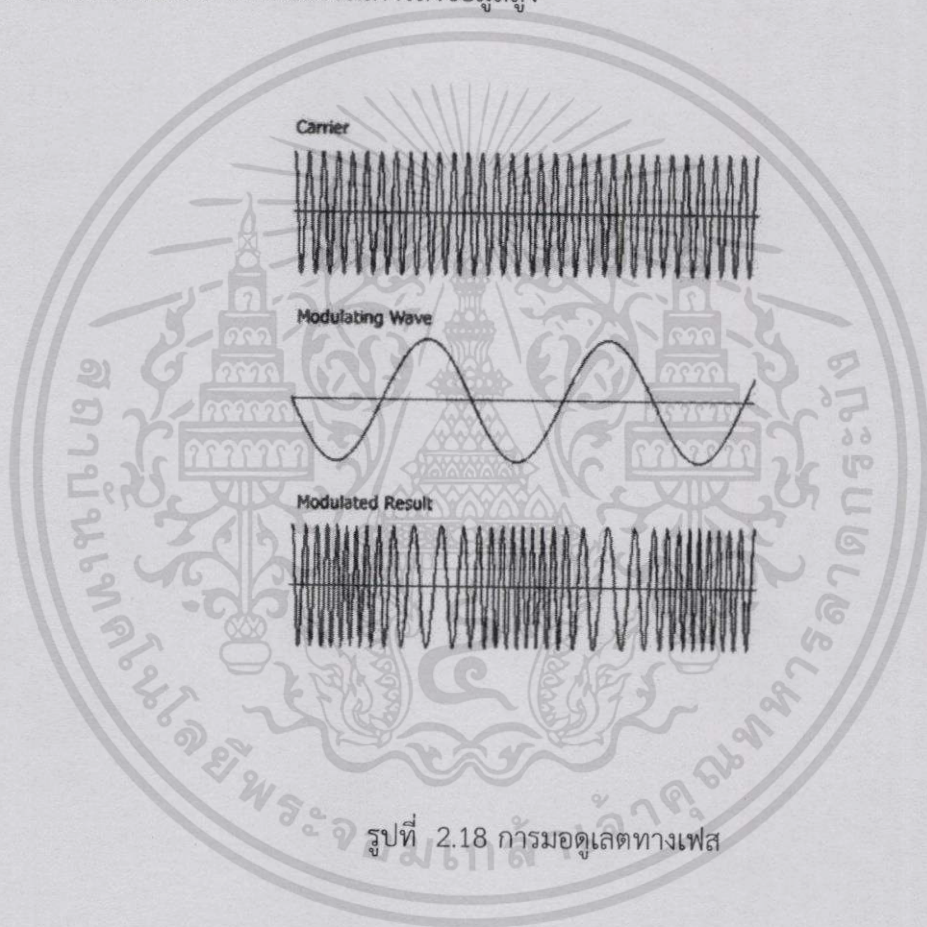


รูปที่ 2.17 การมอดูเลตทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.8.4 การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation หรือ PM)

การมอดูเลตแบบ PM จะให้ครีกรอบของสัญญาณเป็นมุม 180 องศาและเมื่อครบ 1 รอบจะเป็น 360 องศา สัญญาณมอดูเลตจะมีการเปลี่ยน (กลับ) มุมเฟสทุกครั้งที่มีมุมเฟสของสัญญาณข้อมูลต่างจากมุมเฟสของสัญญาณคลื่นพาห์เท่ากับ 180 องศาการมอดูเลตแบบ PM นิยมใช้ในการแพร่ภาพสีทางทีวีแต่การมอดูเลตแบบ AM-FM นิยมใช้ในการส่งกระจายเสียงวิทยุการมอดูเลตแบบ PM เป็นวิธีการที่ดีแต่วงจรค่อนข้างจะซับซ้อนจึงไม่นิยมใช้ส่งสัญญาณข้อมูลอนาล็อกมักจะนำมาใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลคอมพิวเตอร์ที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลสูง



รูปที่ 2.18 การมอดูเลตทางเฟส

#### 2.9 วงจร Demodulator

การดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude Demodulations) แบ่งเป็น

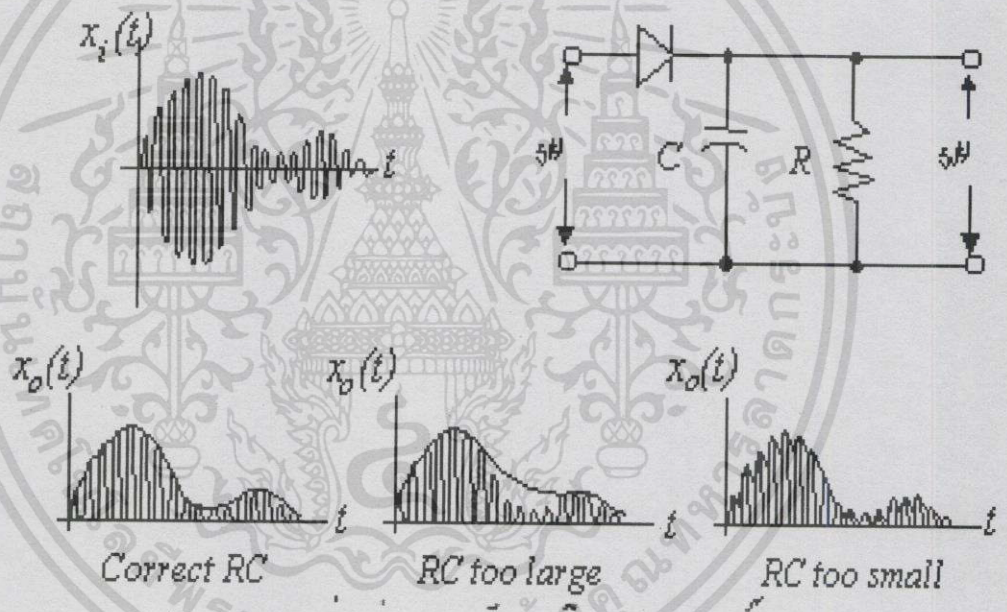
1. เอ็นเวลโลปดีเทคชันกล่าวถึง การดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดที่มีการส่งพาหะมาด้วย
2. ซิงโครนัสดีเทคชันกล่าวถึง การดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดโดยการคูณพาหะเข้ากับสัญญาณที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการที่ได้สัญญาณเดิมกลับคืนมาจากสัญญาณที่มอดูเลตเชิงขนาดนั้นทำได้ 2 แบบ คือ เอ็นเวลโลปดีเทคชัน (Envelope Detection) และ ซิงโครนัสดีเทคชัน (Synchronous Detection)

2.9.1 เอ็นเวลโลปดีเทคชัน

เป็นการกรองเอาเอ็นเวลโลปของสัญญาณ AM เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการสร้างวงจรมาดั่งแสดงในรูปสัญญาณที่มอดูเลตแล้วคือสัญญาณ RF เมื่อผ่านไดโอดแล้วจะถูกตัดเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นบวกเมื่อผ่านวงจร RC ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์แบบความถี่ต่ำผ่านสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นสัญญาณ baseband โดยที่ RC ต้องมีค่าเหมาะที่สมการดีเทคสัญญาณแบบนี้ใช้ได้กับการมอดูเลตแบบที่ส่งพหามาด้วยเท่านั้นคือ DSB-LC หรือสัญญาณ AM



รูปที่ 2.19 เอ็นเวลโลปดีเทคเตอร์

2.9.2 ซิงโครนัสดีเทคชัน

ถ้าไม่ได้ส่งพหามากับสัญญาณ RF ด้วยการจะได้สัญญาณเดิมกลับคืนมาต้องใช้การคูณสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเบสแบนด์ขบวนการนี้คล้ายกับการมอดูเลตสัญญาณอีกครั้งคือเมื่อคูณสัญญาณที่มอดูเลตแล้วด้วยพหะจะทำให้เกิดการย้ายความถี่ไปดั่งสมการเมื่อสัญญาณ DSB-SC ถูกคูณด้วยความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{DSB}(t)\text{Cos}\omega_c t = X(t)\text{Cos}^2\omega_c t \quad (34)$$

$$= \frac{X(t)}{2} + \frac{X(t)}{2}\text{Cos}2\omega_c t \quad (35)$$

ทำฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มจะได้

$$F\{X_{DSB}(t)\text{Cos}\omega_c t\} = \frac{X(\omega)}{2} + \frac{X(\omega+2\omega_c)}{4} + \frac{X(\omega-2\omega_c)}{4} \quad (36)$$

นั่นคือจะได้ค่า  $X(t)$  คืนมาส่วนสองเทอมหลังมีความถี่อยู่รอบๆความถี่ 2 ซึ่งจะถูกรองออกโดยง่ายแต่ถ้าสัญญาณที่นำไปคูณด้วยมีความถี่และเฟสต่างจะพาหะแล้วจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนขึ้นได้สมมติว่าสัญญาณมีความถี่ต่างไปเท่ากับและเฟสต่างไป สมการจะเป็น

$$X_{DSB}(t)\text{Cos}[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] = X(t)\text{Cos}\omega_c t\text{Cos}[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] \quad (37)$$

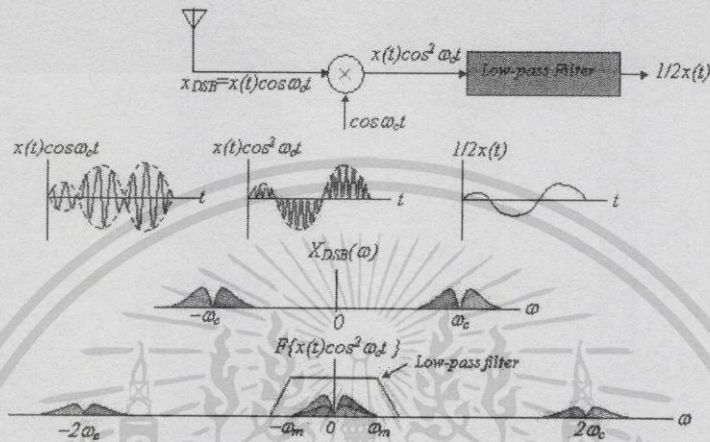
$$= \frac{X(t)\text{Cos}(\Delta\omega t + \theta_0)}{2} + \frac{X(t)\text{Cos}[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0]}{2} \quad (38)$$

แทนที่จะได้  $x(t)$  กลับคืนมาจะได้เป็น

$$X_{err}(t) = \frac{X(t)\text{Cos}(\Delta\omega t + \theta_0)}{2} \quad (39)$$

การจะได้สัญญาณ  $x(t)$  กลับคืนมาโดยไม่ผิดเพี้ยนสัญญาณที่จะนำไปคูณจะต้องมีความถี่และเฟสตรงกับพาหะซึ่งโครนัสตีเทคชัน (Synchronous Detection) เป็นการสร้างสัญญาณที่ซิงโครไนซ์กับพาหะ

นำไปคูณหรือผสม (mix) กับสัญญาณที่มอดูเลตแล้วเพื่อให้ได้สัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์คืนมาเนื่องจากการใช้สัญญาณที่เหมือนกับพาหะบางครั้งจึงเรียกว่า โคฮีเรนต์ดีเทคชัน (Coherent Detection)



รูปที่ 2.20 การดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC

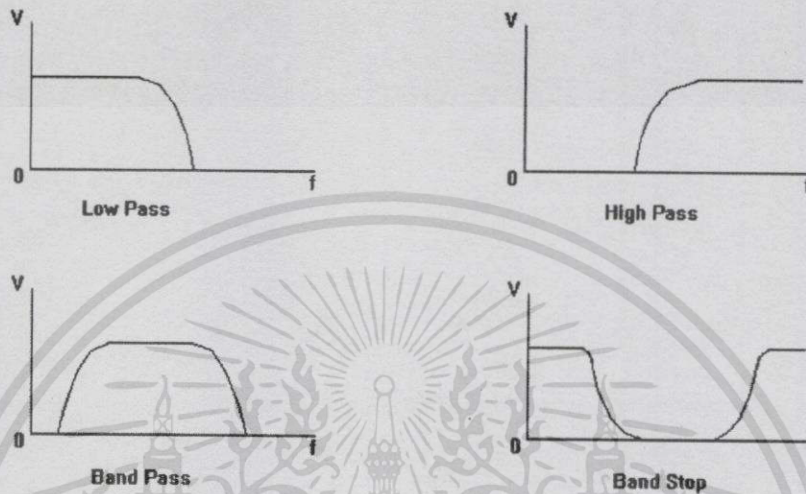
## 2.10 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่คือวงจรที่เลือกความถี่ให้ผ่านไปได้โดยใช้คุณสมบัติของ RLC ที่มีการตอบสนองต่อความถี่ต่างกัน วงจรกรองความถี่นิยมใช้งานวงจรของวิทย์ที่ใช้การตัดความถี่คลื่นพาห่ออกไปหรือใช้ในวงจรดีมอดูเลชันของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในวงจรเครื่องเสียงก็จะใช้เลือกความถี่ให้เหมาะสมกับลำโพงที่จะใช้งานหรือปรับแต่งความถี่ที่ผ่านได้เพื่อให้ระบบเสียงโดยรวมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่ แบ่งตามการตัดความถี่ได้ดังนี้

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) จะตัดความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดทิ้งไป (ความถี่ที่กำหนดจะถูกเรียกว่าความถี่ตัดผ่าน)
2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) จะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดทิ้งไปและจะตัดความถี่ที่กำหนดทิ้งไป
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) จะตัดความถี่ให้ผ่านไปได้ช่วงหนึ่งเริ่มจากที่กำหนดและสิ้นสุดที่กำหนด

4. วงจรหยุดแถบความถี่ผ่าน (Band Stop Filter) จะยอมให้ความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่ที่กำหนดไว้ผ่านไปได้



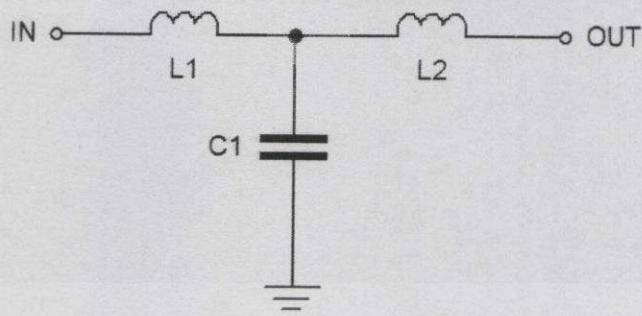
รูปที่ 2.21 การกรองความถี่

### 2.10.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

จะใช้งาน  $L$  มาต่อใช้งานตามคุณสมบัติของ  $L$  ที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เนื่องจากการใช้งาน  $L$  เพียงตัวเดียวไม่อาจทำให้การตัดความถี่มีความสมบูรณ์ขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีการคิดวงจรขึ้นมาใหม่เพื่อให้การตัดความถี่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นดังนี้

- วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปตัวที (T Type Low Pass Filter)

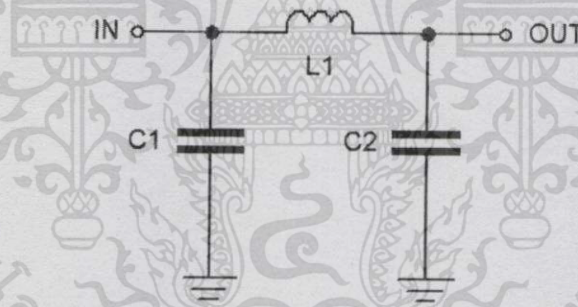
ในรูปของวงจร T จะใช้งาน  $L$  2 ตัว และใช้  $C$  อีก 1 ตัวช่วยให้การตัดความถี่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยหากให้การตัดความถี่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นต้องใช้วงจรนี้มาต่อกับหลายๆชุด



รูปที่ 2.22 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวที

- วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปตัวพาย (Pi Type Low Pass Filter)

วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัว และใช้ L 1 ตัวในการกรองความถี่สูงทิ้งไปนิยมใช้งานในวงจรภาคจ่ายไฟแบบสวิตชิง



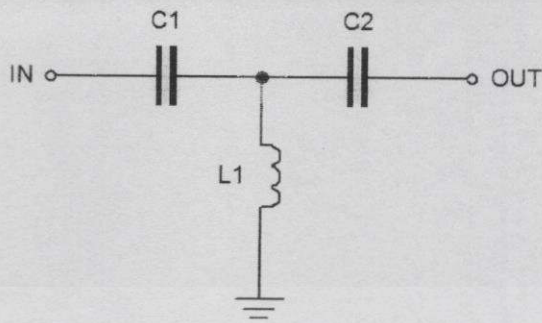
รูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านรูปตัวพาย

### 2.10.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

จะใช้งาน C เข้ามากรองความถี่และเพื่อให้การตัดความถี่มีความสมบูรณ์ขึ้นจึงใช้งานวงจรรูปที่ และตัวพายแบบเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำเพียงแต่สลับตำแหน่งของอุปกรณ์กัน

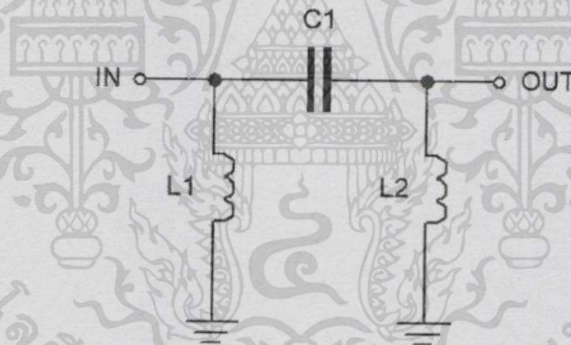
- วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวที (T Type High Pass Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.



รูปที่ 2.24 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวที

- วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวพาย (Pi Type High Pass Filter)

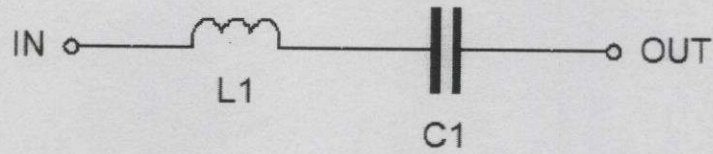


รูปที่ 2.25 วงจรกรองความถี่สูงผ่านรูปตัวพาย

### 2.10.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

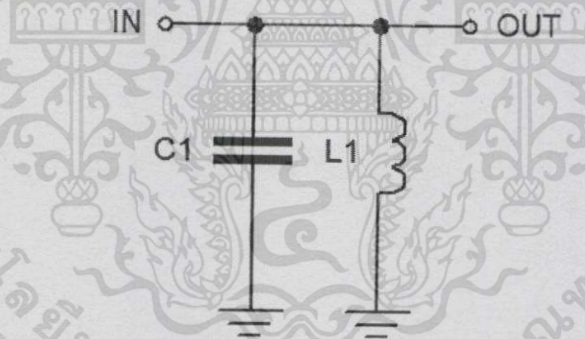
วงจรนี้จะใช้งาน L และ C มาต่อขนานหรืออนุกรมกันโดยหลักการคือให้ L กรองความถี่สูงสุดที่จะให้ผ่านก่อนความถี่ที่สูงกว่าจะถูกตัดทิ้งไปจากนั้นจึงใช้ C มากรองความถี่ต่ำที่สุดที่จะให้ผ่านความถี่ที่ต่ำกว่าที่กำหนดก็จะถูกตัดทิ้งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

หากนำ C และ L มาต่อขนานกันลงกราวด์ตามคุณสมบัติของ L ก็จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นจึงใช้ L ในการตัดความถี่ที่ต่ำกว่าที่กำหนดลงกราวด์และตามคุณสมบัติของ C ที่ยอมให้ความถี่สูงผ่านทำให้ตัดความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดลงกราวด์จากนั้นจึงมีช่วงความถี่ที่ไม่ถูกกำหนดไว้ไม่ถูกตัดลงกราวด์ ทำให้สามารถผ่านออกไปได้



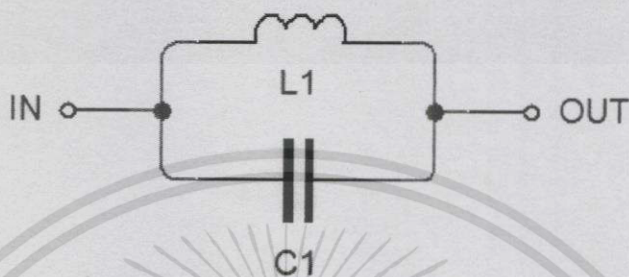
รูปที่ 2.27 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

#### 2.10.4 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่าน (Band Stop Filter)

วงจรจะคล้ายๆกับวงจรกรองความถี่ผ่าน แต่จะใช้องค์ประกอบ L และ C ในจุดที่ต่างกันจากวงจรจะเห็นว่าเราจะให้ความถี่ผ่านเข้ามาที่ L และ C พร้อมๆกันโดยหากความถี่ที่เข้ามาต่ำกว่าความถี่ตัดของ L จะทำให้ความถี่สามารถผ่าน L ไปได้ แต่หากสูงกว่าจะไม่สามารถผ่านไปได้ต่อมาก็มาดูที่ C ตาม

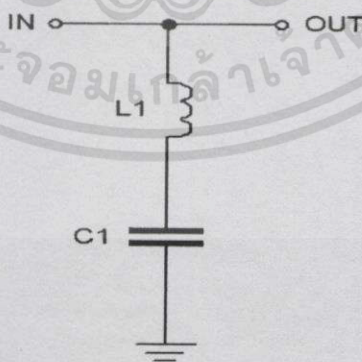
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติคือยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้นั้นหากความถี่ที่เข้ามาสูงกว่าความถี่ตัดของ L ถึงจะผ่าน L ไปไม่ได้ แต่หากสูงกว่าความถี่ตัดของ C ก็จะทำให้ความถี่นั้นผ่าน C ไปได้โดยง่าย



รูปที่ 2.28 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่านแบบขนาน

วงจรด้านล่างนี้จะใช้หลักการดึงความถี่ที่อยู่ในแถบความถี่ที่ไม่ต้องการให้ผ่านดึงลงกราวด์เพื่อไม่ให้ความถี่ผ่านไปได้โดยเมื่อความถี่เข้ามาผ่าน L แล้วความถี่นั้นต่ำกว่าจุดตัดของ L จะทำให้ความถี่สามารถผ่านไปหา C ได้ และหากความถี่ที่ผ่าน L มานั้นสูงกว่าจุดตัดของ C จะทำให้ความถี่นั้นผ่านลงกราวด์ไปทำให้ไม่สามารถผ่านไปได้



รูปที่ 2.29 วงจรหยุดแถบความถี่ผ่านแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 Motor (มอเตอร์)

มอเตอร์ไฟฟ้า (MOTOR) หมายถึงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่แปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกลมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานกลมีทั้งพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับและพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งเป็น 2 ประเภท

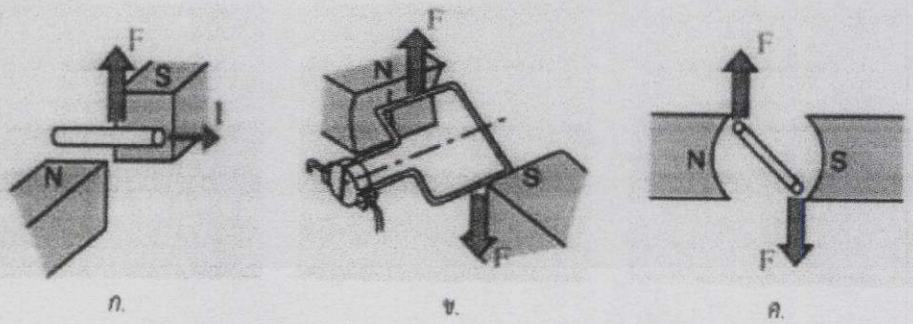
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

โดยมอเตอร์ทั้งสองประเภทจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไปบ้าง แต่ส่วนประกอบหลักคือจะมีส่วนที่อยู่กับที่เราเรียกว่าส่วนของสเตเตอร์ (Stator) และส่วนของที่เคลื่อนที่ซึ่งเราเรียกว่าส่วนโรเตอร์ (Rotor) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีด้วยกันหลายแบบถ้าจะแบ่งตามการก่อสร้างสนามแม่เหล็กของ สเตเตอร์ ก็แบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. แบบที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก (Permanent DC Motor) แบบนี้จะมีแท่งแม่เหล็กอย่างน้อยสองแท่งเป็นส่วนประกอบของสเตเตอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กๆ ใช้ในของเด็กเล่นหรือเครื่องมือขนาดเล็กเช่นส่วนเจาะปรีนซ์
2. แบบที่ใช้ขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็ก (Wound DC Motor) แบบนี้จะมีขดลวดสเตเตอร์ในการสร้างสนามแม่เหล็กและมีขั้วต่อออกเพื่อรับการจ่ายไฟเลี้ยงซึ่งสามารถต่อได้ 2 ลักษณะคือต่ออนุกรมกับขดลวดโรเตอร์ เราเรียกว่าซีรี่ส์มอเตอร์ (Series Motor) และต่อแบบขนานกับโรเตอร์เรียกว่า ชันท์มอเตอร์ (Shunt Motor) โดยมอเตอร์แบบนี้จะใช้งานพิเศษที่ต้องการแรงบิดสูงหรืองานที่ต้องการความเร็วรอบที่คงที่และปรับเปลี่ยนได้ง่าย โดยวิธีควบคุมกระแสที่จ่ายให้ขดลวดนี้
3. แบบใช้ขดลวดพันพิเศษเพื่อหมุนแบบทีละขั้นทีละจุดมักเรียกกันว่าสเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor) ซึ่งจะใช้ในการควบคุมแบบพิเศษเช่นแขนกลหรืออุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมการหมุนแบบละเอียด

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับก็มีด้วยกันหลายประเภทเช่น มอเตอร์แบบซิงโครนัส (Synchronous Motor), มอเตอร์แบบอินดักชัน (Induction Motor) เป็นต้น

หลักการทำงานของมอเตอร์จะอาศัยแรงผลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กโดยความรู้เบื้องต้นที่เราได้เรียนมาคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้นถ้าเรานำตัวนำดังกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กถาวรก็จะเกิดการดันและเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงผลักขึ้นที่ขดลวด เหมือนกับนักเรียนนำแม่เหล็ก 2 ชิ้นมาวางใกล้ ๆ กัน

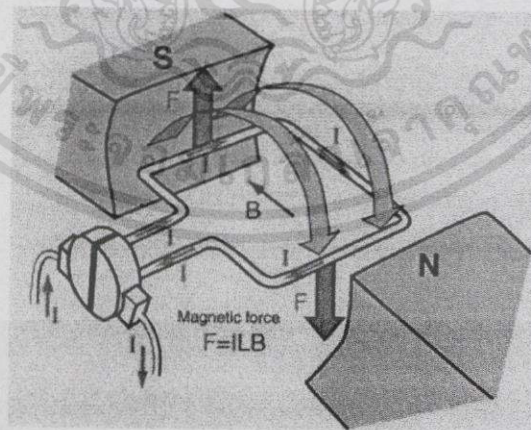


รูปที่ 2.30 การทำงานของมอเตอร์

รูปที่ 2.30 ก. เมื่อเราจ่ายกระแสให้กับตัวนำจะทำให้ตัวนำมีสนามแม่เหล็ก มีผลให้ทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงผลักตัวนำไปในทิศทางด้านบนแต่ถ้าจ่ายกระแสในทิศทางตรงข้ามตัวนำก็จะถูกผลักในทิศทางตรงกันข้าม

รูปที่ 2.30 ข. เมื่อใช้ตัวนำเป็นวงรอบแล้วจ่ายกระแสจะทำให้ด้านหนึ่งของตัวนำถูกผลักขึ้นและอีกด้านถูกผลักลง ทำให้ตัวนำหมุน

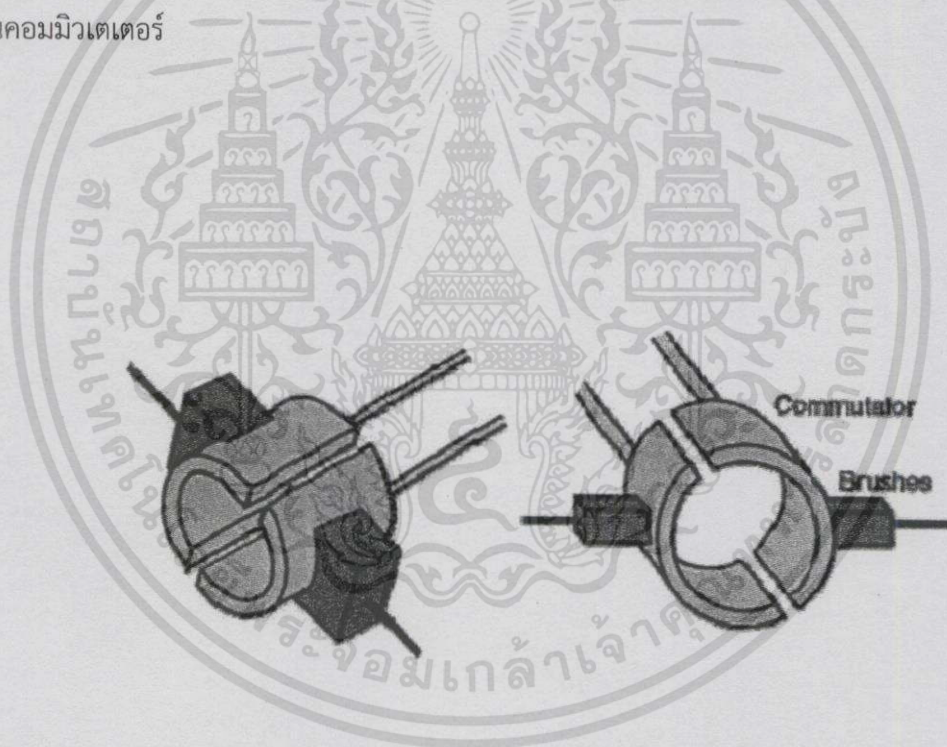
รูปที่ 2.30 ค. แสดงภาพในแนวตัวขวางแสดงถึงทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นกับตัว



รูปที่ 2.31 การทำงานของมอเตอร์

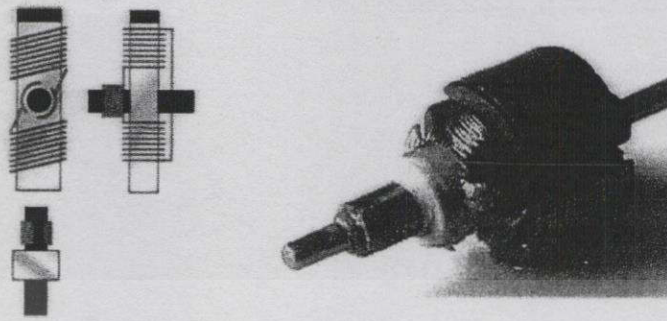
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อจ่ายกระแสผ่านขั้วต่อที่เรียกว่าแปรงถ่าน (Brushes) ไปยังวงแหวนพิเศษที่เรียกว่าคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งต่อเข้ากับวงรอบตัวนำกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยด้านหนึ่งจะเกิดเป็นแรงผลักขึ้นส่วนอีกด้านจะเกิดแรงผลักลงมาทำให้วงรอบตัวนำมีการหมุนโดยแรงที่เกิดจะแปรตามกระแสที่ไหลผ่าน (I) ความยาวของตัวนำ (L) และความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ (B) ที่ต้องใช้วงแหวนคอมมิวเตเตอร์เพราะถ้าเราต่อตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายตายตัวจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีทิศตายตัวเมื่อตัวนำหมุนมาอีกทิศทางหนึ่งทิศทางแรงผลักรจะทำให้ตัวนำถูกผลักรับไปตำแหน่งเดิมทำให้ไม่สามารถหมุนต่อเนื่องได้การใช้วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ก็เพื่อให้ตัวนำได้รับการจ่ายกระแสที่ถูกต้องทำให้ตัวนำหมุนต่อเนื่องต่อไปได้สำหรับการต่อแรงดันไฟฟ้าไปยังคอมมิวเตเตอร์จะกระทำผ่านแปรงถ่านโดยแปรงถ่านจะเป็นสารผสมระหว่างทองแดงกับกราไฟต์ที่สามารถนำกระแสที่ต้องใช้แปรงถ่านก็เพื่อลดการเสียดสีระหว่างขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟกับวงแหวนคอมมิวเตเตอร์



รูปที่ 2.32 วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ และ แปรงถ่าน

มอเตอร์ในทางปฏิบัติจะเพิ่มความยาวของลวดตัวนำซึ่งเป็นโรเตอร์โดยพันลวดรอบแกนโลหะซึ่งเรามักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่าอาร์เมเจอร์ (Armature) เพื่อเพิ่มแรงบิด (Torque) ให้กับมอเตอร์



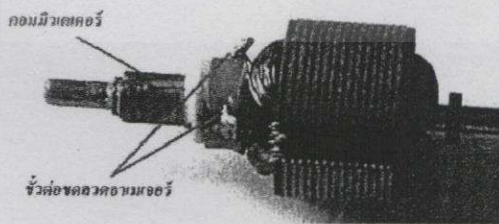
รูปที่ 2.33 โครงสร้างและภาพจริงของอามเจอร์

ส่วนประกอบของมอเตอร์

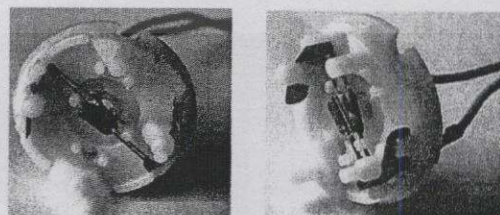


แสดงด้านหน้าด้านหลังมอเตอร์

แสดงสเตเตอร์และส่วนประกอบแม่เหล็กถาวร



แสดงอามเจอร์และส่วนประกอบ  
ทองแดงที่ทำ



แสดงส่วนพลาสติกที่มีขั้วไฟเชื่อมต่อกับแผ่น  
หน้าที่แทนแปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 บอร์ด Arduino

Arduino อ่านว่า (อา-ดู-อี-โน้ หรือ อาดูยโน) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติมพัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของการใช้บอร์ด Arduino ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้นมาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย



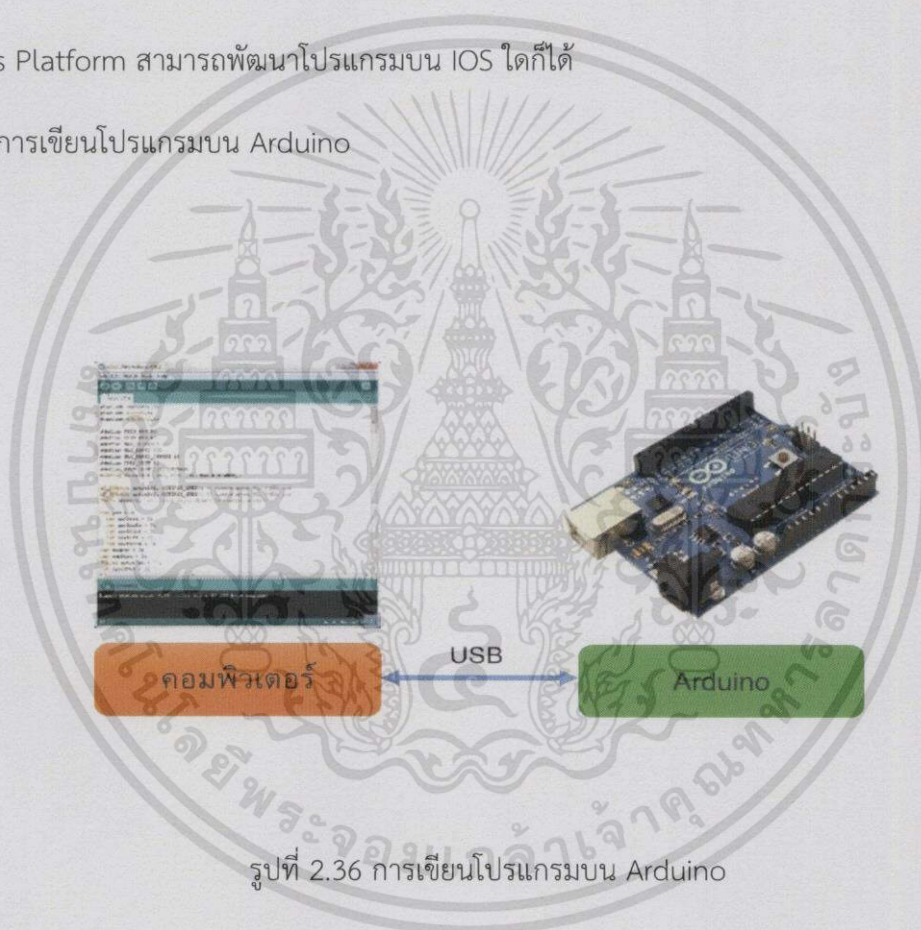
รูปที่ 2.34 บอร์ด Arduino ต่อกับ LED

รูปที่ 2.35 บอร์ด Arduino ต่อกับบอร์ด XBee Shield

จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- ง่ายต่อการพัฒนามีรูปแบบคำสั่งพื้นฐานไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน IOS ได้ก็ได้

รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino



Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open-source บนแพลตฟอร์ม Arduino ของแท้จากผู้ผลิต arduino.cc ประเทศอิตาลีออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่ายใช้ชิพ ATmega328P ที่ความถี่ 16 MHz หน่วยความจำแฟลช 32 KB แรม 2 KB บอร์ดใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 V (TTL) มี Digital Input / Output 14 ขา (เป็น PWM ได้ 6 ขา) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

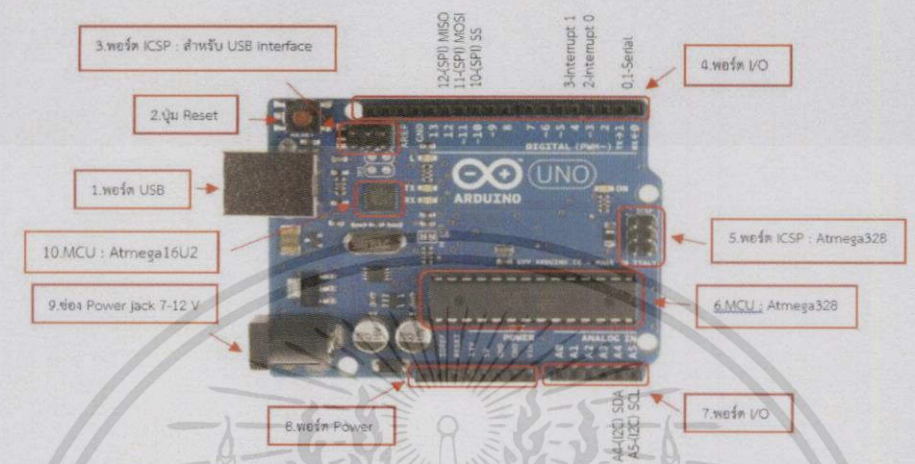
Analog Input 6 ขา Serial UART 1 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Arduino IDE และโปรแกรมผ่านพอร์ต USB

บอร์ด Arduino UNO R3 มีคุณสมบัติดังนี้

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flashes Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

## Layout &amp; Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)



1. USBPort ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/OPort Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/OPort นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอกประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, VIN
9. Power Jack รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

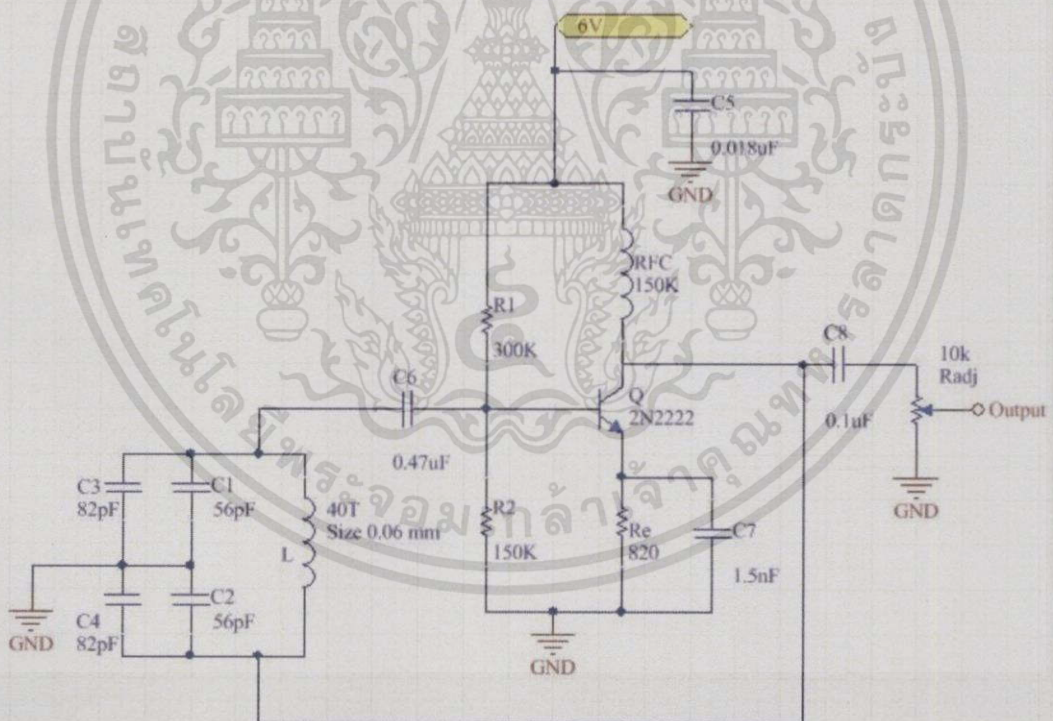
## บทที่ 3

### การออกแบบ

#### 3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบวัดการหายใจ

จากหลักการเบื้องต้นและคุณสมบัติต่างๆที่ได้กำหนดขึ้นมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมที่แบ่งเป็นส่วนต่างๆ ตามรูปอ้างอิง 1.1 และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะอธิบายการทำงานแยกส่วนกันไป

##### 3.1.1 ภาควงจร Oscillator



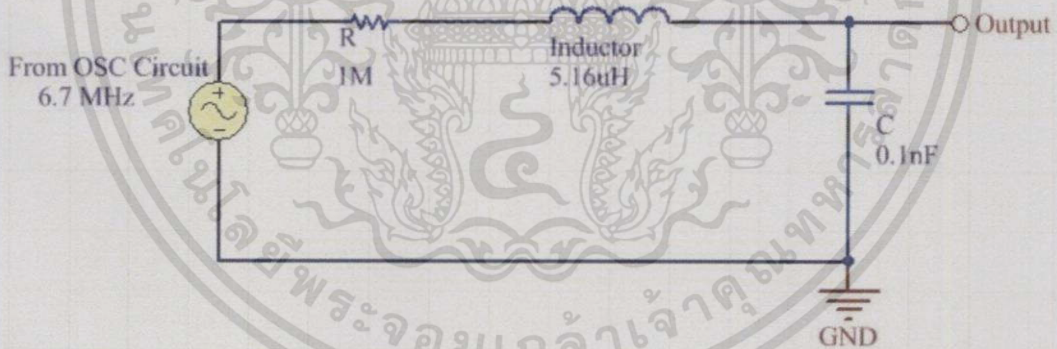
รูปที่ 3.1 วงจร Colpitts Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรออสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 3.1 การทำงานของวงจรอาศัยหลักการป้อนกลับด้วยวงจรรีโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ  $C_r$  และตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และสัญญาณที่ป้อนกลับเอาต์พุตทางขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะป้อนกลับผ่านวงจรจนเมื่อกลับเฟส 180 องศาป้อนเข้ามาทางเบสของทรานซิสเตอร์สำหรับตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  จะเป็นตัวไบแอสทรานซิสเตอร์ให้ทำงานในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณส่วนตัวเก็บประจุ  $C_6$  เปรียบเสมือนเป็นตัวคัปปลิงสัญญาณเข้ามาทางอินพุตทันทีที่วงจรจะออสซิลเลตได้

การทำงานในแต่ละรอบของการออสซิลเลตขณะเริ่มแรกของการออสซิลเลตจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นผลป้อนกลับมาจากด้านอินพุตทางเบสกระตุ้นขาเบสโดยกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นทางค่ามากทำให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์ลดลงการป้อนกลับจะกระตุ้นเข้ามาที่เบสด้วยค่าแรงดันน้อยลงเป็นผลทำให้กระแสลดลงและแรงดันคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะสูงขึ้นเป็นเช่นนี้เรื่อยไปตัวเก็บประจุ  $C_5$  ในรูป ที่ 3.1 เป็นทางผ่าน (bypass) ของสัญญาณไฟสลับและในทำนองเดียวกันก็จะเป็นตัวกันแรงดันไฟตรงเพื่อไม่ให้ลัดลงกราวด์ ความถี่ของวงจรได้จาก ความถี่รีโซแนนซ์ของ  $L$  และ  $C_r$  สามารถปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ด้วยการปรับค่า  $L$  และ  $C_r$

### 3.1.2 ภาควงจร Resonance



รูปที่ 3.2 วงจร Resonance

ลักษณะสมบัติของวงจรรีโซแนนซ์อนุกรมกล่าวคือในขณะที่เกิดสภาวะรีโซแนนซ์นั้นค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของวงจรจะเท่ากับหนึ่งหรือวงจรจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน  $R$  เพียงอย่างเดียวเท่านั้นส่วนค่ารีแอกแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไปเพราะฉะนั้นค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  ของวงจรจะเท่ากับค่าของความต้านทาน  $R$  เพียงอย่างเดียวเท่านั้น นั่นคือ  $Z = R$

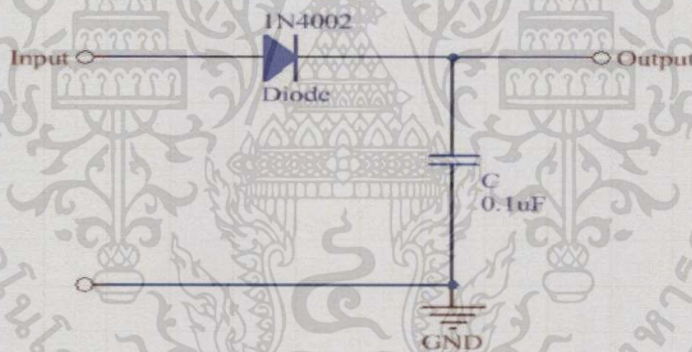
จากสูตรหาความถี่เรโซแนนซ์ ( สมการที่ 5 )

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{5.16*10^{-6}*0.1*10^{-9}}}$$

$$f_r \approx 7 \text{ MHz}$$

เนื่องจากจ่ายสัญญาณความถี่ประมาณ 7 MHz ให้กับวงจร Resonance ส่งผลให้เกิดความถี่ ณ จุดคร่อม C ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณซึ่งเห็นได้ชัดกว่าการวัดคร่อม ณ จุดอื่นๆ ที่ การเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณเห็นได้น้อยมาก

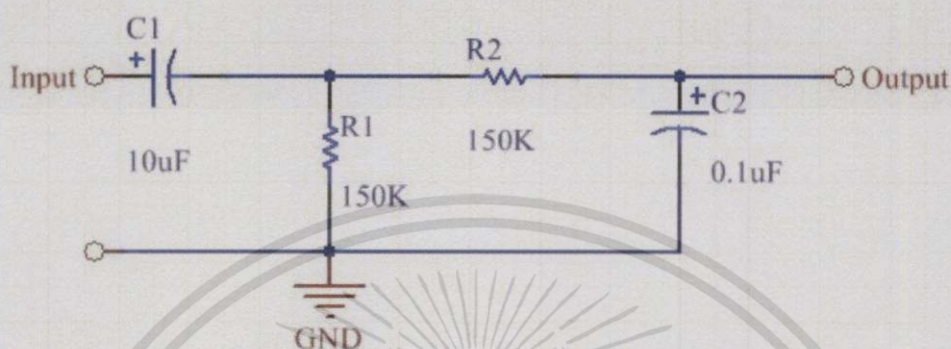
### 3.1.3 ภาควงจร Demodulator



รูปที่ 3.3 วงจร Demodulator

จากวงจรเมื่อรับสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะผ่าน Diode 1N4002 ซึ่งมีหน้าที่เรียงกระแส แล้วผ่าน C ซึ่งจะทำหน้าที่ ตีคลิปล้างสัญญาณความถี่สูงหรือความถี่คลื่นพาร์ออกไปเหลือแค่ความถี่จากการหายใจหรือความถี่จริงๆ และจากการเปลี่ยนแปลงนี้เราจะเรียกว่า AM demodulator เพื่อแยกคลื่นพาร์ออกไปแต่การเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณยังปกติเหมือนเดิม

### 3.1.4 ภาควงจร Bandpass Filter



รูปที่ 3.4 วงจร Bandpass Filter

วงจรรองความถี่แบบ Bandpass Filter คือจะยอมให้ความถี่เฉพาะช่วงที่กำหนดให้ผ่านได้ ความถี่นอกจากนี้จะไม่ยอมให้ผ่านเนื่องจากความถี่นั้นยังมีความถี่สูงที่ซ้อนทับมาซึ่งเราไม่ต้องการจึงสร้างวงจรรองความถี่เพื่อใช้ความถี่ที่เหมาะสมในที่นี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน

1. วงจรรองความถี่สูงผ่าน
2. วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

- วงจรรองความถี่สูงผ่าน

เป็นการกรองความถี่สูงให้ผ่านไปได้ ซึ่งจากรูป C1 มีหน้าที่กรองความถี่สูงให้ผ่านไปได้ R1 จะทำหน้าที่ผลัดกระแส DC ให้ลงกราวด์จะทำให้หน้ากระแส AC ผ่านไปได้

- วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

โดยที่ C2 ทำหน้าที่กรองความถี่สูงให้ผ่านลงกราวด์จะทำให้ความถี่ต่ำผ่านออกไปได้

สูตรการคำนวณความถี่ช่วง Bandpass Filter

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \quad (39)$$

ช่วง 100 mHz,  $c_1 = 10 \mu F$ ,  $R_1 = 150 K\Omega$

$$F = \frac{1}{2\pi RC}$$

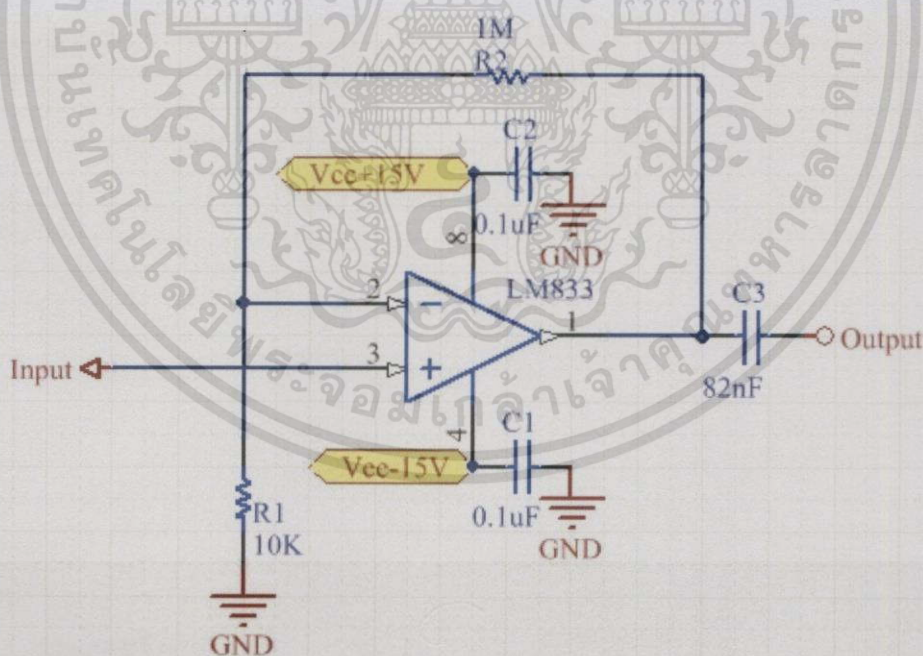
$$F = \frac{1}{2\pi * 150 * 10^3 * 10 * 10^{-6}} = 106 \text{ mHz}$$

ช่วง 10 Hz,  $c_2 = 0.1 \mu F$ ,  $R_2 = 150 K\Omega$

$$F = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$F = \frac{1}{2\pi * 150 * 10^3 * 0.1 * 10^{-6}} = 10 \text{ Hz}$$

### 3.1.5 ภาควงจรรขยาย (Amplifier)



รูปที่ 3.5 วงจร Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM833 เป็นออปแอมป์ทั่วไปที่ได้รับการออกแบบโดยเน้นเฉพาะในประสิทธิภาพการทำงานในเสียงระบบเครื่องขยายเสียงการประมวลผลเทคนิคในการส่งมอบเสียงต่ำความเร็วสูงและแบนด์วิดท์กว้างโดยไม่ต้องเพิ่มองค์ประกอบภายนอกหรือลดลงดังนั้นจึงเหมาะสำหรับ preamp หรือการขยายความถี่ต่ำ

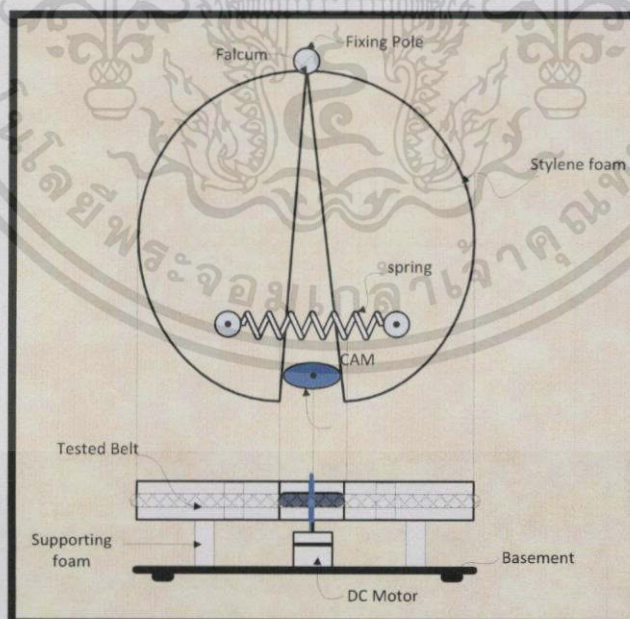
สูตร อัตราการขยายที่มีการป้อนกลับ

$$\text{Gain} = R2/R1$$

$$\text{Gain} = 1M/100K$$

$$\text{Gain} = 100 \text{ เท่า}$$

### 3.2 เครื่องจำลองการขยายตัวของทรงวงอก



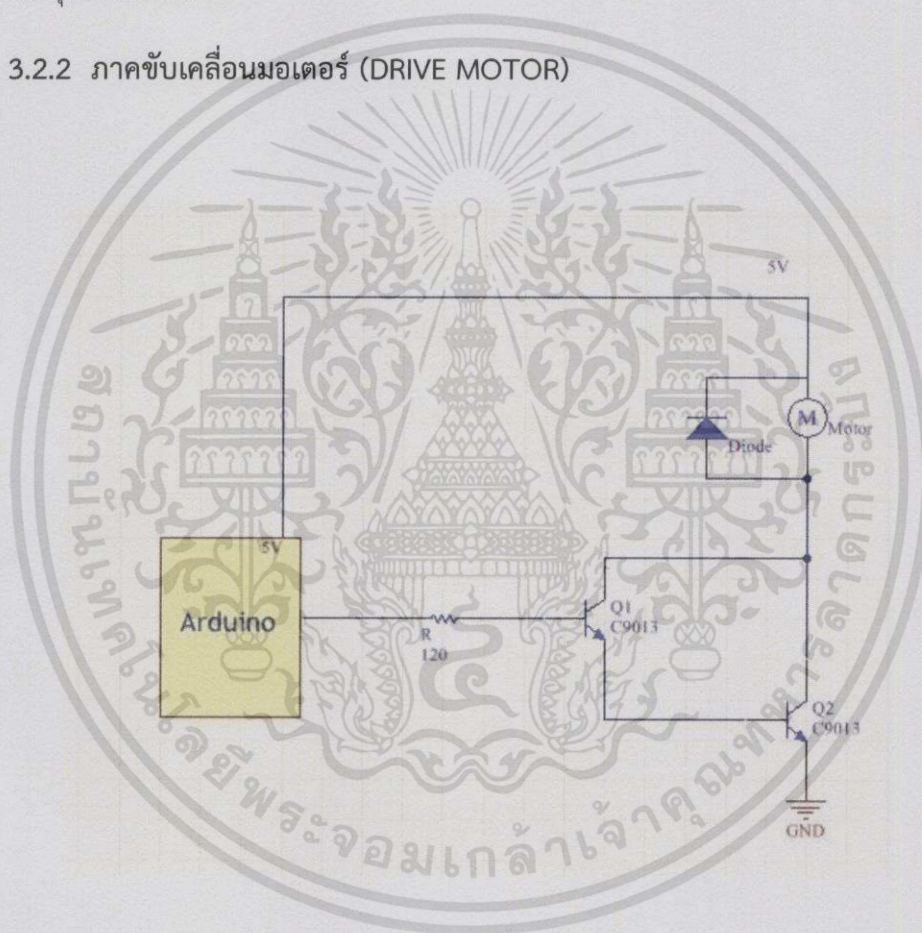
รูปที่ 3.6 เครื่องจำลองการขยายตัวของทรงวงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 โครงสร้างของเครื่องจำลองการขยายตัวของทรงวงอก

โครงสร้างการทำงานจะเริ่มจากใช้มอเตอร์ยึดติดกับลูกเบี้ยวโดยตัดโฟมออกเป็นวงกลมให้มีขนาดประมาณรอบทรงวงอกและแบ่งโฟมออกเป็นครึ่งเพื่อที่สามารถใส่มอเตอร์ไว้ในแกนกลางเมื่อมอเตอร์หมุนแกนลูกเบี้ยวก็จะหมุนตามก็จะทำให้โฟมก็จะเกิดการยืดและขยายได้โดยจะมีการพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำไว้กับสายคาคอก แล้วจากนั้นนำไปตรอบตัวโฟมทั้งหมดเมื่อโฟมเกิดการยืดก็จะทำให้สายคาคอกที่มีขดลวดตัวเหนี่ยวนำเกิดการยืดด้วยเช่นกันและมีฐานที่สามารถรองรับน้ำหนักของมอเตอร์และอุปกรณ์ทั้งหมดได้

### 3.2.2 ภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ (DRIVE MOTOR)



รูปที่ 3.7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

ในโครงงานนี้เราเลือกใช้ DC MOTOR โดยเมื่อมีพัลส์มาที่อินพุตสัญญาณจะไปกระตุ้น Q1 ให้ทำงาน โดย Q1 และ Q2 ต่อกันแบบดาร์ลิ่งตันเมื่อ Q1 ทำงาน Q2 ก็ทำงานด้วยเมื่อ Q2 ทำงาน ก็จะมีกระแสไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไดโอด 1N4001 จะทำหน้าที่

ป้องกันแรงดันย้อนกลับจากการยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดมอเตอร์และ Rb ทำหน้าที่จำกัดกระแสเกินที่ไปขับ Q1

มอเตอร์ที่ใช้ต้องการกำลังงานจากแหล่งจ่ายกำลังงาน 5 V ต่อเฟสโดยมอเตอร์จะมีอยู่ 2 สาย มอเตอร์จะหมุนเมื่อป้อนไฟ 5 V ไฟเลี้ยงที่จ่ายให้มอเตอร์ 5 V จะต่อออกจากบอร์ด Arduino ถ้าต้องการให้หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา ก็จ่ายไฟกลับชั่วคราวโดยกำหนดไฟที่ออกจากบอร์ด Arduino จะมีตัวต้านทานปรับค่าได้

### 3.2.2.1 การลดจำนวนรอบของมอเตอร์

ในที่นี้หลักการการทำงานคือใช้บอร์ด Arduino เป็นตัวกำหนดโดยใช้ Pulse Width Modulation ในการลดจำนวนรอบมอเตอร์โดยให้ขา 9 เป็นของเอาต์พุตของ PWM โดยได้การลดจำนวนการหมุนมอเตอร์เนื่องจาก Arduino รับค่า Analog ได้ 255 สัญญาณหมายความว่าค่าสัญญาณ 0 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ก็จะแสดงได้เป็น 0 ถึง 255 ในสัญญาณดิจิตอลจากการจับเวลาของมอเตอร์ใน 1 นาทีโดยจ่ายไฟ 5 V จากบอร์ด Arduino เราทราบได้ว่า มอเตอร์หมุน 27 รอบ/นาที เราต้องการลดจำนวนรอบของมอเตอร์เหลือแค่ 15 รอบ/นาที สามารถเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้ดังนี้

จาก 27 รอบ/นาที สัญญาณดิจิตอลคือ 255

ถ้า 15 รอบ/นาที สัญญาณดิจิตอลคือ  $\frac{15 \cdot 255}{27} = 150$

ดังนั้นโค้ดที่ใช้เขียนทศรอบการหมุนมอเตอร์ ดังนี้

```
Void loop() {
    Byte PWM_out_level;

    PWM_out_level = 150; // Code logic to set output level

    analogWrite (PWM_out_pin, PWM_out_level);

}
```

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

เครื่องต้นแบบได้ถูกสร้างจากชิ้นงานหลายชิ้นและหลายวงจร แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกันจึงแบ่งการอธิบายรายละเอียดเป็นส่วนต่างๆดังนี้

#### 4.1 ชั้นส่วนภายนอก

จะประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์จำลองรบบอก ทำจากวัสดุโฟม ซึ่งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูกมาก นำมาดัดแปลงได้ง่ายซึ่งมีรัศมี  $5\frac{1}{2}$  นิ้ว ซึ่งคำนวณแล้วจะมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับรบบอกผู้ชายคือ 36 นิ้วและสามารถยึดหดได้ง่าย
2. ฐานของอุปกรณ์ ทำจากไม้แผ่น ซึ่งสามารถรองรับน้ำหนักของมอเตอร์ได้ดีแข็งแรงพอเหมาะที่จะนำมาใช้งานได้

#### 4.2 ชั้นส่วนภายใน

จะประกอบไปด้วย

1. ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟเนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้กินกระแสค่อนข้างสูงแต่สามารถใช้ไฟเลี้ยงที่ออกจากบอร์ด Arduino ได้ แต่จะมีวงจร Drive Motor เพื่อทำให้มอเตอร์หมุนเสียดทานโฟมได้
2. ชุดควบคุม นั่นก็คือบอร์ด Arduino ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายไฟให้มอเตอร์และควบคุมการแสดงผลออกทางหน้าจอ

#### 4.3 รูปร่างของตัวเครื่องจริง

แสดงขนาดและรูปร่างภายในและภายนอกของเครื่องต้นแบบ

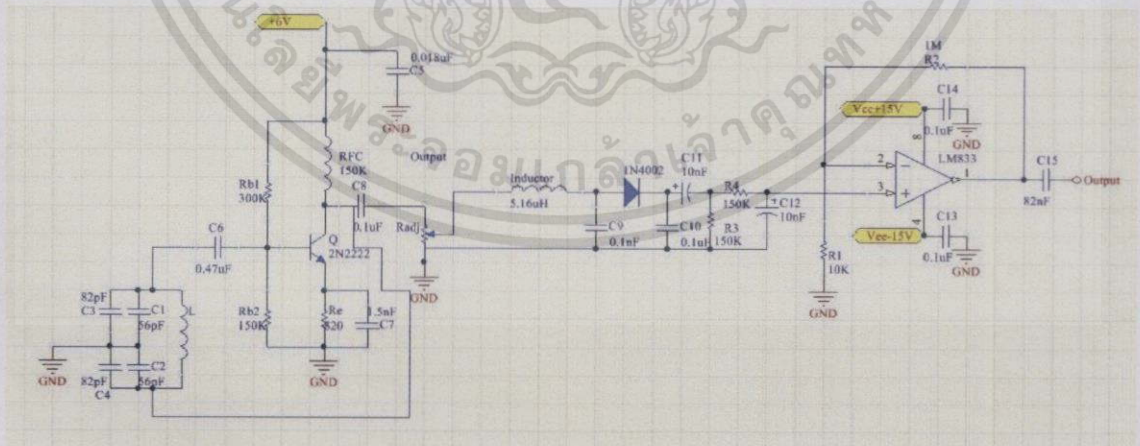
รัศมี = 13 Cm.



รูปที่ 4.1 รูปแสดงภายนอกเครื่องต้นแบบ

#### 4.4 การทดลอง

วงจรในภาพรวมของระบบทั้งหมด

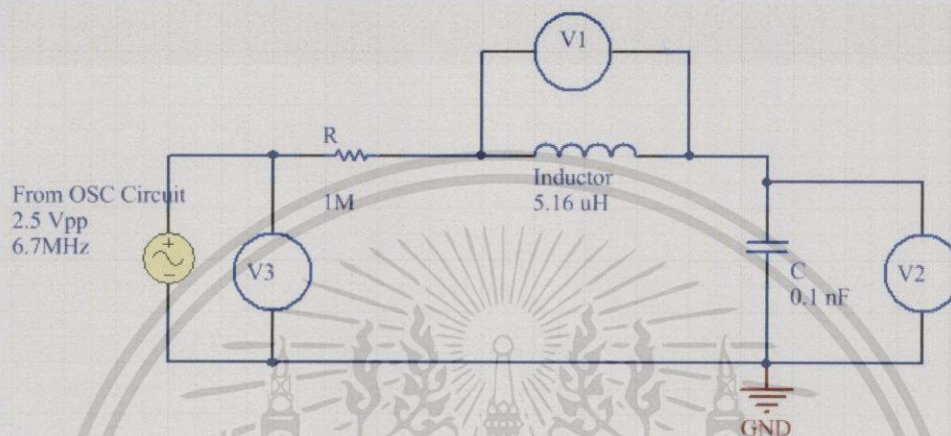


รูปที่ 4.2 ภาพรวมของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 วงจรรีโซแนนซ์

จากการทดลอง เนื่องจากเราพันขดลวดตัวเหนี่ยวนำรอบสายเคดอกแล้วจากนั้นนำไปวัดค่ามีค่าเท่ากับ 5.16  $\mu\text{H}$  นำไปต่อวงจร resonance โดยต่ออนุกรมกับค่า C 0.1 nF จากนั้นทดลองโดยจ่ายสัญญาณจาก Generator โดยป้อนอินพุทความถี่ตั้งแต่ 1 – 20 MHz



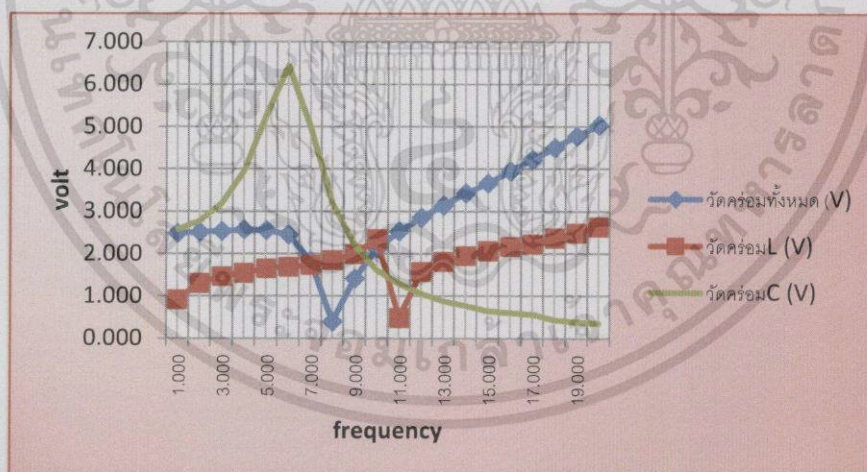
รูปที่ 4.3 การวัดผลวงจร Resonance

ตาราง 4.1 การทดลองจ่าย Generator ความถี่ 1 – 20 MHz 2.5 Vpp

Frequency (2.5Vpp) MHz	V1 (V)	V2 (V)	V3 (V)
1 MHz	910 mV	2.69 V	2.49 V
2 MHz	1.30 V	2.85 V	2.51 V
3 MHz	1.46 V	3.18 V	2.53 V
4 MHz	1.54 V	3.82 V	2.57 V
5 MHz	1.65 V	4.76 V	2.55 V
6 MHz	1.69 V	6.39 V	2.45 V
7 MHz	1.73 V	6.95 V	1.83 V
8 MHz	1.85 V	4.94 V	430 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 MHz	1.99 V	3.38 V	1.41 V
10 MHz	2.35 V	2.37 V	2.11 V
11 MHz	480 mV	1.81 V	2.53 V
12 MHz	1.57 V	1.05 V	2.85 V
13 MHz	1.81 V	880 mV	3.14 V
14 MHz	1.95 V	760 mV	3.42 V
15 MHz	2.07 V	640 mV	3.66 V
16 MHz	2.17 V	600 mV	3.94 V
17 MHz	2.23 V	560 mV	4.22 V
18 MHz	2.37 V	431 mV	4.50 V
19 MHz	2.49 V	378 mV	4.78 V
20 MHz	2.63 V	350 mV	5.03 V



รูปที่ 4.4 รูปกราฟผลการทดลองที่ความถี่ 1 – 20 MHz 2.5 Vpp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

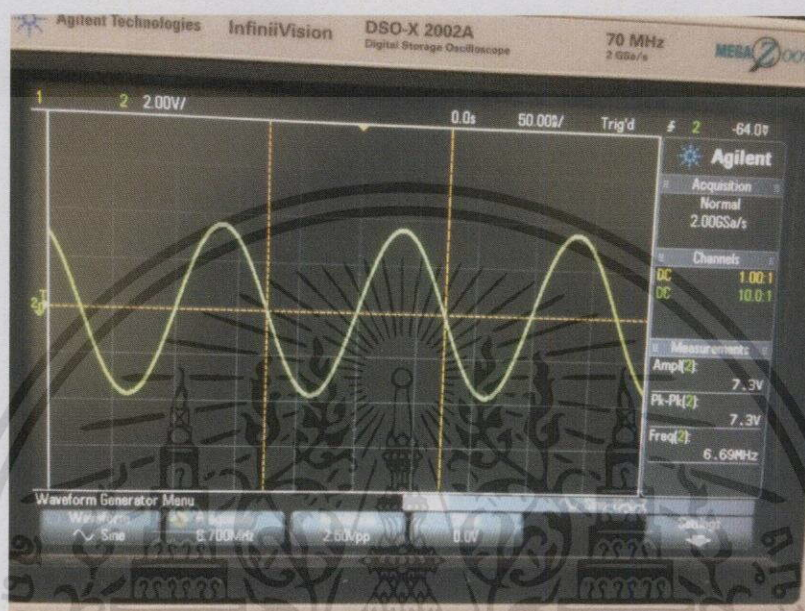
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในการวัดคร่อม C มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเราจึงค่าที่วัดคร่อม C นำไปใช้แล้วทำการวัดช่วงความถี่ 6.1 – 8 MHz เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงสุดหรือหาความถี่ที่เหมาะสมที่สุด

ตาราง 4.2 การวัดแบบละเอียดช่วงความถี่ 6 – 8 MHz

Frequency (2.5Vpp) MHz	V2 (V)
6.0 MHz	6.39 V
6.1 MHz	6.55 V
6.2 MHz	6.71 V
6.3 MHz	6.87 V
6.4 MHz	6.95 V
6.5 MHz	7.04 V
6.6 MHz	7.10 V
6.7 MHz	7.12 V
6.8 MHz	7.10 V
6.9 MHz	7.02 V
7.0 MHz	6.95 V
7.1 MHz	6.79 V
7.2 MHz	6.63 V
7.3 MHz	6.40 V
7.4 MHz	6.25 V
7.5 MHz	6.07 V
7.6 MHz	5.83 V
7.7 MHz	5.59 V
7.8 MHz	5.41 V
7.9 MHz	5.19 V
8.0 MHz	4.98 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

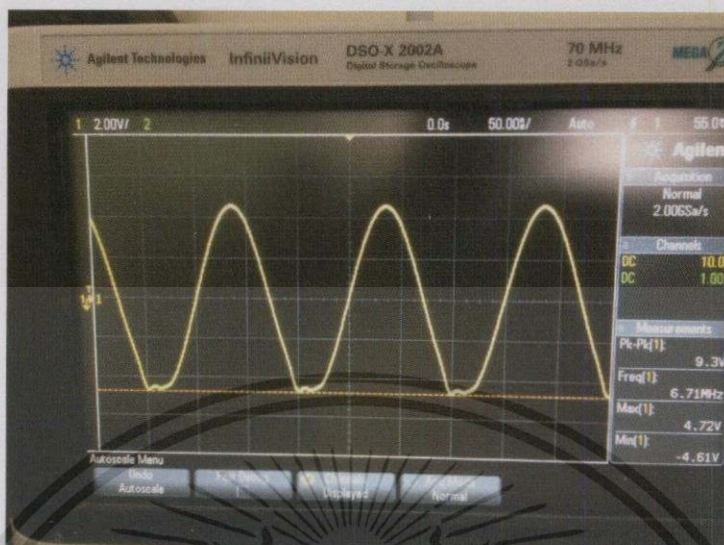
จะเห็นว่าค่า Volt สูงสุดอยู่ที่ 6.7 MHz เรียกความถี่นี้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ดังนั้นเราต้องสร้างสัญญาณจากวงจร Oscillator ที่มีความถี่ 6.7 MHz เพื่อจ่ายให้กับวงจร resonance



รูปที่ 4.5 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Resonance

#### 4.4.2 วงจร Colpitts Oscillator

จากการทดลองวงจร Colpitts Oscillator ดังรูป 3.1 จะได้ว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 MHz – 7.6 MHz และค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 9.3 Vpp ซึ่งมีตัวต้านทานปรับค่าได้ทางเอาต์พุตได้ซึ่งเราจะนำค่านี้ไปใช้จ่ายให้วงจร resonance



รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Colpitts Oscillator

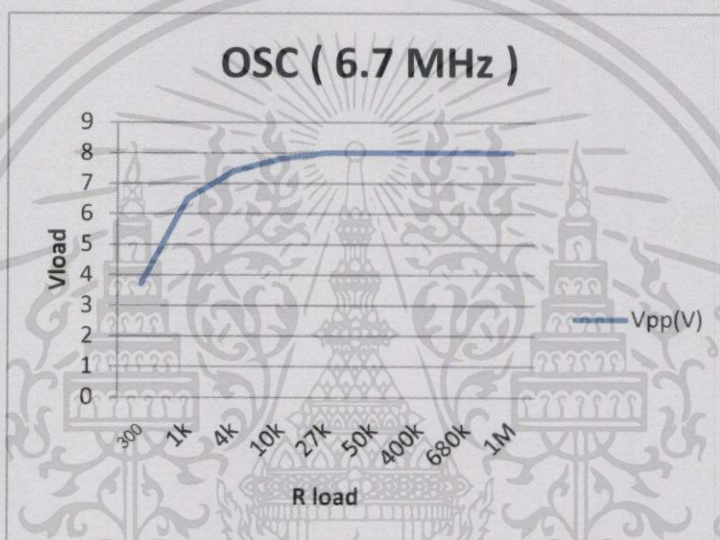
เมื่อทดลองใส่ load ให้วงจรเพื่อหาวงจรนี้เอาท์พุทออกมามีค่า impedance สูงหรือต่ำและจะมีผลต่อวงจรต่อไปมากหรือน้อยโดยจะใส่ค่าความต้านทานทางเอาท์พุทและวัดคร่อมความต้านทานนี้จากนั้นลองเปลี่ยนค่าความต้านทาน

ตาราง 4.3 ขนาดของแรงดันจากออสซิลเลเตอร์เมื่อเปลี่ยนค่า Rload

Rload ( $\Omega$ )	Vpp(V)
300	3.7
1k	6.5
4k	7.4
10k	7.8
27k	8
50k	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400k	8
680k	8
1M	8

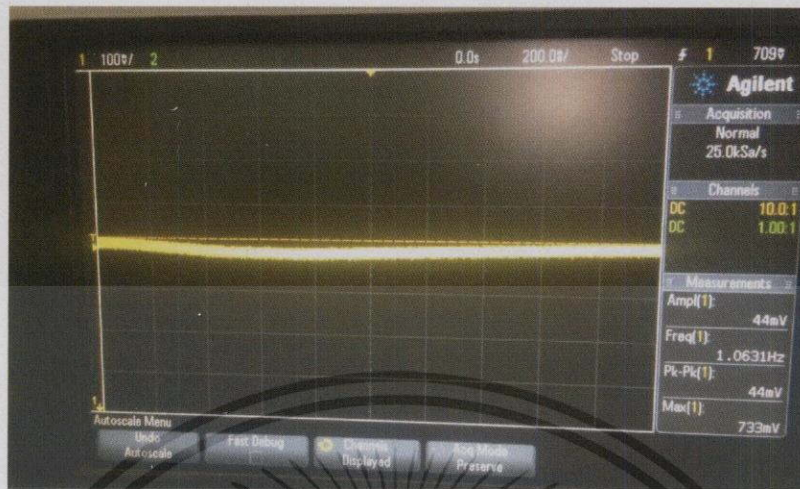


รูปที่ 4.7 กราฟแสดง Vload เมื่อเปลี่ยน Rload

#### 4.4.3 วงจรดีมอดูเลเตอร์

การนำสัญญาณที่ได้มาแยกคลื่นพาร์ออกนั้นต้องใช้วงจรมอดูเลเตอร์ในที่นี้เป็น AM Modulator เนื่องจากการยืด/หด ของสายคาบดอกทำให้ขนาดของสัญญาณเปลี่ยน

จากรูป 3.4 สัญญาณที่ออกจากวงจร Demodulator เมื่อมีการหดหรือไม่มีการเคลื่อนไหวแรงดันที่ได้อยู่ที่ประมาณ 0.8 mV ส่วนถ้ามีการหายใจหรือทำให้สายคาบดอกขยายค่าของแรงดันที่ได้จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 8-12 mV ส่วนความถี่คลื่นพาร์นั้นจะถูกแยกออกจึงจะเหลือแค่ความถี่ปกติประมาณ 350 mHz ซึ่งเป็นความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Demodulator

#### 4.4.4 วงจร Bandpass Filter

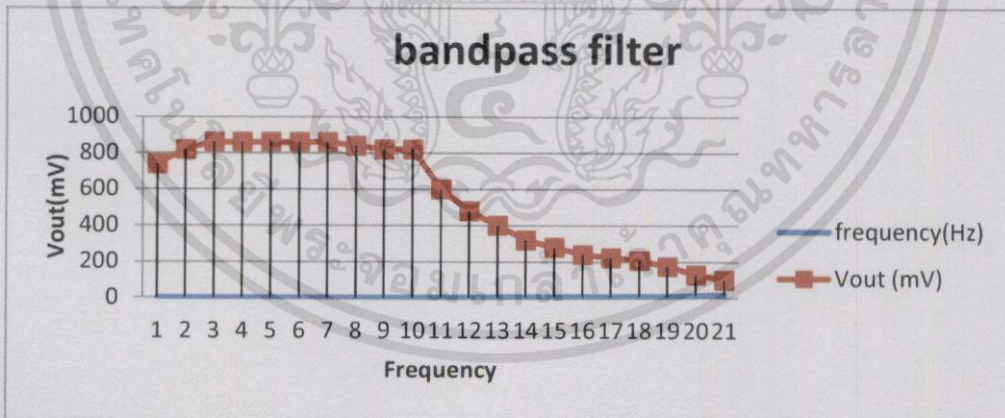
วงจรกรองความถี่ที่ยอมให้ช่วงความถี่ผ่านออกไปได้จากรูปที่ 3.5 ในที่นี้เรากำหนดช่วงที่ผ่านไปได้คือช่วงที่ 100 mHz – 10 Hz เพราะความถี่ที่ออกจากวงจรคือมอดูเลเตอร์มีค่าประมาณ 350 mHz และเพื่อป้องกันความถี่คลื่นพาร์ที่ยังขจัดออกไปไม่หมด

ตารางที่ 4.4 แรงดันเอาต์พุตของ Bandpass Filter

Frequency (Hz)	Vout (mV)
0.1	740
0.2	820
0.3	860
0.4	860
0.5	860
0.6	860
0.7	860
0.8	840
0.9	820
1	820
2	600
3	480

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	400
5	320
6	280
7	240
8	224
9	208
10	176
15	130
20	100
30	70
40	55
50	47
60	30
70	30
80	30
90	30
100	30



รูปที่ 4.9 การตอบสนองของ Bandpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 วงจร Amplifier

จากรูป 3.6 จากการทดลองวงจร Amplifier และจากสูตรการคำนวณอัตราขยายจะได้ว่า

$$\text{Gain} = R2/R1$$

$$V_{in} = 9 \text{ mVpp}$$

$$\text{Gain} = 1M/100K = 100$$

$$V_{out} = \text{Gain} * V_{in} = 900 \text{ mVpp}$$



รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ได้จากการทดลองวงจร Amplifier

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองประสิทธิภาพของหลักการวัดการหายใจด้วยหลักการอินดักแตนซ์ทำให้รู้ว่าจากการใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าของอินดักแตนซ์จะได้ผลเมื่อค่าอินดักแตนซ์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่ใช้ป้อนให้กับวงจรอิมพีแดนซ์จะอยู่ที่ 6.7 เมกกะเฮิร์ตซ์เมื่อค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าเอาท์พุทโวลต์เดทมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเราได้นำค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้ไปแสดงผลในรูปของสัญญาณคลื่นความถี่

#### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

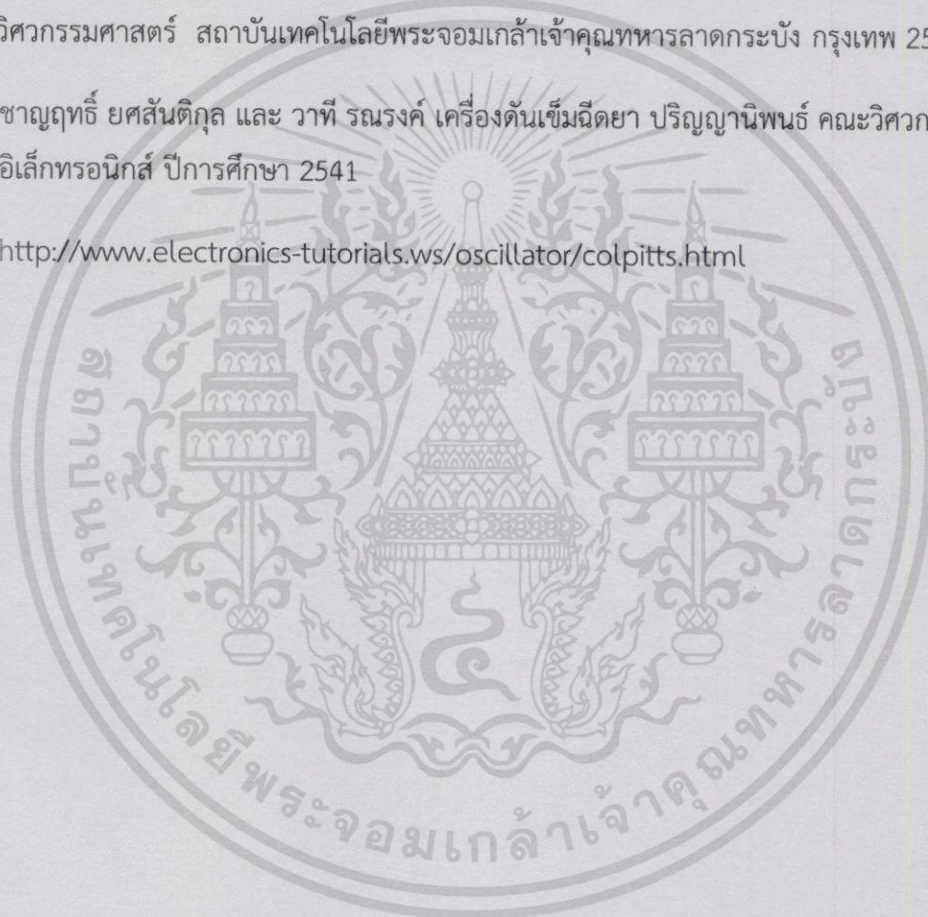
จากการทำโครงการได้เกิดปัญหาต่างๆมากมายทั้งในส่วนของวงจรและส่วนของแบบจำลองการหายใจของมนุษย์

ในส่วนของวงจรปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การสร้าง Oscillator ที่ความถี่ 6.7MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าสูง จากการทดลอง ผู้ทดลองได้ทำการทดลองสร้าง Oscillate จากออปแอมป์ ซึ่งผลที่ได้คือค่าความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมาก ซึ่งมากกว่าค่าที่ต้องการผู้ทดลองได้ทำการเปลี่ยนค่าของตัวอุปกรณ์ต่างๆในวงจรไม่ว่าจะเป็นค่าของตัวเหนี่ยวนำ ที่ทำการเพิ่มและลดจำนวนขดลวดเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการแต่ผลที่ได้คือค่าไม่ได้ตามต้องการผู้ทดลองจึงได้เปลี่ยนวงจร จากการใช้ออปแอมป์ในการสร้าง Oscillated มาเป็น transistor แทน (จากวงจร รูปที่ 3.1) ซึ่งค่าที่ได้ในตอนแรกก็ไม่ตรงกับที่ต้องการแต่ก็ไม่ได้ห่างจากค่าที่ต้องการเท่าไรนักผู้ทดลองจึงทำการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำโดยพันลวดตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าน้อยลง ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามต้องการและสามารถปรับเพิ่มและลดความถี่ได้ด้วย

ในส่วนของแบบจำลองการหายใจของมนุษย์ปัญหาที่เกิดขึ้นคือลวดตัวนำที่ใช้ถักซิกแซ็กตามมายืดเมื่อใช้ทำการทดลองซ้ำๆมักจะเกิดการขาดซึ่งเป็นปัญหาหลักในการทดลองและเมื่อลวดขาดผู้ทดลองต้องทำการพันใหม่ซึ่งค่าใหม่ที่ได้ต้องทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับอันเดิมที่ขาดไปถึงจะไม่ส่งผลต่อวงจรโดยรวม เพราะฉะนั้นผู้ทดลองต้องใช้ความระมัดระวังในการใช้

## บรรณานุกรม

- [1] สุริภณ สมควรพาณิชย์, ชนิษฐา แซ่ตั้ง หลักการเบื้องต้นทางวงจรไฟฟ้า แมคกอฮิลล์ กรุงเทพฯ 2540
- [2] ประภากร สุวรรณะ สมศักดิ์ ชุมช่วยหนังสือวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 2 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 2546
- [3] ชาญฤทธิ ยศสันติกุล และ วาที รมรงค์ เครื่องต้นเข็มฉีดยา ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์ ปีการศึกษา 2541
- [4] <http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/colpitts.html>





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DATA SHEET



## **2N2222; 2N2222A** NPN switching transistors

Product specification  
Supersedes data of September 1994  
File under Discrete Semiconductors, SC04

1997 May 29

# NPN switching transistors

# 2N2222; 2N2222A

### FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

### APPLICATIONS

- Linear amplification and switching.

### DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.  
PNP complement: 2N2907A.

### PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

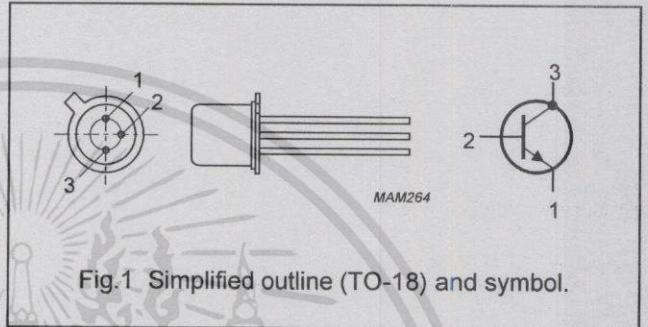


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

### QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V <sub>CBO</sub>	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V <sub>CEO</sub>	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
I <sub>C</sub>	collector current (DC)		–	800	mA
P <sub>tot</sub>	total power dissipation	T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C	–	500	mW
h <sub>FE</sub>	DC current gain	I <sub>C</sub> = 10 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V	75	–	
f <sub>T</sub>	transition frequency	I <sub>C</sub> = 20 mA; V <sub>CE</sub> = 20 V; f = 100 MHz	250	–	MHz
			300	–	MHz
t <sub>off</sub>	turn-off time	I <sub>Con</sub> = 150 mA; I <sub>Bon</sub> = 15 mA; I <sub>Boff</sub> = –15 mA	–	250	ns

## NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

## LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V <sub>CBO</sub>	collector-base voltage	open emitter	-	60	V
	2N2222			75	V
V <sub>CEO</sub>	collector-emitter voltage	open base	-	30	V
	2N2222A			40	V
V <sub>EBO</sub>	emitter-base voltage	open collector	-	5	V
	2N2222A			6	V
I <sub>C</sub>	collector current (DC)		-	800	mA
I <sub>CM</sub>	peak collector current		-	800	mA
I <sub>BM</sub>	peak base current		-	200	mA
P <sub>tot</sub>	total power dissipation	T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C	-	500	mW
		T <sub>case</sub> ≤ 25 °C	-	1.2	W
T <sub>stg</sub>	storage temperature		-65	+150	°C
T <sub>j</sub>	junction temperature		-	200	°C
T <sub>amb</sub>	operating ambient temperature		-65	+150	°C

## THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
R <sub>th j-a</sub>	thermal resistance from junction to ambient	in free air	350	K/W
R <sub>th j-c</sub>	thermal resistance from junction to case		146	K/W

## NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

## CHARACTERISTICS

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

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$I_{CBO}$	collector cut-off current 2N2222	$I_E = 0; V_{CB} = 50\text{ V}$	–	10	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 50\text{ V}; T_{amb} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–	10	$\mu\text{A}$
$I_{CBO}$	collector cut-off current 2N2222A	$I_E = 0; V_{CB} = 60\text{ V}$	–	10	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 60\text{ V}; T_{amb} = 150\text{ }^\circ\text{C}$	–	10	$\mu\text{A}$
$I_{EBO}$	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 3\text{ V}$	–	10	nA
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 0.1\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	35	–	
		$I_C = 1\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	50	–	
		$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
		$I_C = 150\text{ mA}; V_{CE} = 1\text{ V}; \text{note 1}$	50	–	
		$I_C = 150\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; \text{note 1}$	100	300	
$h_{FE}$	DC current gain 2N2222A	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; T_{amb} = -55\text{ }^\circ\text{C}$	35	–	
$h_{FE}$	DC current gain 2N2222 2N2222A	$I_C = 500\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}; \text{note 1}$	30	–	
			40	–	
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage 2N2222	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	–	400	mV
		$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	1.6	V
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage 2N2222A	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	–	300	mV
		$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	1	V
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage 2N2222	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	–	1.3	V
		$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	2.6	V
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage 2N2222A	$I_C = 150\text{ mA}; I_B = 15\text{ mA}; \text{note 1}$	0.6	1.2	V
		$I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}; \text{note 1}$	–	2	V
$C_c$	collector capacitance	$I_E = i_e = 0; V_{CB} = 10\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	–	8	pF
$C_e$	emitter capacitance 2N2222A	$I_C = i_c = 0; V_{EB} = 500\text{ mV}; f = 1\text{ MHz}$	–	25	pF
$f_T$	transition frequency 2N2222 2N2222A	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	250	–	MHz
			300	–	MHz
F	noise figure 2N2222A	$I_C = 200\text{ }\mu\text{A}; V_{CE} = 5\text{ V}; R_S = 2\text{ k}\Omega;$ $f = 1\text{ kHz}; B = 200\text{ Hz}$	–	4	dB

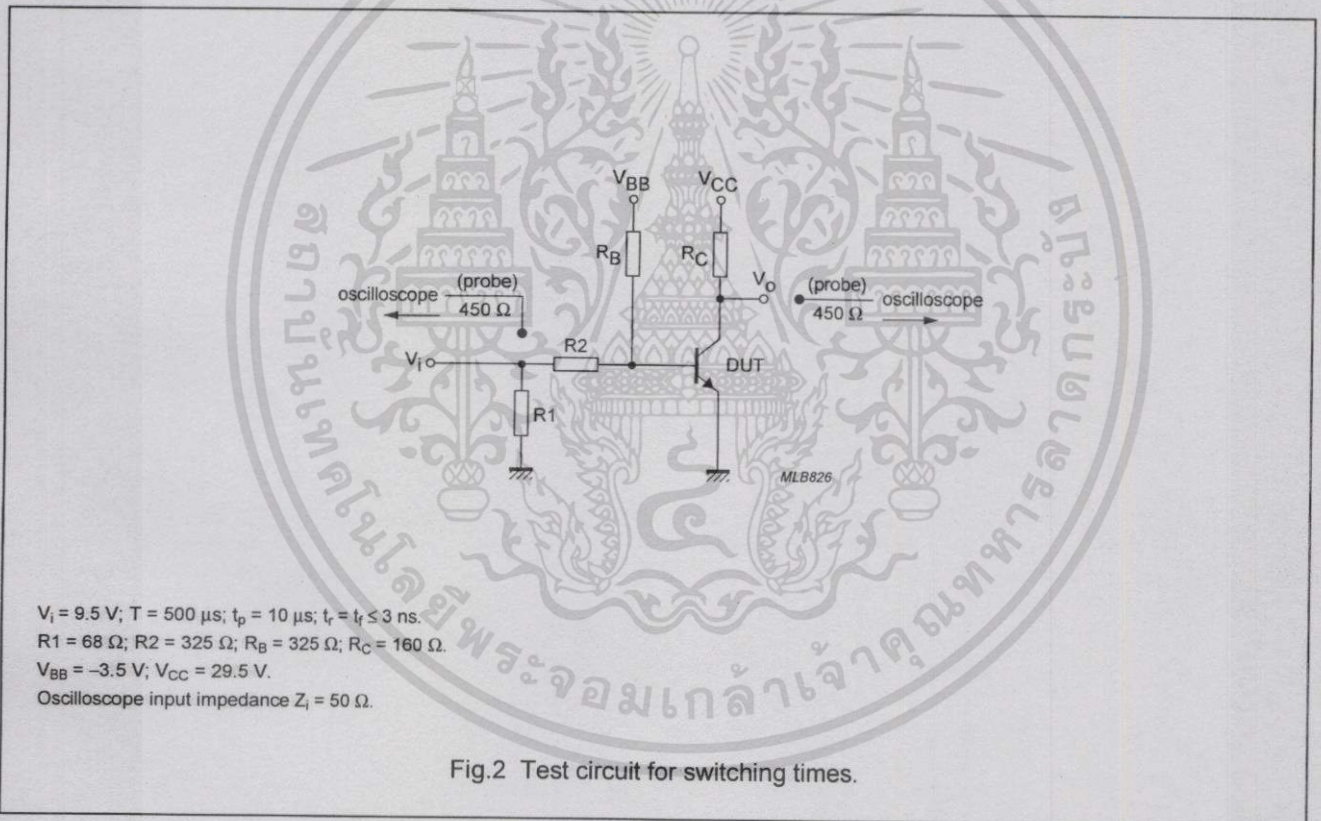
NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
<b>Switching times (between 10% and 90% levels); see Fig.2</b>					
$t_{on}$	turn-on time	$I_{Con} = 150 \text{ mA}; I_{Bon} = 15 \text{ mA}; I_{Boff} = -15 \text{ mA}$	—	35	ns
$t_d$	delay time		—	10	ns
$t_r$	rise time		—	25	ns
$t_{off}$	turn-off time		—	250	ns
$t_s$	storage time		—	200	ns
$t_f$	fall time		—	60	ns

Note

1. Pulse test:  $t_p \leq 300 \mu\text{s}; \delta \leq 0.02$ .



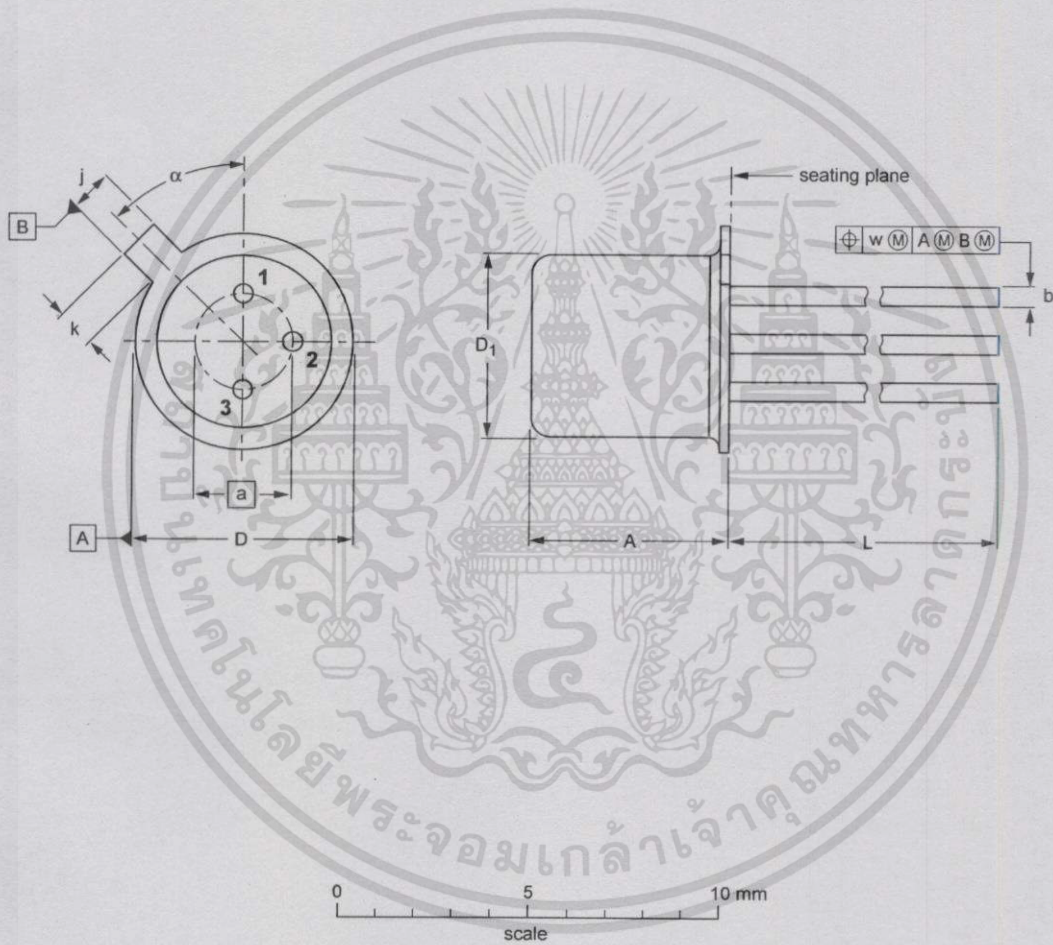
NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

PACKAGE OUTLINE

Metal-can cylindrical single-ended package; 3 leads

SOT18/13



DIMENSIONS (millimetre dimensions are derived from the original inch dimensions)

UNIT	A	a	b	D	D <sub>1</sub>	j	k	L	w	α
mm	5.31 4.74	2.54	0.47 0.41	5.45 5.30	4.70 4.55	1.03 0.94	1.1 0.9	15.0 12.7	0.40	45°

OUTLINE VERSION	REFERENCES			EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ		
SOT18/13	B11/C7 type 3	TO-18			97-04-18

## NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

## DEFINITIONS

<b>Data sheet status</b>	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
<b>Limiting values</b>	
Limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
<b>Application information</b>	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	

## LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of these products can reasonably be expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.



# Dual Low Noise, Audio Amplifier

The LM833 is a standard low-cost monolithic dual general-purpose operational amplifier employing Bipolar technology with innovative high-performance concepts for audio systems applications. With high frequency PNP transistors, the LM833 offers low voltage noise (4.5 nV/√Hz), 15 MHz gain bandwidth product, 7.0 V/μs slew rate, 0.3 mV input offset voltage with 2.0 μV/°C temperature coefficient of input offset voltage. The LM833 output stage exhibits no deadband crossover distortion, large output voltage swing, excellent phase and gain margins, low open loop high frequency output impedance and symmetrical source/sink AC frequency response.

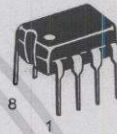
The LM833 is specified over the automotive temperature range and is available in the plastic DIP and SO-8 packages (P and D suffixes). For an improved performance dual/quad version, see the MC33079 family.

- Low Voltage Noise: 4.5 nV/√Hz
- High Gain Bandwidth Product: 15 MHz
- High Slew Rate: 7.0 V/μs
- Low Input Offset Voltage: 0.3 mV
- Low T.C. of Input Offset Voltage: 2.0 μV/°C
- Low Distortion: 0.002%
- Excellent Frequency Stability
- Dual Supply Operation

## LM833

### DUAL OPERATIONAL AMPLIFIER

#### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



N SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



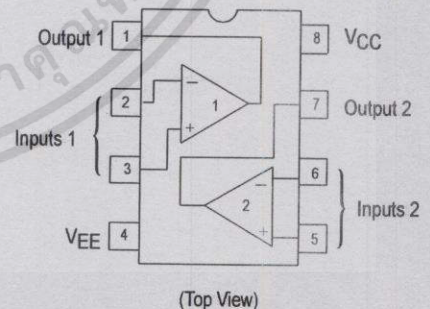
D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage (V <sub>CC</sub> to V <sub>EE</sub> )	V <sub>S</sub>	+36	V
Input Differential Voltage Range (Note 1)	V <sub>IDR</sub>	30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V <sub>IR</sub>	±15	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t <sub>SC</sub>	Indefinite	
Operating Ambient Temperature Range	T <sub>A</sub>	-40 to +85	°C
Operating Junction Temperature	T <sub>J</sub>	+150	°C
Storage Temperature	T <sub>stg</sub>	-60 to +150	°C
Maximum Power Dissipation (Notes 2 and 3)	P <sub>D</sub>	500	mW

NOTES: 1. Either or both input voltages must not exceed the magnitude of V<sub>CC</sub> or V<sub>EE</sub>.  
 2. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (T<sub>J</sub>) is not exceeded (see power dissipation performance characteristic).  
 3. Maximum value at T<sub>A</sub> ≤ 85°C.

#### PIN CONNECTIONS



#### ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
LM833N	T <sub>A</sub> = -40° to +85°C	Plastic DIP
LM833D		SO-8

# LM833

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ , $V_{EE} = -15\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input Offset Voltage ( $R_S = 10\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ )	$V_{IO}$	-	0.3	5.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $R_S = 10\ \Omega$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $T_A = T_{low}$ to $T_{high}$	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	2.0	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ )	$I_{IO}$	-	10	200	nA
Input Bias Current ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ )	$I_{IB}$	-	300	1000	nA
Common Mode Input Voltage Range	$V_{ICR}$	-12	+14 -14	+12 -	V
Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ )	$A_{VOL}$	90	110	-	dB
Output Voltage Swing: $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$ $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$ $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$ $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $V_{ID} = 1.0\text{ V}$	$V_{O+}$ $V_{O-}$ $V_{O+}$ $V_{O-}$	10 - 12 -	13.7 -14.1 13.9 -14.7	- -10 - -12	V
Common Mode Rejection ( $V_{in} = \pm 12\text{ V}$ )	CMR	80	100	-	dB
Power Supply Rejection ( $V_S = 15\text{ V}$ to $5.0\text{ V}$ , $-15\text{ V}$ to $-5.0\text{ V}$ )	PSR	80	115	-	dB
Power Supply Current ( $V_O = 0\text{ V}$ , Both Amplifiers)	$I_D$	-	4.0	8.0	mA

## AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ , $V_{EE} = -15\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Slew Rate ( $V_{in} = -10\text{ V}$ to $+10\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $A_V = +1.0$ )	$S_R$	5.0	7.0	-	$\text{V}/\mu\text{s}$
Gain Bandwidth Product ( $f = 100\text{ kHz}$ )	GBW	10	15	-	MHz
Unity Gain Frequency (Open Loop)	$f_U$	-	9.0	-	MHz
Unity Gain Phase Margin (Open Loop)	$\theta_m$	-	60	-	Deg
Equivalent Input Noise Voltage ( $R_S = 100\ \Omega$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$e_n$	-	4.5	-	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current ( $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$i_n$	-	0.5	-	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Power Bandwidth ( $V_O = 27\text{ V}_{pp}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $\text{THD} \leq 1.0\%$ )	BWP	-	120	-	kHz
Distortion ( $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $f = 20\text{ Hz}$ to $20\text{ kHz}$ , $V_O = 3.0\text{ V}_{rms}$ , $A_V = +1.0$ )	THD	-	0.002	-	%
Channel Separation ( $f = 20\text{ Hz}$ to $20\text{ kHz}$ )	$C_S$	-	-120	-	dB

Figure 1. Maximum Power Dissipation versus Temperature

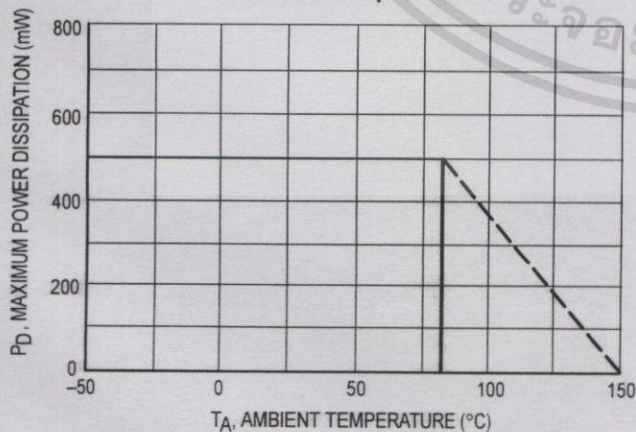


Figure 2. Input Bias Current versus Temperature

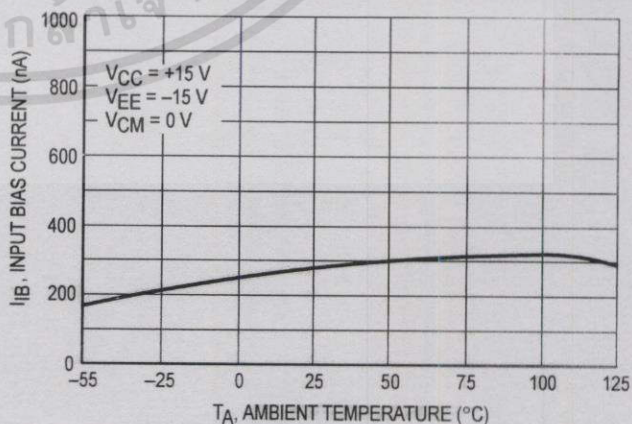


Figure 3. Input Bias Current versus Supply Voltage

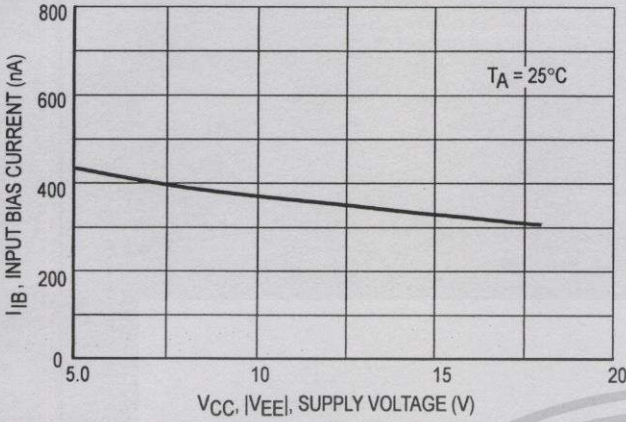


Figure 4. Supply Current versus Supply Voltage

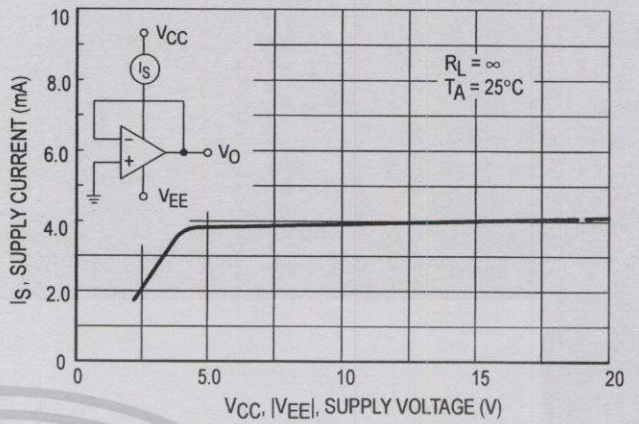


Figure 5. DC Voltage Gain versus Temperature

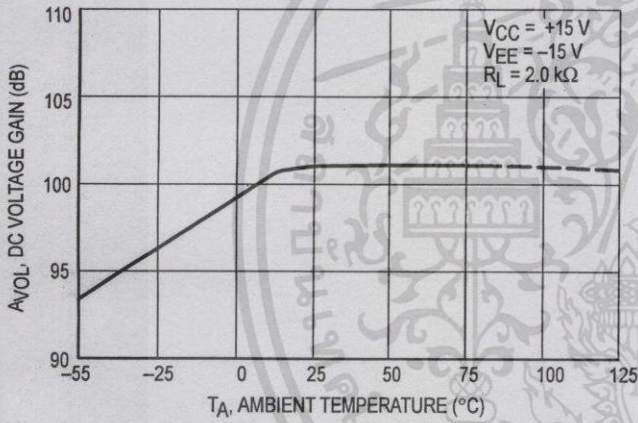


Figure 6. DC Voltage Gain versus Supply Voltage

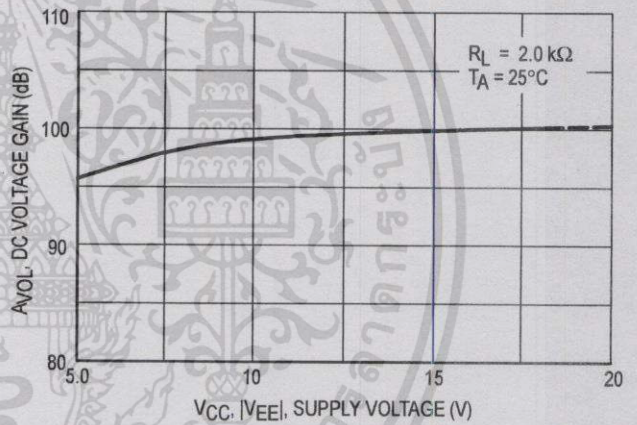


Figure 7. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

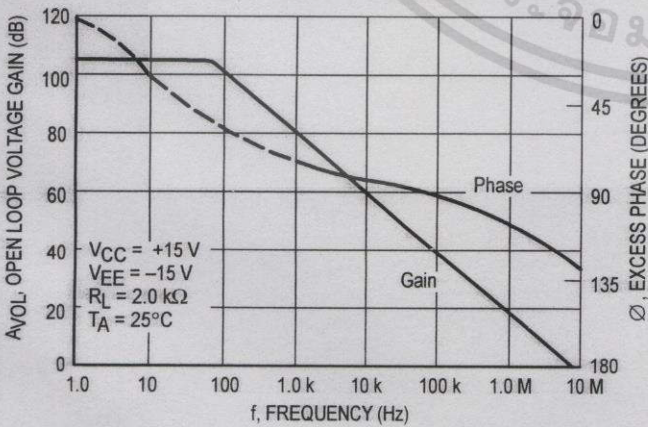


Figure 8. Gain Bandwidth Product versus Temperature

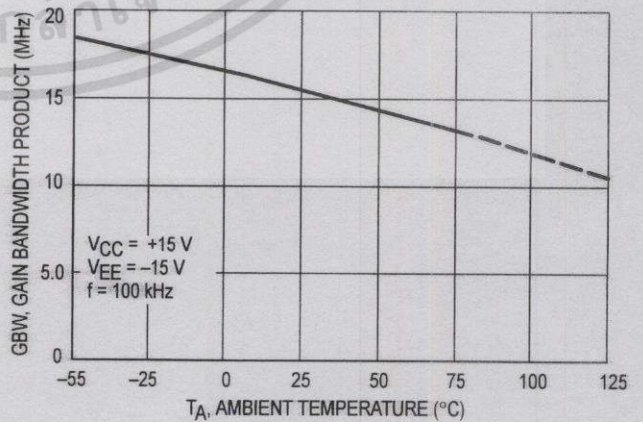


Figure 9. Gain Bandwidth Product versus Supply Voltage

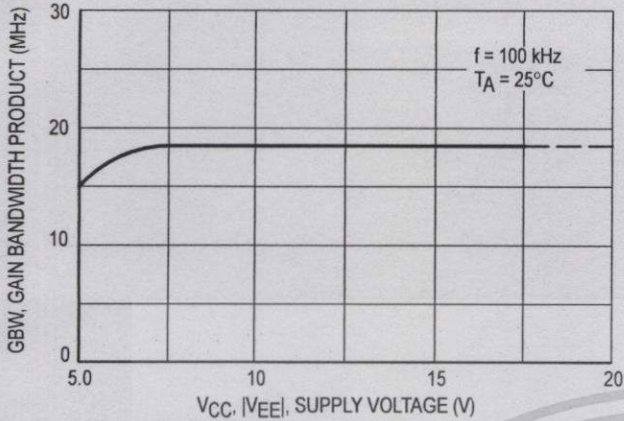


Figure 10. Slew Rate versus Temperature

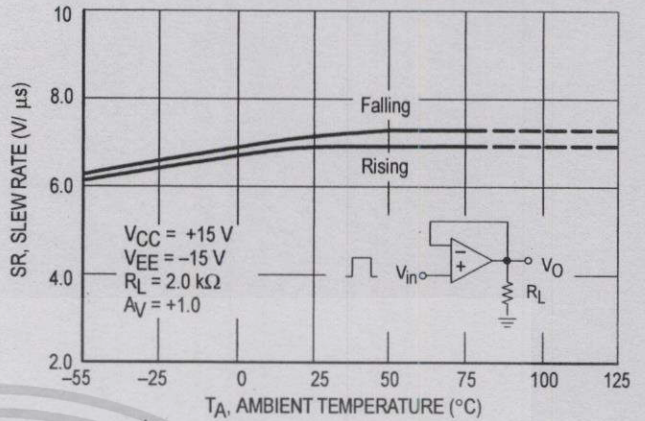


Figure 11. Slew Rate versus Supply Voltage

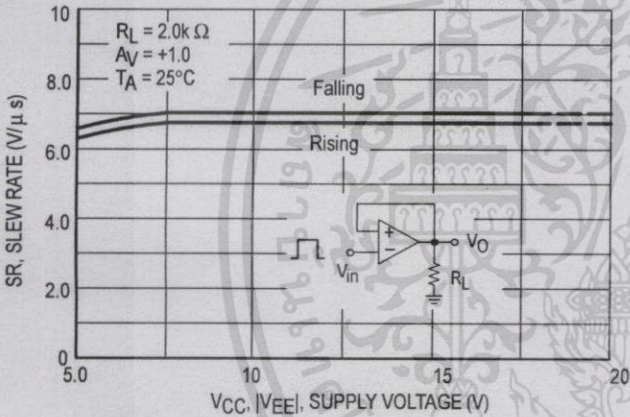


Figure 12. Output Voltage versus Frequency

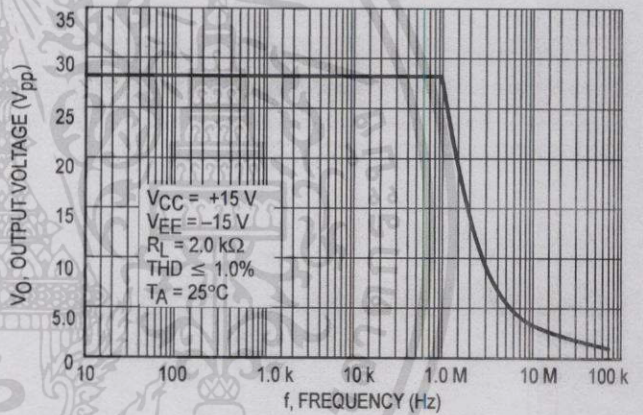


Figure 13. Maximum Output Voltage versus Supply Voltage

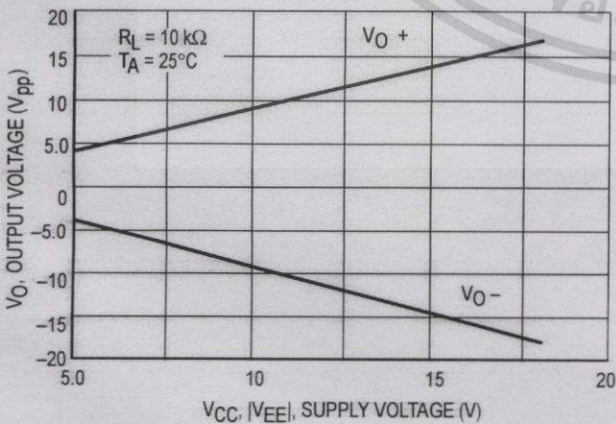


Figure 14. Output Saturation Voltage versus Temperature

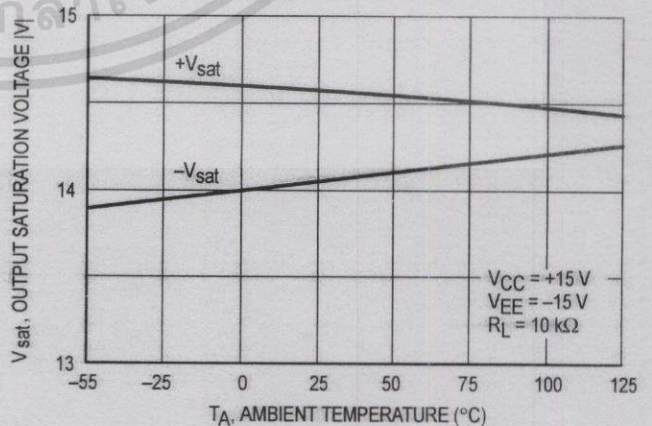


Figure 15. Power Supply Rejection versus Frequency

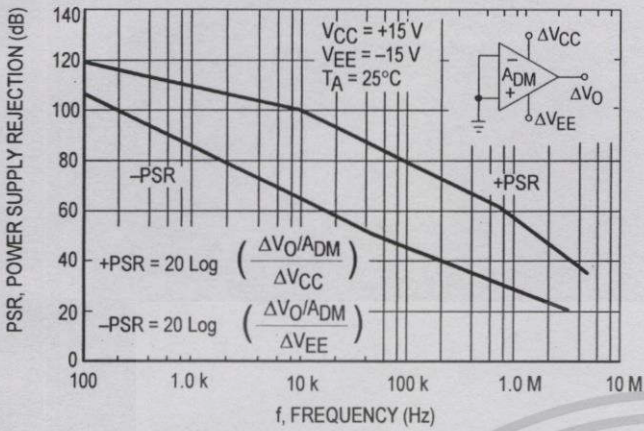


Figure 16. Common Mode Rejection versus Frequency

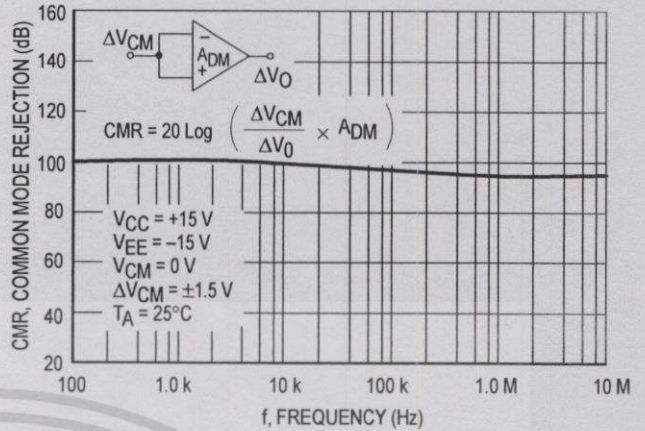


Figure 17. Total Harmonic Distortion versus Frequency

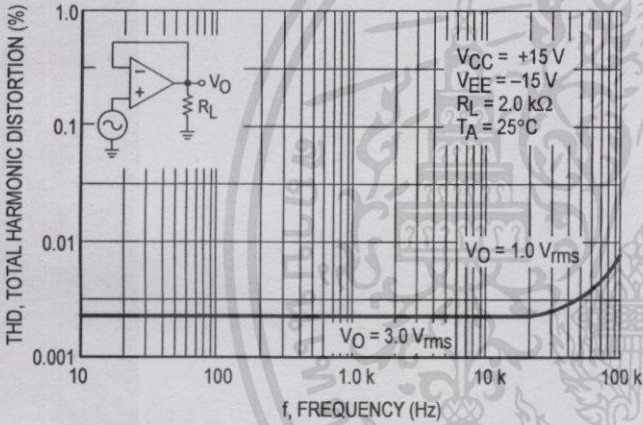


Figure 18. Input Referred Noise Voltage versus Frequency

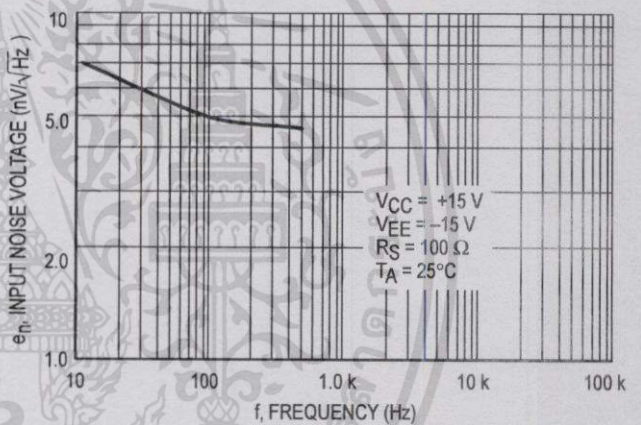


Figure 19. Input Referred Noise Current versus Frequency

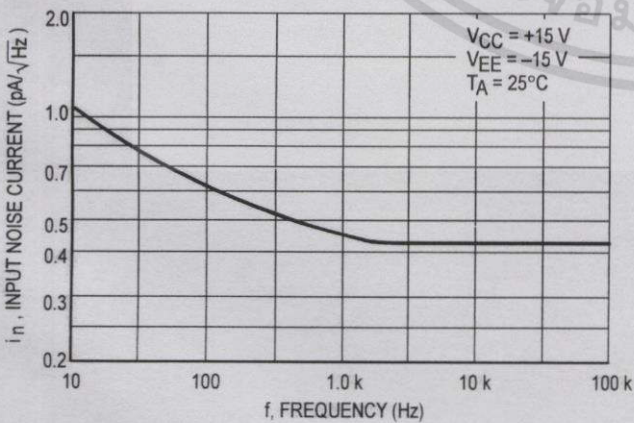


Figure 20. Input Referred Noise Voltage versus Source Resistance

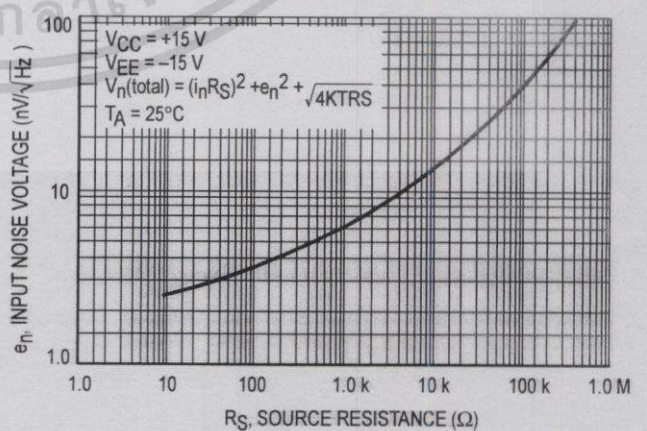


Figure 21. Inverting Amplifier

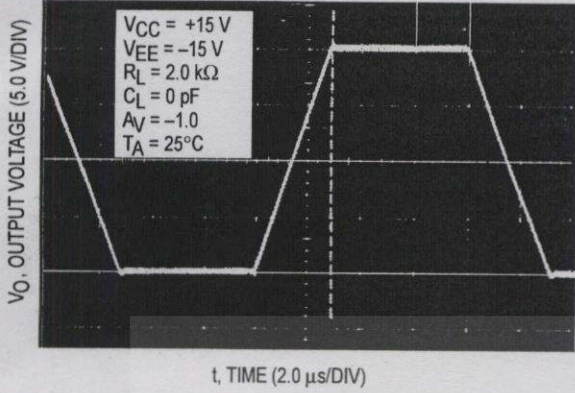


Figure 22. Noninverting Amplifier Slew Rate

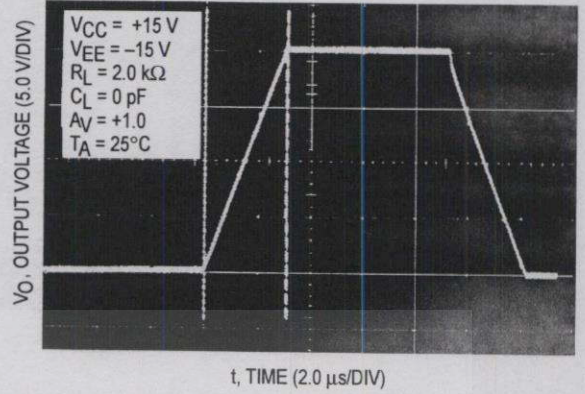


Figure 23. Noninverting Amplifier Overshoot

