

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของเทคนิคการวัดความถี่สั่นพ้อง
สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

A COMPARATIVE STUDY OF RESONANT FREQUENCY MEASUREMENT
TECHNIQUES FOR PIEZOELECTRIC ELEMENTS

ศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์
SUBHAWAT JAYASVASTI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำรงหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-080-141

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของเทคนิคการวัดความถี่สั่นพ้อง
สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

A COMPARATIVE STUDY OF RESONANT FREQUENCY MEASUREMENT
TECHNIQUES FOR PIEZOELECTRIC ELEMENTS



ศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์

SUBHAWAT JAYASVASTI

เลขที่.....
เลขทะเบียน 148265
ในเดือนปี 18 ต.ค. 2560

b. 112867854
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-080-141

A COMPARATIVE STUDY OF RESONANT FREQUENCY MEASUREMENT
TECHNIQUES FOR PIEZOELECTRIC ELEMENTS

SUBHAWAT JAYASVASTI

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-080-141

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของเทคนิคการวัดความถี่สั่นพ้องสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
Thesis Title A Comparative Study of Resonant Frequency Measurement Techniques for Piezoelectric Elements
นักศึกษา นายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์
รหัสประจำตัว 57601226
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ดอน อิศรากร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-080-141

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จกกล	งามวิวิทย์	
รศ.ดร.ถาวร	เบญจนราสุทธิ	
ผศ.ดร.นพดล	มณีรัตน์	
ดร.รัชณี	กุลยานนท์	
ผศ.ดร.ดอน	อิสรากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-306

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของเทคนิคการวัดความถี่สั่นพ้อง สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
นักศึกษา	นายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	57601226
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ดอน อิศรากร

บทคัดย่อ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานการสั่นสะเทือนได้ และธรรมชาติของวัสดุแข็งทุกชนิดจะมีความถี่สั่นพ้องอยู่ จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้เกิดการประยุกต์วัสดุเพียโซไปใช้ในหลายงาน เช่น อุปกรณ์เกี่ยวกับพลังงานจากการสั่นสะเทือน หรือเครื่องมือทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซโดยอาศัยพฤติกรรมความถี่สั่นพ้องของวัสดุ ดังนั้นจำเป็นต้องวัดความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซ ซึ่งสามารถวัดโดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีคแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีคแดนซ์ขนาดใหญ่ ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการวัดความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซจากการประยุกต์วงจรต่างๆ เพื่อให้เกิดเป็นเครื่องมือวัดความถี่สั่นพ้องขนาดพกพา สำหรับในงานวิจัยที่จำเป็นต้องการวัดความถี่สั่นพ้องด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการนำเสนอการวัดความถี่สั่นพ้อง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีคแดนซ์ ซึ่งประกอบด้วย 3 วงจร คือวงจร Wien Bridge Oscillator, Microcontroller Oscillator และ ชิพAD5933 และเทคนิคการสั่นทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 วงจรคือวงจร Pierce Gate Oscillator และวงจร Colpitts Crystal Oscillator จากการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชนิด PZT ที่แตกต่างกันจำนวน 5 แบบ โดยเทคนิคดังกล่าว แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกับเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีคแดนซ์รุ่น Bode 100 และนำเสนอตัวอย่างการประยุกต์นำวงจร Pierce Gate Oscillator มาใช้วัดความถี่สั่นพ้องของแผ่นควอทซ์คริสตัล เกิดเป็นเครื่องมือวัดทางชีวภาพแบบพกพาได้

Thesis	A Comparative Study of Resonant Frequency Measurement Techniques for Piezoelectric Elements
Student	Mr. Subhawatt Jayasvasti
Student ID.	57601226
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Don Isarakorn

ABSTRACT

Piezoelectric is a type of materials that can convert the vibrational energy into electrical energy or vice versa. This material is widely applied in various applications especially the transducer, actuator and sensor such as energy harvester for replacing or prolonging the batteries in wireless sensor node, ultrasonic transducer and biosensor. For these applications, the piezoelectric is operated at its resonant frequency to achieve the greatest performance. Therefore, the resonant frequency of piezoelectric material is the most important parameter required whether to design or fabricate the mentioned devices, which is generally measured by analyzing the impedance of piezoelectric material while oscillating in each frequency. Since the commonly used devices for measuring the resonant frequency have the complicated profile, large size and more expensive, therefore this thesis aims to propose the design and realization of the handheld devices with low profile, compact size and low cost. The fabricated devices operate with different techniques of resonant frequency measurement. For the electrotechnical impedance technique, a device is mainly composed of three parts as Wien Bridge Oscillator, Microcontroller Oscillator and a completed chip (AD5933). On the other hand, the electrical oscillation technique, a device consists of two circuits as Pierce Gate Oscillator and Colpitts Crystal Oscillator. Both of devices are validated by measuring the resonant frequency of piezoelectric PZT metatrail in five shapes, and comparing their performance to impedance analyzer (type Bode 100). Moreover, this thesis also presents the using of Pierce Gate Oscillator to measure the resonant frequency of quartz disc of crystal oscillator. As the results, this device can be fabricated as the biosensor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร อาจารย์ประจำภาควิชาการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา รวมถึงให้ความรู้ และประสบการณ์ระหว่างการศึกษาปริญญาโทของข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สองเมือง นันทขว้าง อาจารย์ประจำภาควิชาการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยในด้านการออกแบบโครงสร้างของระบบ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จคล่อง ข้าพเจ้าซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. พัฒนพงศ์ จันทร์พวง ประจำศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน และรองศาสตราจารย์ ดร. พัชรี เจียรนัยกูร ประจำภาควิชาเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนวัสดุพิเศษและควอทซ์คริสตัล

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา(สกอ.) และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทุนวิจัย

ในท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณบิดาและมารดาของผู้เป็นที่รักของข้าพเจ้าได้เลี้ยงดู อมรมสั่งสอน และสนับสนุนส่งเสริมข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทนี้

ศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก และความถี่สั่นพ้อง.....	5
2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 ความถี่สั่นพ้อง.....	6
2.3 การประยุกต์ใช้งานและการวัดค่า.....	8
2.4 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	10
2.4.1 วิธีการสั่นด้วยเครื่องสั่นสะเทือนพลังแม่เหล็กไฟฟ้า.....	12
2.4.2 วิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์.....	13
2.4.3 วิธีการสั่นทางไฟฟ้า.....	13
บทที่ 3 การออกแบบและการทดสอบการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	14
3.1 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์.....	14
3.2 เทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance Analysis).....	19
3.2.1 วงจรสร้างสัญญาณไซน์ (Wien Bridge Oscillator).....	19
3.2.2 สัญญาณพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	27
3.2.3 ไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (AD5933).....	31
3.3 เทคนิคการสั่นทางไฟฟ้า (Oscillation Technique).....	34
3.3.1 วงจร Pierce Gate Oscillator.....	34
3.3.2 วงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	39

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	42
4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซที่นำมาทดลอง.....	42
4.1.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 1.....	42
4.1.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 2.....	42
4.1.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 3.....	43
4.1.4 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 4.....	44
4.1.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 5.....	44
4.2 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซและการเปรียบเทียบ.....	45
4.2.1 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 1.....	45
4.2.2 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 2.....	46
4.2.3 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 3.....	47
4.2.4 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 4.....	48
4.2.5 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 5.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวัดค่า.....	50
5.1.1 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย Wien Bridge Oscillator.....	50
5.1.2 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย Microcontroller Oscillator.....	51
5.1.3 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย ไอซี AD5933.....	51
5.1.4 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยวงจร Pierce Gate Oscillator.....	52
5.1.5 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยวงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Bode 100.....	18
3.2 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Wien Bridge Oscillator.....	26
3.3 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Microcontroller Oscillator.....	30
3.4 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ AD5933.....	33
3.5 ค่าตัวเก็บประจุสำหรับเพียโซแต่ละชิ้นสำหรับวงจร Pierce และ Colpitts.....	38
3.6 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Pierce Oscillator.....	38
3.7 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปรัชญาการณเพียโซอเล็กทริก.....	1
1.2 อุปกรณ์ที่ใช้เพียโซอเล็กทริก.....	1
1.3 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Keysight E4990A และอุปกรณ์.....	2
2.1 ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของเพียโซ.....	5
2.2 การแกว่งของลูกตุ้มเพนดูลัม.....	6
2.3 เครื่องดนตรีจากแก้วไวน์.....	6
2.4 เพียโซชนิดต่างๆ.....	7
2.5 โหมดของการสั่นพ้องบนแผ่นโลหะกลม.....	7
2.6 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่น.....	8
2.7 หัววัดของเครื่องวัดมวลทางชีวภาพ.....	8
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Resistance Reactance.....	9
2.9 ความสัมพันธ์ของความถี่สั่นพ้องและอิมพีแดนซ์.....	9
2.10 ขนาดของเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Keysight E4990A.....	10
2.11 เครื่องมือวัดมวลทางชีวภาพ Q-Sense รุ่น QCM-D.....	10
2.12 แนวคิดเครื่องมือวัดทางชีวภาพขนาดพกพา.....	11
2.13 อุปกรณ์เก็บพลังงานจากการสั่น MicroGen.....	11
2.14 เครื่องสั่นพลังแม่เหล็กไฟฟ้า Electromagnetic Shaker.....	12
2.15 การบิดของวัสดุเพียโซจากการวัดด้วยเครื่อง Laser Doppler Vibrometer.....	12
2.16 การวัดค่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์.....	13
2.17 ภาพรวมวงจร Resonator สำหรับสร้างสัญญาณความถี่จากเพียโซ.....	13
3.1 แผ่นเพียโซ 5 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต เบอร์ ATmega328P.....	15
3.3 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Omicron Bode 100.....	15
3.4 โพรบสำหรับหนีบอุปกรณ์ที่นำมาวัดอิมพีแดนซ์.....	16
3.5 แสดงการตั้งค่าช่วงความถี่ที่จะวัดของเครื่อง Bode 100.....	16
3.6 แสดงแรงดันตกคร่อมในช่วงความถี่ต่างๆ ที่ขา Input1.....	17
3.7 หน้าต่างโปรแกรมสั่งการ Bode 100.....	17
3.8 หลักการอ่านค่าอิมพีแดนซ์.....	19
3.9 วงจร Wien Bridge Oscillator พื้นฐาน.....	19
3.10 Block Diagram ของระบบ.....	20
3.11 ผลตอบสนองของระบบ.....	20
3.12 ส่วนประกอบของวงจร Wien Bridge Oscillator.....	21
3.13 วงจร Band-Pass Filter ในวงจร Wien Bridge Oscillator.....	21

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 หลักการทำงานของวงจร Band-Pass Filter.....	22
3.15 สัญญาณจากวงจร Wien Bridge Oscillator ที่อัตราขยายเท่ากับ 3.....	23
3.16 หลอดไฟไส้โลหะ Rb สำหรับปรับอัตราขยาย.....	23
3.17 สัญญาณจากวงจร Wien Bridge Oscillator ที่ปรับอัตราขยายลดลง.....	24
3.18 วงจรปรับปรุงสัญญาณจากแอมพลิฟายด์เป็นแรงดัน.....	24
3.19 แรงดันจากการวัดที่ความถี่ 2 kHz ถึง 4 kHz.....	25
3.20 บอร์ดทดลองวงจร Wien Bridge Oscillator.....	25
3.21 การวัดความถี่สั้นพ้องด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	27
3.22 สัญญาณสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	27
3.23 แสดงหลักการทำงานของ Timer Counter ในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	28
3.24 แสดงอัตราการเพิ่มของความถี่ในแต่ละความถี่.....	29
3.25 แรงดันจากการวัดที่ความถี่ 2 KHz ถึง 4 KHz.....	29
3.26 ชิพไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ AD5933.....	31
3.27 โครงสร้างภายในของไอซี AD5933.....	31
3.28 สัญญาณรูปไซน์แบบ Sweep ความถี่.....	32
3.29 บอร์ดสำเร็จรูปของไอซี AD5933.....	32
3.30 วิธีการนับความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
3.31 ไอซี Pierce Oscillator เบอร์ SN74LVC1GX04.....	34
3.32 วงจร Pierce Oscillator.....	35
3.33 ไอซี Not Gate HEF4069UB.....	35
3.34 หลักการทำงานของวงจร Pierce Oscillator.....	36
3.35 สัญญาณที่ออกจากวงจร Pierce Oscillator.....	36
3.36 วงจรปรับปรุงสัญญาณให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม.....	37
3.37 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจาก Not Gate.....	37
3.38 บอร์ดทดลองวงจร Pierce Oscillator.....	37
3.39 วงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	39
3.40 สัญญาณจากวงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	39
3.41 วงจรปรับปรุงสัญญาณรูปไซน์เป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	40
3.42 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากวงจรปรับปรุงสัญญาณด้วย Comparator.....	40
3.43 บอร์ดทดลองวงจร Colpitts Crystal Oscillator.....	40
4.1 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซซินท์ที่ 1.....	42
4.2 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซซินท์ที่ 2.....	42
4.3 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซซินท์ที่ 3.....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

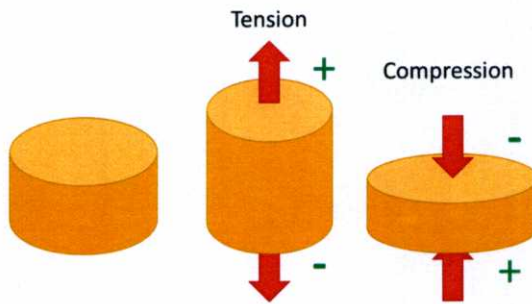
รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงความถี่สั่นพ้องของเพียโซชิ้นที่ 3 ที่ 40 kHz	43
4.5 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชิ้นที่ 4	44
4.6 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชิ้นที่ 5	44
4.7 การเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 1	45
4.8 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 1	45
4.9 การเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 2	46
4.10 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซ 2	46
4.11 การเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 3	47
4.12 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซ 3	47
4.13 การเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 4	48
4.14 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซ 4	48
4.15 การเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 5	49
4.16 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซ 5	49

บทที่ 1

บทนำ

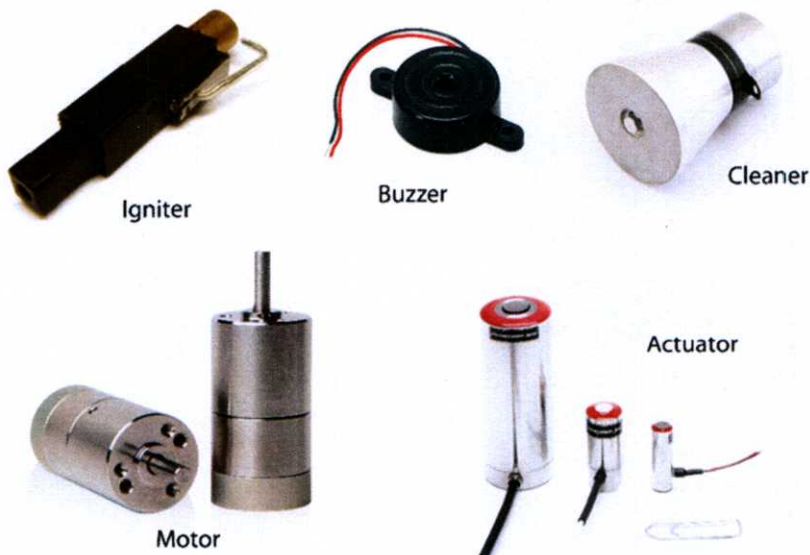
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือปรากฏการณ์ของวัสดุบางชนิด เมื่อใส่แรงกดเข้าไปทำให้โครงสร้างผลึกผิดรูปจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวทั้งสองฝั่งของวัสดุ และเมื่อใส่แรงดึงก็จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นในทิศทางกลับกันกับใส่แรงกด ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

จากคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกทำให้สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าจากการสั่นสะเทือนจากการออกแบบโครงสร้างให้วัสดุเพียโซเกิดการยืดหดขณะที่กำลังสั่นสะเทือน เช่น อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือน เป็นต้น และสามารถใส่สัญญาณความถี่ทำให้วัสดุเพียโซเกิดการสั่นสะเทือนได้ เช่น Buzzer, Ultrasonic Cleaning, เซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางชีวภาพ เป็นต้น ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะใช้หลักการสั่นพ้องในของวัสดุของเพียโซที่เป็นของแข็ง

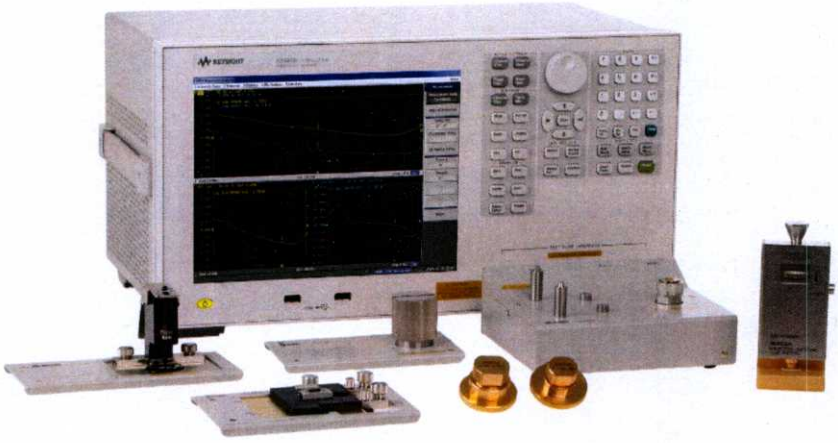


รูปที่ 1.2 อุปกรณ์ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริก

ในการออกแบบอุปกรณ์เพียโซเหล่านี้ความถี่สั่นพ้องเป็นส่วนสำคัญที่สุด เนื่องจากความถี่สั่นพ้องเป็นตัวแปรที่แปรผกผันกับขนาดและมวลของวัสดุ การทำให้อุปกรณ์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นจะต้องทำให้ความถี่สั่นพ้องของอุปกรณ์ตรงกับความถี่จากภายนอก หรือความถี่ที่ออกแบบไว้ การวัดความถี่สั่นพ้องของอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ

การวัดความถี่สั่นพ้องปกติแล้วมักใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Imepdance Analyzer) [1-4] การทำงานของเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์นี้ จะสร้างสัญญาณความถี่และแอมพลิจูดขนาดหนึ่ง ผ่านวัสดุเพียโซและอ่านสัญญาณขาออกทั้งเฟสและแอมพลิจูด เพื่อนำมาคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ โดยความถี่ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดเป็นความถี่สั่นพ้องของอุปกรณ์ ซึ่งมีลักษณะกราฟเป็นยอดแหลมชี้ลง

เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เป็นเครื่องมือวัดที่มีขนาดใหญ่ ราคาสูง และสามารถใช้งานได้หลายฟังก์ชัน ดังรูปที่ 1.3 ทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้วัดเพียงความถี่สั่นพ้องของเพียโซในงานบางประเภทที่ต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก พกพาได้ หรือเป็นเครื่องมือวัดที่มีราคาถูก เช่น อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบปรับความถี่สั่นพ้องอัตโนมัติ เครื่องมือวัดมวลทางชีวภาพในขนาดพกพา เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ทำให้เกิดงานวิจัยการออกแบบวงจรในการวัดค่าความถี่สั่นพ้องให้มีความซับซ้อนน้อยลง และมีต้นทุนต่ำลง



รูปที่ 1.3 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Keysight E4990A และอุปกรณ์ [54]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวงจรในการวัดค่าความถี่สั่นพ้องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทรอนิกส์พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองและสรุปผล เพื่อสามารถนำวงจรเหล่านี้ไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่อไปได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สืบค้นและประยุกต์วงจรและวิธีการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความซับซ้อนน้อยและราคาถูก สำหรับหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพต่ำ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
2. ทดลอง เปรียบเทียบ และสรุปข้อดีข้อเสีย เพื่อสามารถนำวงจรหรือวิธีการเหล่านี้ไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่อไปได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาค้นคว้าและประยุกต์วงจรไฟฟ้าและวิธีการในการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซโดยจะเน้นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย มีต้นทุนต่ำ และเหมาะสมกับหน่วยประมวลผลที่มีประสิทธิภาพต่ำ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพแล้วสรุปผลข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการ และเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีแดนซ์รุ่น Bode 100

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้ารวบรวม
 ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก เพื่อนำไปค้นคว้าวงจร Oscillator และวิธีการวัดค่าฮาร์มอนิกพีแดนซ์ต่างๆ ที่จะนำมาประยุกต์สำหรับใช้กับวัสดุเพียโซได้
2. ดัดแปลงและประยุกต์
 หลังจากได้รวบรวมวงจรแล้ว จะเป็นการนำมาปรับปรุงและประยุกต์ให้เข้ากับคุณสมบัติของวัสดุเพียโซ
3. ทดสอบเก็บค่า
 ขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อเก็บค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับกันระหว่างแต่ละวงจรแต่ละวิธีในการวัด
4. เปรียบเทียบ
 ค่าที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละวงจรที่ได้ออกแบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพความเที่ยงตรงและความแม่นยำ โดยจะใช้เครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีแดนซ์เป็นเครื่องมืออ้างอิง
5. วิเคราะห์สรุปผล
 วิเคราะห์ข้อมูลจากการเปรียบเทียบข้อมูลของวงจรข้างต้น เพื่อสรุปว่าระบบการวัดใดเหมาะสมกับการนำไปใช้งานแบบใดเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์และพัฒนาใช้ในงานวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วงจรถูกใช้สำหรับการวัดค่าความถี่สัญญาณวิทยุที่มีความซับซ้อนน้อยและมีต้นทุนที่ต่ำสำหรับนำไปประยุกต์ และพัฒนาใช้ในงานวิจัยที่ต้องการอุปกรณ์การวัดค่าความถี่สัญญาณตามความเหมาะสม

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 2 จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและความถี่สัญญาณในวัสดุ และการประยุกต์ใช้พฤติกรรมหรือปรากฏการณ์เหล่านี้ รวมถึงเทคนิควัดค่า

บทที่ 3 การประยุกต์วงจรถูกเพื่อให้ได้วงจรถูกสำหรับวัดค่าความถี่สัญญาณของเพียโซ และบันทึกค่าผลการทดลอง

บทที่ 4 วิเคราะห์ปรากฏการณ์พฤติกรรมของความถี่สัญญาณในเพียโซ พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อมูลผลการทดลอง

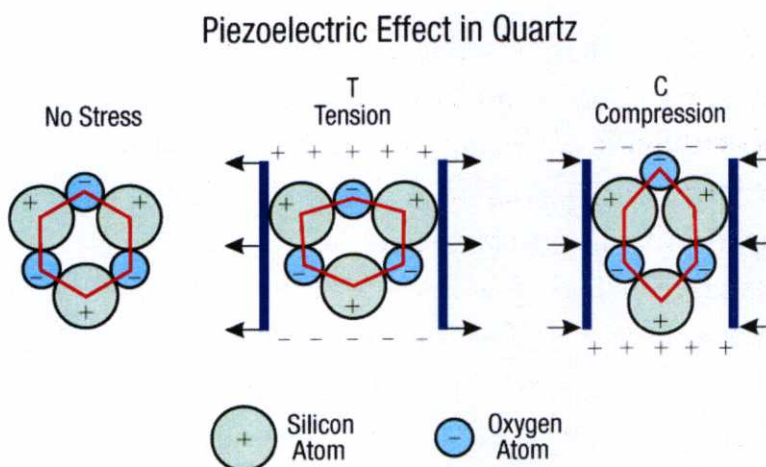
บทที่ 5 สรุปผลการเปรียบเทียบการวัดค่าความถี่สัญญาณของเพียโซพร้อมทั้งสรุป ข้อดีข้อเสีย และความเหมาะสมของวงจรถูกกล่าว

บทที่ 2

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก และความถี่สั่นพ้อง

2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือปรากฏการณ์ของวัสดุบางชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วโดยที่มีอะตอมในโครงผลึกไม่สมมาตรกันมีผลทำให้เกิดไดโพล (Electric dipole) เมื่อใส่แรงกดเข้าไปทำให้โครงสร้างผลึกผิดรูปจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวทั้งสองฝั่งของวัสดุ และเมื่อใส่แรงดึงก็จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นในทิศทางกลับกันกับใส่แรงกด [5-6] ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของผลึกควอตซ์ (Quartz Crystal) ที่มีอะตอมของออกซิเจนซึ่งมีประจุเป็นลบและซิลิคอนซึ่งมีประจุเป็นบวกอยู่ เมื่อมีแรงมากกระทำทำให้โครงสร้างผลึกเสียรูป เกิดความเค้นในเนื้อวัสดุจะทำให้ประจุของผลึกไม่สมมาตร เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct Effect) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผิวทั้งสองด้านของวัสดุเพียโซนั้น



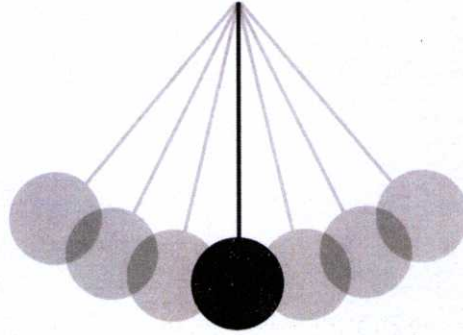
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของเพียโซ [52]

ในทางกลับกันเมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ผิวของวัสดุเพียโซทั้งสองด้านนั้น จะทำให้วัสดุเพียโซเกิดการยืดหรือหดหรือผิดรูปไปจากเดิม เพื่อเกิดความสมดุลของประจุในเนื้อวัสดุ เรียกว่าปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ (Reverse Effect)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุชนิดนี้ขึ้นมาก โดยวัสดุที่เกิดจากสารแต่ละชนิดก็จะให้คุณสมบัติแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของจุดประสงค์การพัฒนา

2.2 ความถี่สั้นพ้อง

ปรากฏการณ์สั้นพ้องของของแข็งคือการที่ของแข็งขยับหรือเคลื่อนกลับไปมาที่ความถี่ธรรมชาติเช่นลูกตุ้มเพนดูลัม [8] ดังรูปที่ 2.2 โดยความถี่ธรรมชาติของลูกตุ้มเพนดูลัมนั้นจะแปรผกผันกับความยาวของเชือกหรือแกนที่ยึดลูกตุ้ม กล่าวคือที่ความยาวลูกตุ้มเท่ากันจะแกว่งหรือใส่แรงให้เกิดแอมพลิจูดการแกว่งสูงเท่าใดก็จะได้ความถี่การแกว่งเท่าเดิมซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติ



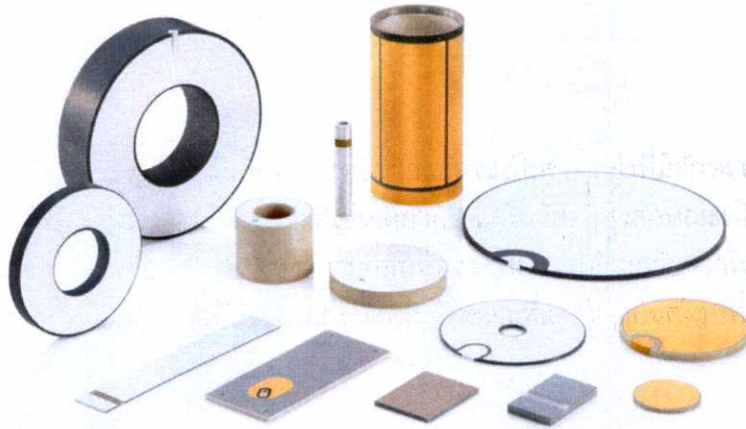
รูปที่ 2.2 การแกว่งของลูกตุ้มเพนดูลัม

ในวัสดุของแข็งก็จะมี การสั่นสะเทือนหรือความถี่ธรรมชาติเช่นเดียวกัน [7] ตัวอย่างเช่นเครื่องดนตรี Glass Harmonica [9] ดังรูปที่ 2.3 การนำนิ้วไปถูวนบริเวณปากแก้วไวน์นั้นจะทำให้แก้วไวน์เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น จะมีเพียงความถี่เดียวที่จะเกิดแอมพลิจูดสูงที่สุดเป็นความถี่ธรรมชาติของแก้วไวน์นั้นและเกิดเป็นเสียงออกมา ความถี่ธรรมชาติของแก้วไวน์นั้นจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยปริมาณของเหลวในแก้ว โดยความถี่สั้นพ้องจะแปรผกผันกับมวลของเหลวที่ใส่ลงไป กล่าวคือเมื่อใส่ของเหลวลงไปมากขึ้นเสียงจะทุ้มลง

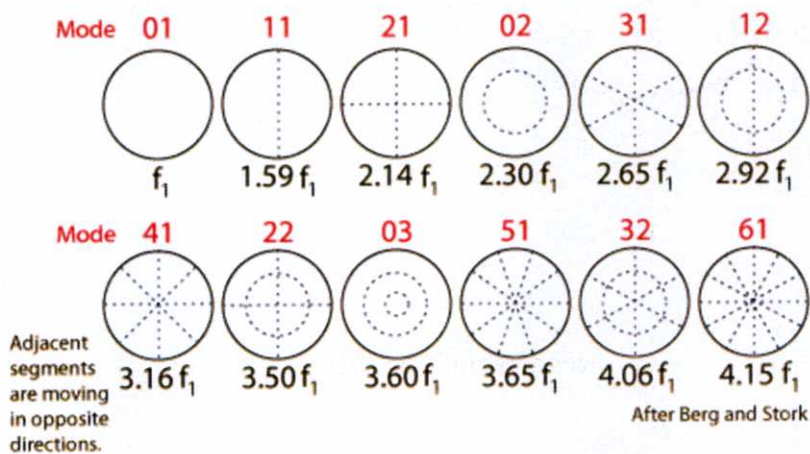


รูปที่ 2.3 เครื่องดนตรีจากแก้วไวน์

เช่นเดียวกับในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยมากแล้วจะเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่นขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 2.4 จึงมีความถี่ธรรมชาติเช่นเดียวกัน แต่ในวัสดุแข็งลักษณะเป็นแผ่นนั้นความถี่ธรรมชาติอาจจะไม่ได้มีค่าเดียว[10-12] ซึ่งความถี่สั่นพ้องแต่ละความถี่จะเรียกว่าโหมด (Mode) ซึ่งแต่ละโหมดจะมีการสั่นหรือการบิดเบี้ยวของแผ่นวัสดุในลักษณะที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 เพียโซชนิดต่างๆ



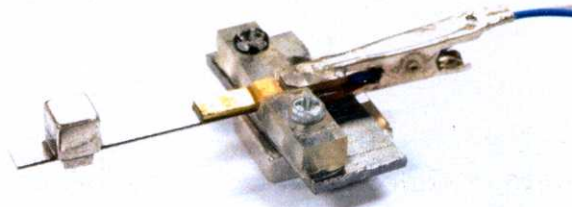
รูปที่ 2.5 โหมดของการสั่นพ้องบนแผ่นโลหะกลม

วัสดุเพียโซที่มีความถี่สั่นพ้องมากกว่าหนึ่งโหมดนั้นมักจะมีโหมดที่มีการสั่นรุนแรงที่สุด กล่าวคือเมื่อใส่แรงไปเท่ากันจะได้แอมพลิจูดมากที่สุด [11-12] โดยมากจะเป็นการสั่นที่โหมดแรกหรือโหมดที่มีความถี่ต่ำสุด จากพฤติกรรมเหล่านี้จึงสามารถนำวัสดุชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ได้มากมาย

2.3 การประยุกต์ใช้งานและการวัดค่า

จากพฤติกรรมการสั่นพ้องของวัสดุเพียโซนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งในปรากฏการณ์แบบตรง (Direct Effect) และปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ (Reverse Effect)

การประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซในปรากฏการณ์แบบตรง เช่นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนแบบ Resonant Type ดังรูปที่ 2.6 เป็นการนำแผ่นเพียโซแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ายึดกับแท่นที่ปลายด้านหนึ่ง นำมวลมาติดที่ปลายอีกด้านหนึ่ง แล้วนำไปติดกับเครื่องจักรที่ต้องการเก็บเกี่ยวพลังงาน [13-15] โดยปรับความถี่สั่นพ้องของอุปกรณ์ให้พอดีกับความถี่การสั่นของเครื่องจักรที่นำไปติดตั้ง ด้วยกาปรับได้ที่มวลและระยะของมวล หากมวลมากขึ้นหรือระยะที่ไกลขึ้นจะทำให้ความถี่สั่นพ้องของอุปกรณ์ลดต่ำลง



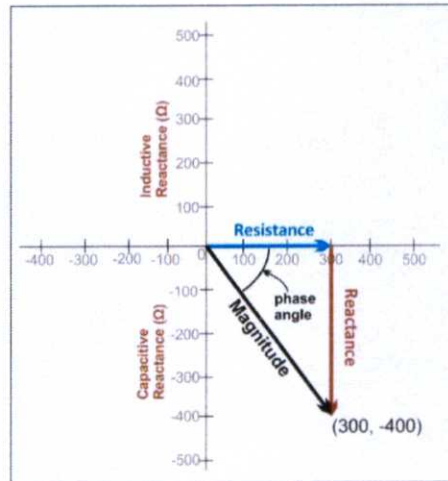
รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่น

การประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซในปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ เช่นอุปกรณ์ตรวจวัดมวลทางชีวภาพ [16-24] ดังรูปที่ 2.7 อุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้แผ่นควอทซ์ซึ่งเป็นเพียโซชนิดหนึ่งที่มีความถี่สั่นพ้องเด่นมากที่สุดที่โหมดเดียวในระดับเมกะเฮิรต ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้สำหรับตรวจวัดมวลที่มาเกาะกับแผ่นควอทซ์โดยอาศัยปรากฏการณ์สั่นพ้องในการคำนวณหามวล โดยถ้ามวลมาเกาะมากขึ้นจะทำให้ความถี่สั่นพ้องของแผ่นควอทซ์นั้นลดลง ทำให้สามารถวัดมวลได้ถึงระดับนาโนกรัม



รูปที่ 2.7 หัววัดของเครื่องวัดมวลทางชีวภาพ

จากการประยุกต์คุณสมบัติการสั่นพ้องของวัสดุเพียโซนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซหรืออุปกรณ์นั้นๆ ได้ โดยปกติแล้วการใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เป็นวิธีที่ง่ายและนิยม หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ คือ ตัวเครื่องจะส่งสัญญาณรูปไซน์ผ่านตัวต้านทานที่กำหนดค่าไว้และอนุกรมกับอุปกรณ์ที่นำมาวัด แล้วเครื่องจะทำการวัดแอมพลิจูดและเฟสเทียบกับระหว่างขาทั้งสองของอุปกรณ์ที่นำมาวัด โดยที่แอมพลิจูดที่เปลี่ยนไปหมายถึงค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ส่วนเฟสที่เปลี่ยนไปจะเป็นค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) [25-26] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Resistance Reactance

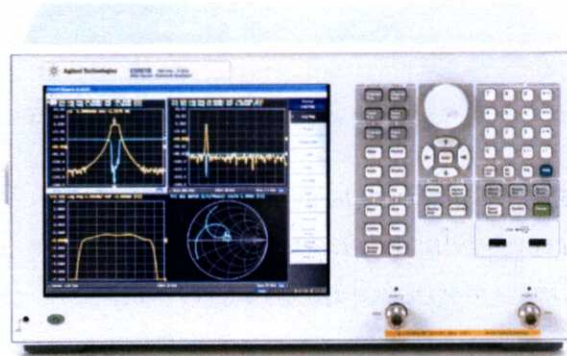
เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์จะทำการปรับความถี่ตามที่ตั้งค่าไว้ คือความถี่เริ่มต้น และความถี่สุดท้าย แล้วทำการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละความถี่ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ จะถูกพล็อตออกมาเป็นกราฟแมกนิจูด (Magnitude) ต่อความถี่ ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ความถี่ที่มีแมกนิจูดหรืออิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดมีลักษณะเป็นยอดแหลมซึ่งหมายถึงความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซนั้นๆ



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความถี่สั่นพ้องและอิมพีแดนซ์

2.4 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance Analyzer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เป็นเครื่องมือวัดขั้นสูงที่มีขนาดใหญ่และราคาที่สูงมากดังรูปที่ 2.10 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Keysight E4990A ในขณะที่งานบางประเภทใช้เพียงบางฟังก์ชัน และต้องการขนาดที่เล็ก ความซับซ้อนน้อย ราคาถูก



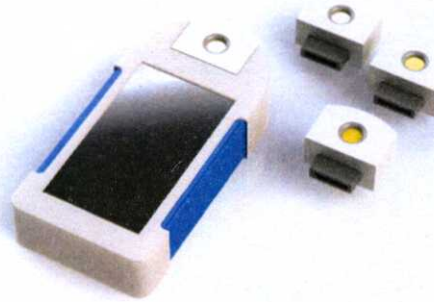
รูปที่ 2.10 ขนาดของเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Keysight E4990A

ตัวอย่างเช่นเครื่องมือวัดปริมาณทางชีวภาพ Q-Sense รุ่น QCM-D ดังรูปที่ 2.11 เป็นเครื่องมือวัดปริมาณทางชีวภาพในระดับนาโนกรัมสำหรับใช้วัดสารทางชีวภาพเช่น กรดอะมิโน ฮอร์โมน เซลล์ โปรตีน เป็นต้น โดยใช้วิธีการไหลตสารที่ต้องการวัดลงแผ่นควอทซ์ และใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์วัดค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไป โดยความถี่จะลดลงเมื่อมีมวลมาเกาะมากขึ้น และนำค่าความถี่นั้นไปคำนวณเป็นมวล เครื่องนี้จะมีลักษณะเป็นตู้ที่ยึดแผ่นควอทซ์สำหรับใส่สารที่ต้องการวัด และตู้ที่เป็นเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และราคาสูง



รูปที่ 2.11 เครื่องมือวัดมวลทางชีวภาพ Q-Sense รุ่น QCM-D [56]

ขณะที่ในบางสถานการณ์ต้องการวัดค่านอกสถานที่ และต้องการวิเคราะห์เบื้องต้น ไม่จำเป็นต้องความละเอียดที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.12 จึงต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง



รูปที่ 2.12 แนวคิดเครื่องมือวัดทางชีวภาพขนาดพกพา

ในอีกตัวอย่างที่ใช้ปรากฏการณ์ตรงของเพียโซอิเล็กทริก (Direct Effect) คืออุปกรณ์ผลิตพลังงานจากแรงสั่นสะเทือน [28-32] ดังรูปที่ 2.13 อุปกรณ์ชิ้นนี้จะทำหน้าที่เก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหรือแหล่งการสั่นต่างๆ แล้วนำพลังงานที่ได้ไปใช้ในอุปกรณ์ เช่น เซ็นเซอร์ติดตามสภาพเครื่องจักร โดยที่ไม่จำเป็นต้องต่อแหล่งพลังงานหรือแบตเตอรี่เข้าเข้าอุปกรณ์ ผู้ผลิตต้องทำการปรับค่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซให้เท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดการสั่นนั้นๆ โดยการถ่วงมวล หรือปรับระยะมวลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

BOLT™ Energy Harvesting Products



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์เก็บพลังงานจากการสั่น MicroGen

ในงานประเภทแหล่งกำเนิดการสั่นจะมีความถี่ไม่คงที่ จะทำให้อุปกรณ์สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้น้อย เนื่องจากจะสามารถเก็บได้เฉพาะเวลาที่สั่นความถี่ตรงกับความถี่สั่นพ้อง จึงต้องสร้างระบบให้สามารถปรับความถี่สั่นพ้องได้อัตโนมัติ จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์การวัดความถี่สั่นพ้องที่มีขนาดเล็กและใช้พลังงานต่ำอยู่ในอุปกรณ์ด้วยจึงเป็นอีกหนึ่งในที่มาของงานวิจัยนี้

ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการรวบรวมเพื่อ ดัดแปลงประยุกต์วงจรเพื่อวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แล้วนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติ

จากการศึกษาพบว่าหลักในการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซนั้นมีด้วยกันอยู่ 3 วิธีการ

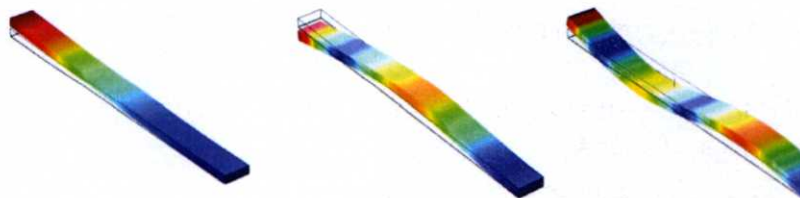
2.4.1 วิธีการสั่นด้วยเครื่องสั่นสะเทือนพลังแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.14 เครื่องสั่นพลังแม่เหล็กไฟฟ้า Electromagnetic Shaker

การนำเพียโซไปสั่นด้วยแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่สามารถตั้งค่าความถี่ได้ เช่น Electromagnetic Shaker ขนาดใหญ่ [27] ดังรูปที่ 2.14 ในวิธีการนี้ จะเป็นการสั่นวัสดุเพียโซด้วยความถี่ที่กำหนดต่างๆ แล้ววัดแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซด้วย Oscilloscope ในความถี่ที่เกิดสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงสุดจากเพียโซ นั่นคือความถี่สั่นพ้อง

นอกจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถวัดความถี่สั่นพ้องจากเครื่อง Laser Doppler Vibrometer เพื่อดูการขยับของแผ่นเพียโซที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจะสามารถดูลักษณะการบิดงอของวัสดุเพียโซในโหมดต่างๆได้ดังรูปที่ 2.15

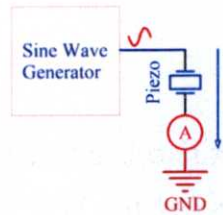


รูปที่ 2.15 การบิดของวัสดุเพียโซจากการวัดด้วยเครื่อง Laser Doppler Vibrometer [53]

2.4.2 วิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์

จากเทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการวัดเพียงค่าความถี่สั่นพ้อง จึงสามารถประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ด้วยการจำกัดความสามารถในการวัดเหลือเพียงความถี่เท่านั้น ทำให้สามารถลดความซับซ้อนของเครื่องมือลงได้

การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยเทคนิคนี้สามารถทำได้ด้วยการผ่านสัญญาณรูปไซน์ที่ควบคุมเพียงตัวแปรความถี่ ไปยังวัสดุเพียโซ และวัดกระแสที่ไหลผ่านวัสดุเพียโซนั้น ทำให้ได้ค่าความต้านทานในแต่ละความถี่ ค่าความถี่ที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่ำสุดเป็นความถี่สั่นพ้อง ดังรูปที่ 2.16

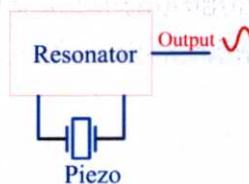


รูปที่ 2.16 การวัดค่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์

จากแนวคิดดังกล่าวจึงได้เลือกวงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์อย่างง่ายที่สามารถปรับความถี่ได้มาหนึ่งวงจร คือวงจร Wien Bridge Oscillator และเปรียบเทียบกับกรวัดด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อดูพฤติกรรมและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

2.4.3 วิธีการสั่นทางไฟฟ้า

วิธีที่สามคือเทคนิคการสั่นทางไฟฟ้า (Oscillation Technique) เป็นการสร้างวงจรไม่สมดุลเพื่อให้เกิดการ Oscillation ด้วยวงจร Resonator ดังรูปที่ 2.17 ที่กำหนดความถี่ได้ด้วยแผ่นควอทซ์ซึ่งแผ่นควอทซ์เป็นวัสดุเพียโซชนิดหนึ่ง โดยวงจรนี้ทำให้เกิดความไม่สมดุลในวงจรและเกิดสัญญาณความถี่ขึ้นที่ตำแหน่งความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซ



รูปที่ 2.17 ภาพรวมวงจร Resonator สำหรับสร้างสัญญาณความถี่จากเพียโซ

จากแนวคิดดังกล่าวได้เลือกวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาในวงจรดิจิทัล คือวงจร Pierce Gate Oscillator และวงจรสร้างสัญญาณวิทยุ คือวงจร Colpitts Crystal Oscillator ซึ่งใช้สร้างความถี่จากแผ่นควอทซ์คริสตัลมาปรับปรุง เพื่อให้สามารถสร้างความถี่จากแผ่นเพียโซชนิดอื่นได้

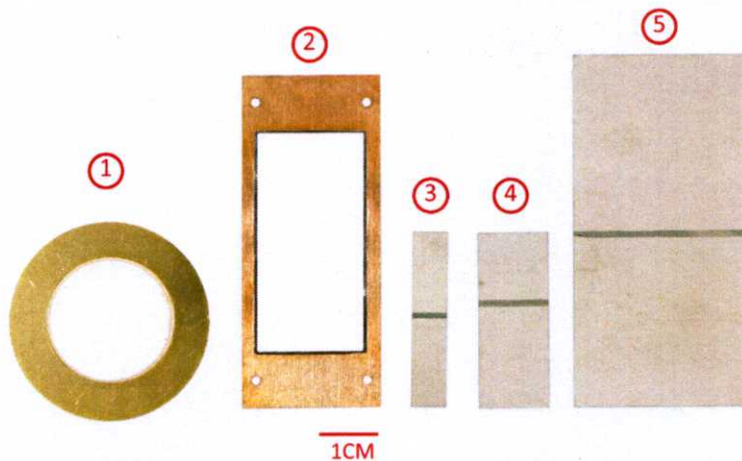
บทที่ 3

การออกแบบและการทดลอง

การวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

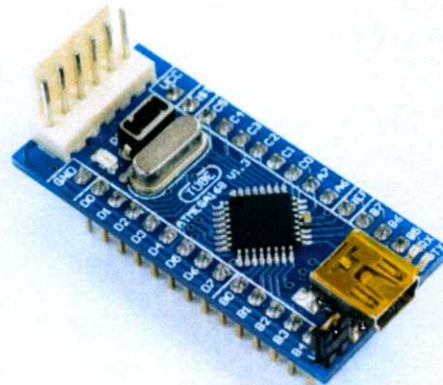
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองวัดค่าความถี่สั่นพ้องจากวงจรต่างๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวงจร และวิเคราะห์ผลการทดลองบทถัดไป

ในการทดลองจะอ่านค่าความถี่สั่นพ้องจากตัวอย่างวัสดุเพียโซซึ่งประกอบด้วย Piezo Buzzer ลักษณะแผ่นวงกลม และ Piezo Cantilever เป็นลักษณะแท่งสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.1 เพื่อวิเคราะห์ผลจากการวัดของแต่ละวิธี ในการทดลองจะทำการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของแต่ละวงจรจะใช้วัสดุเพียโซแผ่นเดียวกันจำนวน 20 ครั้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของแต่ละวงจร เปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้เครื่อง Impedance Analyzer อ้างอิง



รูปที่ 3.1 แผ่นเพียโซ 5 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

- ชั้นที่ 1 คือเพียโซไซเซอร์ (Piezo Buzzer) ที่ใช้ในงานขับเสียง เป็นชนิด PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.5 มม. และ Substrate ทองเหลืองขนาด 36 มม.หนา 0.3 มม.
- ชั้นที่ 2 คือ Piezo Bending Actuator แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชนิด PZT ขนาด 20x40 มม. ติดกับ Substrate ทองแดงขนาด 25x60 มม.หนา 0.3 มม.
- ชั้นที่ 3 คือ Piezo Cantilever แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชนิด PZT 6.4x31.8 มม.หนา 0.5 มม.
- ชั้นที่ 4 คือ Piezo Cantilever แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชนิด PZT 12.7x31.8 มม.หนา 0.66 มม.
- ชั้นที่ 5 คือ Piezo Cantilever แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชนิด PZT 31.8x63.5 มม.หนา 0.51 มม.



รูปที่ 3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต เบอร์ ATmega328P

จากแนวคิดที่ต้องการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจรที่มีความซับซ้อนน้อยสำหรับอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพต่ำ จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ที่มีความเร็วสูงสุดเพียง 16 MHz ดังรูปที่ 3.2 เพื่อมาใช้ในการวัดค่าความถี่สั่นพ้อง โดยประยุกต์และออกแบบวิธีการวัด เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพต่ำนี้สามารถวัดค่าความถี่สั่นพ้องได้

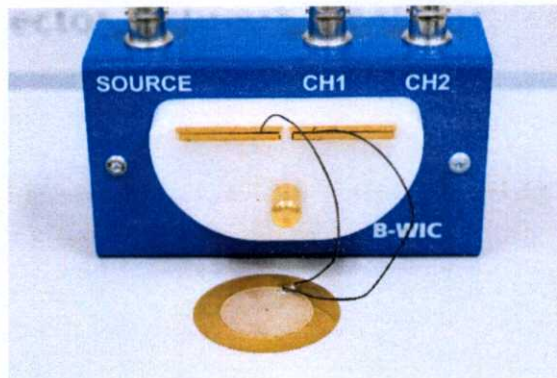
3.1 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์

ในงานวิจัยนี้จะใช้การวัดค่าความถี่สั่นพ้องจากเครื่อง Impedance Analyzer ซึ่งเป็นการวัดแบบมาตรฐาน เพื่อใช้อ้างอิงของวงจรอื่นๆ และเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรมันๆ โดยเครื่อง Impedance Analyzer ที่นำมาใช้อ้างอิงนั้นทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องยี่ห้อ Omicron รุ่น Bode 100 ในการวัด ดังรูปที่ 3.3



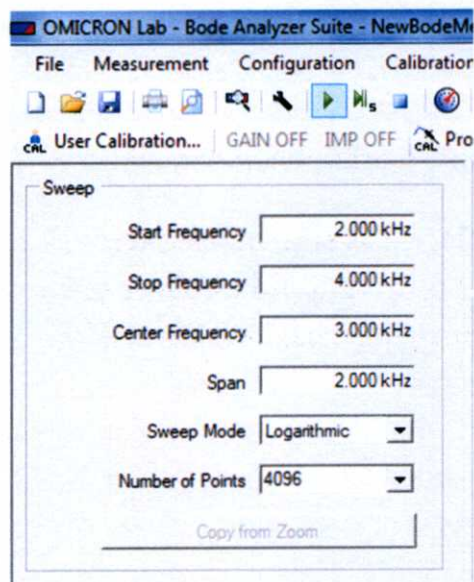
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Omicron Bode 100

การใช้งานเครื่อง Impedance Analyzer รุ่น Bode 100 เครื่องจะส่งสัญญาณความถี่ออกมาทางขา Output มายังขาข้างหนึ่งของวัสดุเพียโซและเข้าที่ Input 1 ด้วย แล้วขาอีกข้างหนึ่งจะต่อเข้ากับ Input 2 ดังรูปที่ 3.4 เครื่องมือจะทำการวัดแรงดันตกคร่อมและเฟสระหว่างขา Input 1 และขา Input 2 และวัดกระแสที่ผ่านเข้าขา Input 2 เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นค่าอิมพีแดนซ์และแสดงข้อมูลเป็นกราฟอิมพีแดนซ์ต่อความถี่บนคอมพิวเตอร์



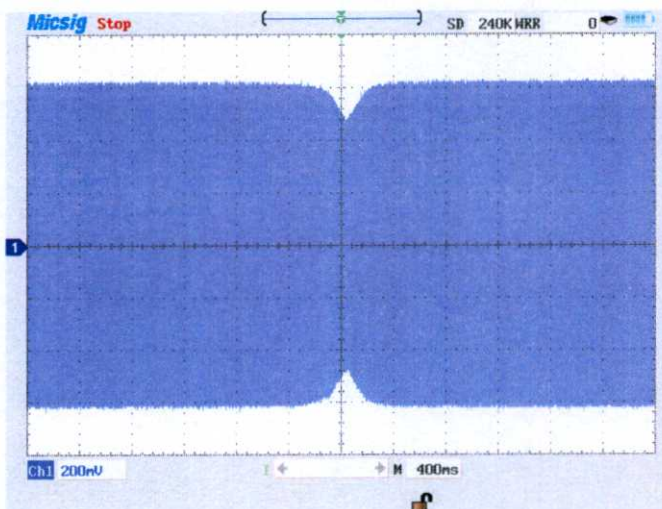
รูปที่ 3.4 โพรบสำหรับหนีบอุปกรณ์ที่นำมาวัดอิมพีแดนซ์

หลังจากต่อเพียโซเข้ากับวัสดุในการวัดจะต้องมีการตั้งค่าเครื่องมือวัด โดยสามารถตั้งค่าได้ทั้งความถี่เริ่มต้น ความถี่สุดท้าย การเพิ่มความถี่แบบ Linear และแบบ Logarithmic ตั้งค่าความละเอียดต่างๆ เพื่อความแม่นยำในการวัดได้ ดังรูปที่ 3.5 โดยหากตั้งความละเอียดในการวัดสูง เครื่องจะใช้เวลาในการวัดที่นานขึ้น



รูปที่ 3.5 การตั้งค่าช่วงความถี่ที่จะวัด ของเครื่อง Bode 100

สัญญาณที่ออกมาจากเครื่อง Bode 100 นั้นจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่จะปรับ Sweep ไปตามค่าที่ได้ตั้งไว้จากคอมพิวเตอร์ดังรูป 3.5 และเมื่อผ่านสัญญาณนี้ไปยังวัสดุเพียโซจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่วัสดุในแต่ละความถี่ดังรูปที่ 3.6 สามารถดูได้จากความถี่ที่มีแรงดันตกคร่อมน้อยที่สุดคือความถี่สั้นพ้องดังกล่าวในข้างต้น จะมีแอมพลิจูดลดลงไป



รูปที่ 3.6 แรงดันตกคร่อมในช่วงความถี่ต่างๆ ที่ขา Input 1

เมื่อเครื่อง Bode 100 อ่านค่าและวิเคราะห์เสร็จ จะส่งข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงเป็นกราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ จากรูปที่ 3.7 หน้าต่างโปรแกรมของเครื่อง Bode 100 แสดงให้เห็นว่าวัสดุเพียโซสามารถมีความถี่สั้นพ้องได้มากกว่า 1 โหมด โดยดูจากกราฟยอดแหลมซึ่งจะเป็นความถี่สั้นพ้อง



รูปที่ 3.7 หน้าต่างโปรแกรมสั่งการ Bode 100

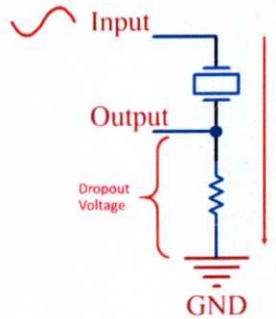
จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซทั้งห้าชนิดจากการวัดด้วยเครื่อง Bode 100 เป็นจำนวน 20 ครั้ง พร้อมค่ากลางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า ค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีแดนซ์รุ่น Bode 100 มีความละเอียดอยู่ที่ 0.1 Hz และมีการกระจายของข้อมูลที่ต่ำกว่า 1 Hz

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีแดนซ์ Bode 100

Impedance Analyzer Omicron Bode 100					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2622.6	4220.3	1366.4	1790.1	1845.9
2	2622.7	4220.1	1366.5	1791.1	1845.7
3	2622.5	4219.8	1366.3	1790.9	1846.0
4	2622.2	4219.7	1366.2	1791.0	1846.4
5	2622.4	4219.9	1366.0	1790.8	1846.2
6	2622.2	4220.0	1366.3	1790.9	1846.0
7	2622.1	4220.1	1366.6	1791.1	1845.9
8	2622.2	4220.0	1366.4	1791.1	1845.4
9	2622.2	4219.9	1366.7	1791.0	1845.8
10	2622.3	4219.9	1366.5	1791.3	1845.9
11	2622.1	4220.0	1366.2	1791.0	1845.5
12	2622.2	4220.1	1366.3	1791.0	1845.6
13	2622.2	4220.2	1366.1	1791.0	1845.8
14	2622.4	4219.8	1366.6	1791.4	1845.9
15	2621.9	4219.8	1366.4	1791.3	1846.0
16	2622.2	4219.9	1366.6	1790.8	1846.0
17	2622.0	4220.0	1365.9	1790.7	1846.2
18	2622.1	4220.0	1366.3	1790.9	1846.1
19	2621.8	4220.2	1366.4	1791.1	1846.3
20	2622.0	4220.1	1366.6	1791.2	1846.0
AVG	2622.21	4219.99	1366.36	1790.98	1845.93
SD	0.2231	0.1553	0.2134	0.2739	0.2536

3.2 เทคนิคการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance Analysis)

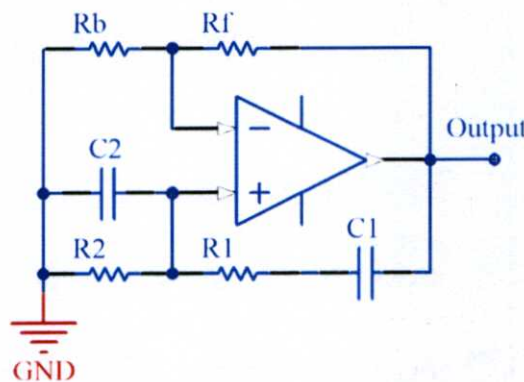
ในข้อนี้จะเป็นการประยุกต์วงจรในการสร้างสัญญาณต่างๆ เพื่อใช้ในการขับวัสดุเพียโซและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าแรงดันที่ตกคร่อมวัสดุเพียโซดังรูปที่ 3.8 ดังทฤษฎีที่กล่าวว่า วัสดุเพียโซจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดที่ความถี่สั่นพ้อง หมายถึงเมื่อจ่ายสัญญาณความถี่เท่ากับความถี่สั่นพ้อง จะเกิดแรงดันตกคร่อมเพียโซน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเทคนิคเดียวกับที่ใช้ในเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ส่วนหนึ่ง



รูปที่ 3.8 หลักการอ่านค่าอิมพีแดนซ์

3.2.1 วงจรสร้างสัญญาณไซน์ (Wien Bridge Oscillator)

วงจรสร้างสัญญาณไซน์ Wien Bridge Oscillator เป็นวงจรสำหรับสร้างสัญญาณรูปไซน์ (Sinewave Generator) อย่างง่ายโดยการใช้ Op-amp หนึ่งตัว [33-38] ดังรูปที่ 3.9 และสามารถปรับความถี่ได้ด้วยค่าความต้านทานจากสมการ Frequency Cut-Off ดังสมการที่ 3.1

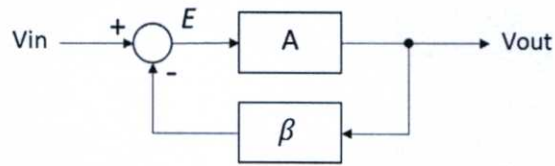


รูปที่ 3.9 วงจร Wien Bridge Oscillator พื้นฐาน

Cut-Off Frequency

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

จากรูปที่ 3.10 แสดงหลักการทำงานของระบบป้อนกลับอย่างง่ายที่ประกอบไปด้วย อัตราขยาย (Amplifier Gain) กล้อง A และเงื่อนไขการป้อนกลับทางลบ (Negative Feedback) กล้อง β และ E คือค่าความผิดพลาดของสัญญาณที่มาจากผลรวมของ V_{in} และสัญญาณป้อนกลับ



รูปที่ 3.10 Block Diagram ของระบบ

Feedback Error $E = V_{in} - \beta V_{out}$ (3.2)

Output Voltage

$$V_{out} = AE$$

$$V_{out} = A(V_{in} - \beta V_{out}) \quad (3.3)$$

Transfer Function

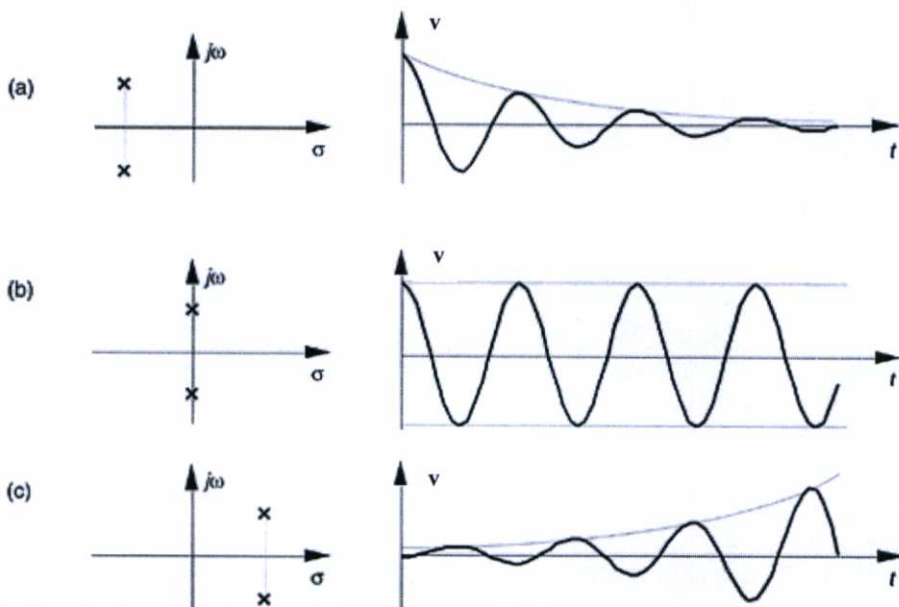
$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (3.4)$$

จากสมการ 3.4 ถ้าอัตราขยายรวมน้อยกว่า 1 ($A\beta > 1$) จะทำให้ Pole ของ Transfer Function อยู่ฝั่งซ้ายของ S-Plane ทำให้ระบบลู่เข้าและไม่เกิดสัญญาณ ดังรูปที่ 3.11a

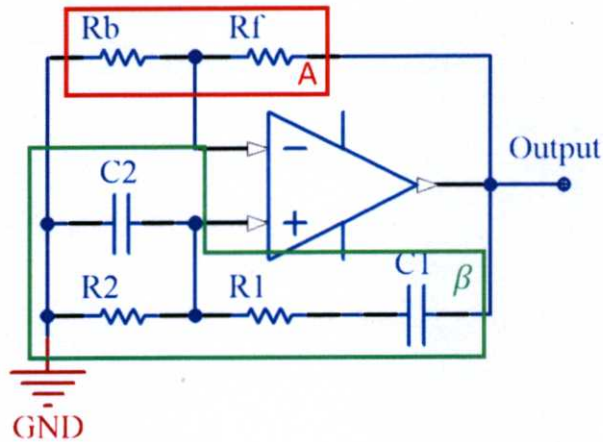
ถ้าอัตราขยายรวมเท่ากับ 1 ($A\beta = 1$) จะทำให้ Pole ของ Transfer Function อยู่ทับเส้นจินตภาพ ทำให้ระบบเสถียรวิกฤตและเกิดสัญญาณ Oscillate ขึ้น ดังรูปที่ 3.11b

ถ้าอัตราขยายรวมมากกว่า 1 ($A\beta < 1$) จะทำให้ Pole ของ Transfer Function ฝั่งขวาของ S-Plane ทำให้ระบบไม่เสถียรเกิดสัญญาณ Oscillate แบบลู่ออก ดังรูปที่ 3.11c

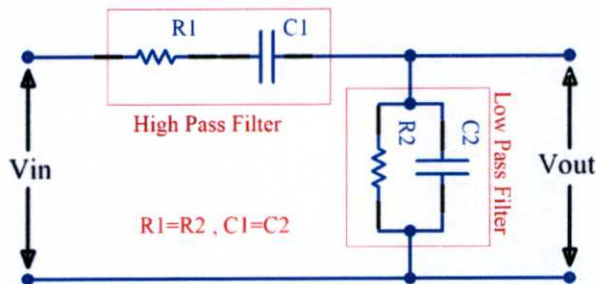


รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองของระบบ

จากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นส่วนของอัตราขยายของระบบ (A) เป็นวงจร Non-Inverting Amplifier และส่วนของเงื่อนไขการป้อนกลับแบบลบ (β) เป็นวงจร Band-Pass Filter ซึ่งยอมให้ความถี่สามารถผ่านได้ง่ายที่สุดเพียงความถี่เดียวเข้าไปขยายในวงจร จึงสามารถเกิดเป็นสัญญาณความถี่ได้

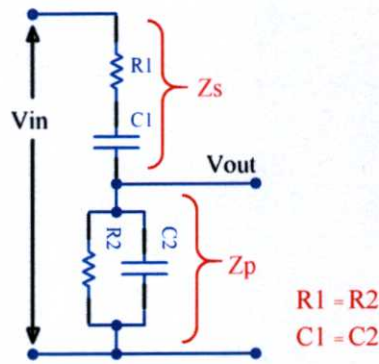


รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของวงจร Wien Bridge Oscillator



รูปที่ 3.13 วงจร Band-Pass Filter ในวงจร Wien Bridge Oscillator

จากวงจร Band-Pass Filter ดังรูปที่ 3.13 ประกอบไปด้วย High-Pass Filter และ Low-Pass Filter ต่ออนุกรมกันในลักษณะวงจร Voltage Divider ซึ่งทำให้สัญญาณขาออกมีแอมพลิจูดต่ำกว่าสัญญาณขาเข้า หรืออัตราขยายของ β ที่มีค่าต่ำกว่า 1



รูปที่ 3.14 หลักการทำงานของวงจร Band-Pass Filter

จากรูปที่ 3.14 กำหนดให้วงจร Filter ทั้งสองมีค่า Cut-Off Frequency เท่ากันโดยกำหนดให้ค่า $R_1 = R_2$ และ $C_1 = C_2$ จะทำให้อัตราขยายของส่วนวงจรมีค่าเท่ากับ $1/3$ ดังสมการที่ 3.8 และสามารถปรับความถี่ได้ด้วยการปรับค่า R_1 และ R_2 พร้อมกัน

$$\text{Capacitor Impedance} \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.5)$$

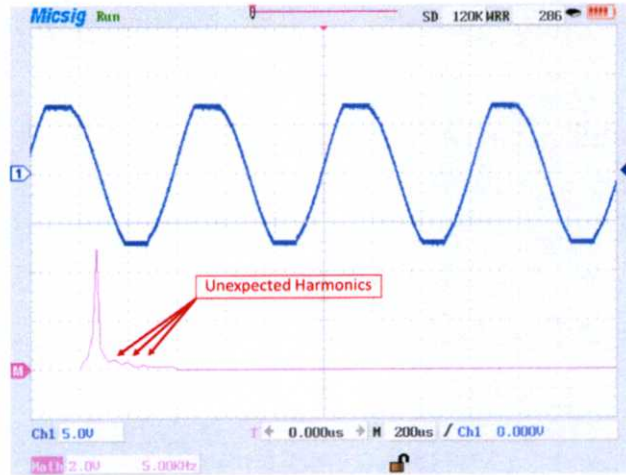
$$\begin{aligned} \text{High-Pass Filter Impedance} \quad Z_S &= \sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2} \\ X_{C1} &= R_1 \\ Z_S &= \sqrt{2}R_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Low-Pass Filter Impedance} \quad Z_P &= R_2 \parallel X_{C2} \\ X_{C2} &= R_2 \\ Z_P &= \frac{\sqrt{2}}{2} R_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

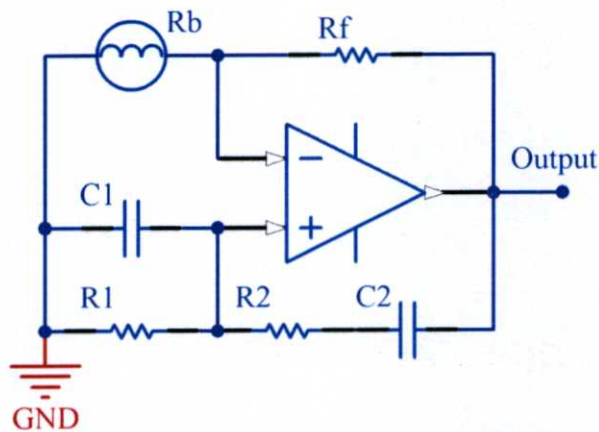
$$\begin{aligned} \text{Band-Pass Filter Gain} \quad V_{out} &= V_{in} \cdot A \\ V_{out} &= V_{in} \left(\frac{Z_P}{Z_P + Z_S} \right) \\ V_{out} &= \frac{1}{3} V_{in} \end{aligned} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 เมื่อกล่อง β มีอัตราขยายเท่ากับ $1/3$ ในการทำให้ระบบ Oscillate หรืออัตราขยายรวมเท่ากับ 1 เพื่อให้เกิดการเสถียรวิกฤตนั้นสามารถทำได้ด้วยกับกำหนดอัตราขยายของกล่อง A ให้เท่ากับ 3

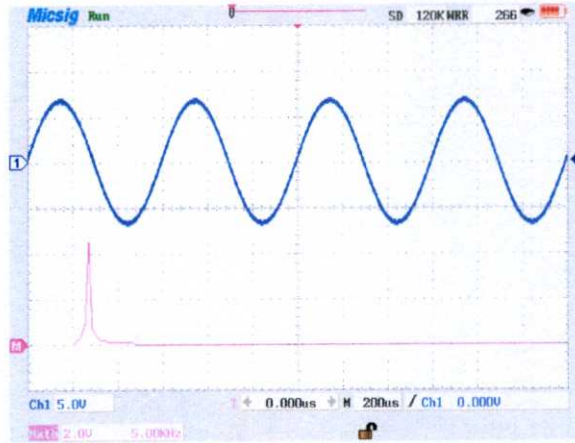
จากการทดลองพบว่าสัญญาณรูปไซน์ที่ได้จากวงจรนี้เกิดการตัดดังรูปที่ 3.15 เนื่องจากเกิดแรงดันตกคร่อมใน Op-Amp ทำให้เกิดฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการขึ้น สามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับอัตราขยายลดลงหลังจากวงจรเกิดการ Oscillate แล้ว สามารถทำได้อัตโนมัติโดยการเลือกอุปกรณ์ R_b เป็นใส่โลหะดังรูปที่ 3.16 ซึ่งคุณสมบัติของโลหะคืออุณหภูมิแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน เมื่อมีกระแสไหลผ่านจะทำให้ขดลวดในหลอดไฟร้อนขึ้น ค่าความต้านทานสูงขึ้น ทำให้อัตราขยายลดลงได้



รูปที่ 3.15 สัญญาณจากวงจร Wien Bridge Oscillator ที่อัตราขยายเท่ากับ 3

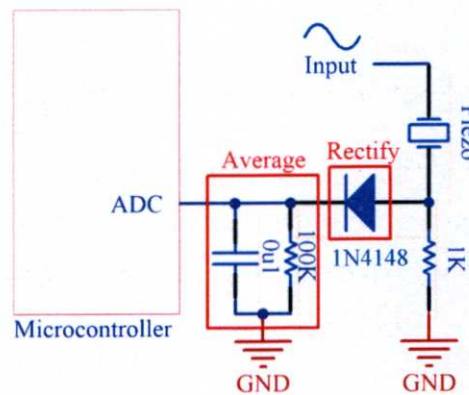


รูปที่ 3.16 หลอดไฟใส่โลหะ R_b สำหรับปรับอัตราขยาย



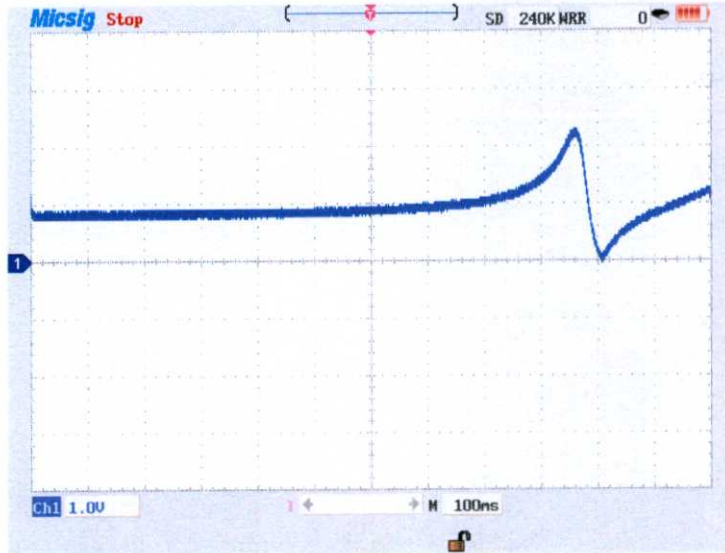
รูปที่ 3.17 สัญญาณจากวงจร Wien Bridge Oscillator ที่ปรับอัตราขยายลดลง

หลังจากได้สัญญาณรูปไซน์ดังรูปที่ 3.17 แล้วจะทำการผ่านสัญญาณนี้เข้ากับวัสดุเพียโซที่ต้องการวัดค่าความถี่สั่นพ้อง และต่อขาสัญญาณออกมาที่วงจร Rectify และ วงจร Average เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ฝั่งบวกฝั่งเดียวด้วยโมดูล Analog to Digital Converter ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมทั้งต่อสัญญาณความถี่เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย ดังรูปที่ 3.18



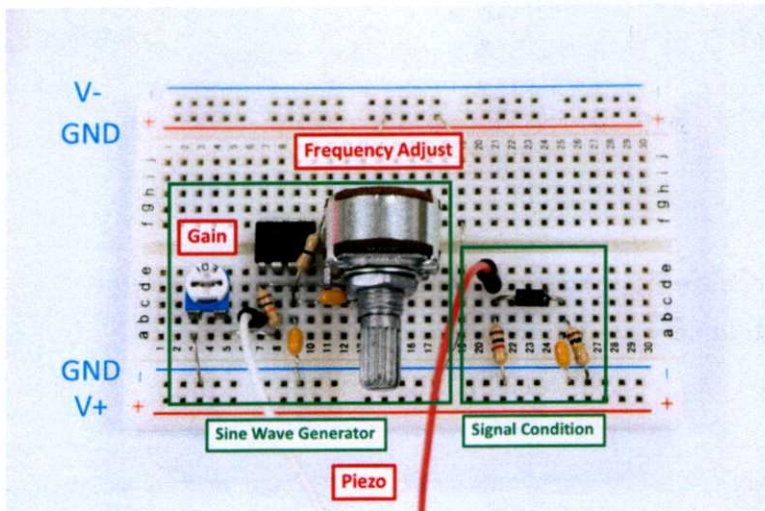
รูปที่ 3.18 วงจรปรับปรุงสัญญาณจากแอมพลิจูดเป็นแรงดัน

ทำการทดลองโดยการปรับค่าความต้านทานเพื่อปรับความถี่และเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าความถี่ พร้อมกับอ่านค่าแรงดัน และติดตามแรงดันเมื่อพบจุดที่มีแรงดันเข้าสูงที่สุดจึงบันทึกเป็นค่าความถี่สั่นพ้อง โดยทำซ้ำกับเพียโซทั้งห้าชนิด แรงดันที่ได้จากการปรับความถี่ดังรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับกราฟที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์หิมพ์แดนซ์



รูปที่ 3.19 แรงดันจากการวัดที่ความถี่ 2kHz ถึง 4kHz

ในการทดลองนี้ ทางผู้วิจัยได้ต่อวงจรลงบอร์ดทดลองเพื่อใช้สร้างสัญญาณส่งไปยังเพียโซดังรูปที่ 3.20 วงจรจะมีสองส่วน คือส่วนของวงจรสร้างความถี่ที่สามารถปรับได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ และวงจรแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณให้เป็นแรงดัน



รูปที่ 3.20 บอร์ดทดลองวงจร Wien Bridge Oscillator

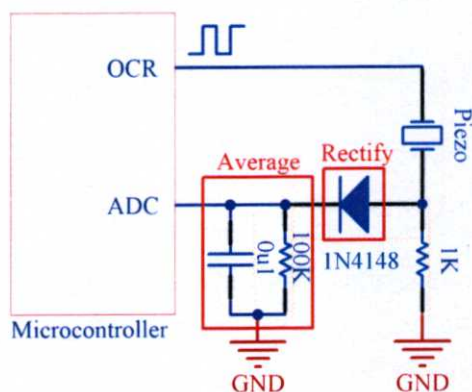
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จากเทคนิคการวัดนี้จำนวน 20 ครั้ง ต่อเพียโซแต่ละแผ่น พร้อมค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีความละเอียดอยู่ที่ 1 Hz มีการกระจายข้อมูลอยู่ประมาณ 3 Hz และค่าที่ได้จะน้อยกว่าการวัดอ้างอิงด้วยเครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพีแดนซ์ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์จากค่า Resistance เท่านั้น

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Wien Bridge Oscillator

Wien Bridge Oscillator					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2614	4184	1301	1705	1836
2	2613	4184	1303	1705	1836
3	2613	4182	1303	1705	1835
4	2615	4183	1303	1705	1836
5	2613	4184	1303	1704	1835
6	2613	4184	1302	1704	1836
7	2613	4185	1303	1706	1836
8	2613	4184	1303	1705	1835
9	2613	4184	1304	1705	1836
10	2612	4185	1304	1703	1836
11	2614	4185	1303	1705	1836
12	2611	4184	1302	1705	1837
13	2612	4184	1303	1705	1836
14	2613	4183	1303	1706	1836
15	2613	4184	1303	1705	1836
16	2613	4184	1304	1705	1837
17	2613	4185	1302	1704	1835
18	2613	4184	1303	1706	1836
19	2613	4183	1303	1705	1837
20	2613	4184	1303	1705	1834
AVG	2613.00	4183.95	1302.90	1704.90	1835.85
SD	0.7947	0.7591	0.7182	0.7182	0.7452

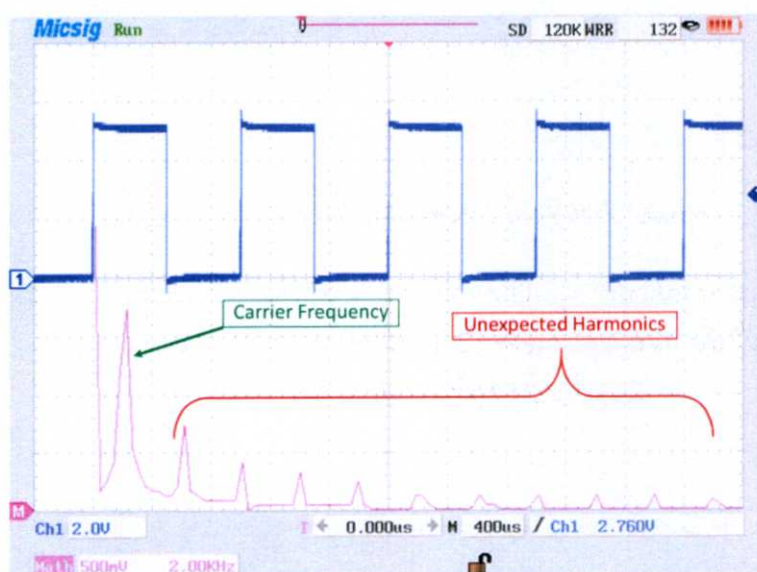
3.2.2 สัญญาณพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดเนื่องจากใช้เพียงไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ต่างๆ ผ่านไปยังวัสดุเพียโซ และเปลี่ยนแอมพลิจูดของสัญญาณเป็นแรงดันด้วยวงจรปรับปรุงสัญญาณแล้วทำการวัดแรงดันตกคร่อมด้วยโมดูล Analog to Digital Converter ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.21



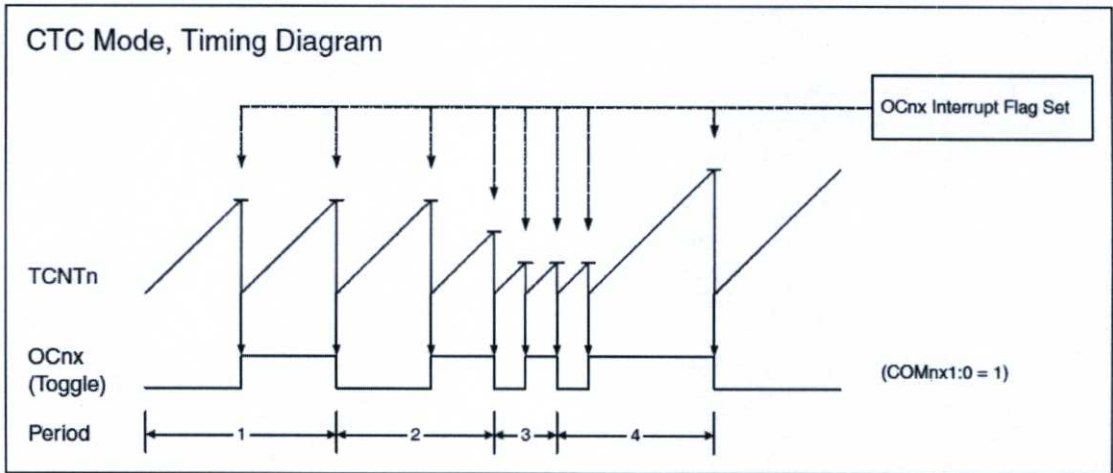
รูปที่ 3.21 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

จะใช้หลักการคล้ายกับวิธีที่ใช้วงจร Wien Bridge Oscillator ในข้างต้น แต่จะใช้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง [39] ซึ่งจะมีฮาร์มอนิก อื่นที่ไม่ต้องการอยู่มาก แต่ความถี่หลัก (Carrier Frequency) จะมีแอมพลิจูดสูงที่สุดดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 สัญญาณสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์

การสร้างควมถี่จากไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะอาศัยโมดูล Timer Counter ภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณ โดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตรุ่น Atmel Atmega328p เป็นตัวสร้างและวัดสัญญาณ และใช้โมดูล Timer Counter 1 ขนาด 16 บิต ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณโดยจะเลือกโหมด CTC เป็นตัวปรับความถี่ ดังรูปที่ 3.23 และสามารถคำนวณความถี่ได้จากสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.23 หลักการทำงานของ Timer Counter ในไมโครคอนโทรลเลอร์

$$F_{OCR} = \frac{F_{CLK}}{2N(1+TOP)} \quad (3.9)$$

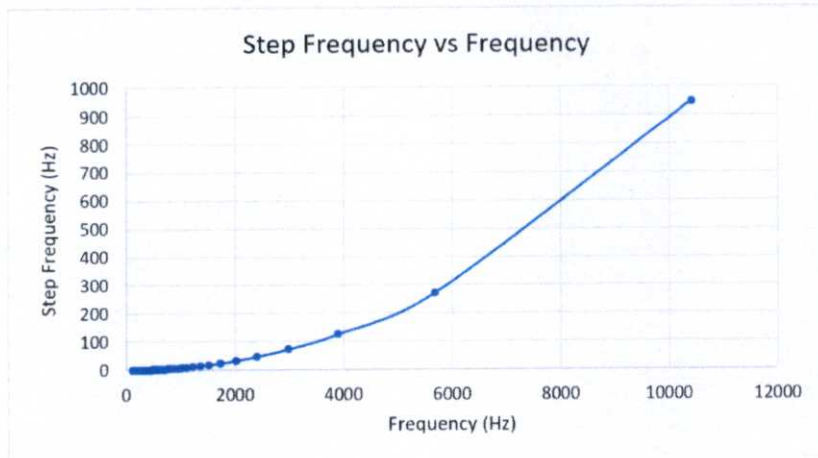
F_{OCR} = Output Frequency

F_{CLK} = Main Clock

N = Prescaler

TOP = Variable

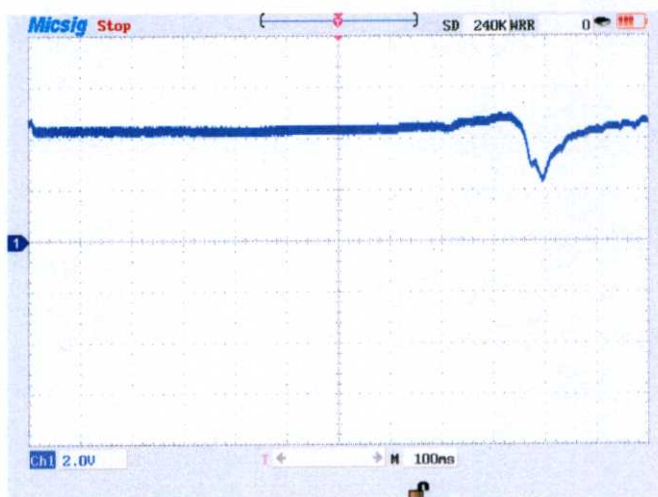
ปัญหาจากการสร้างควมถี่จากโมดูล Timer Counter คือ ความละเอียดที่หยาบไม่เท่ากันในแต่ละขั้นเนื่องจากการปรับความถี่ด้วยคาบเวลา ดังสมการข้างต้น โดยเมื่อมาคำนวณเป็นความถี่แล้วจะทำให้ความห่างของแต่ละขั้นไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.24 เมื่อกำหนดความถี่หลักเท่ากับ 16 MHz และ Prescaler เท่ากับ 64 แกน X แสดงความถี่ Output ส่วนแกน Y แสดงความห่างของความถี่ในขั้นนั้นๆ



รูปที่ 3.24 อัตราการเพิ่มความถี่ในแต่ละความถี่

จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้ความถี่ที่ปรับในแต่ละขั้นทยายขึ้นด้วย ทำให้ไม่สามารถใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่มีความถี่สูงได้ เนื่องจากมีความละเอียดต่ำในความถี่สูง แต่ในการทดลองนี้ เพียโซที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีความถี่สั่นพ้องอยู่ที่ประมาณ 2 kHz ซึ่งจากการคำนวณข้างต้นจะทำให้ได้ความละเอียดในย่านความถี่นี้ประมาณ 30 Hz

ทำการทดลองโดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับค่าความถี่จากต่ำสุดไปสูงสุดและอ่านค่าแรงดันเก็บไว้ในตัวแปร แล้วหาค่าแรงดันที่สูงที่สุดเพื่อดูว่าจุดนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ตั้งความถี่ใดไว้ ความถี่นั้นจะเป็นความถี่สั่นพ้องของเพียโซที่นำมาวัด แรงดันที่วัดได้จากวงจรนี้ เมื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ปรับความถี่แบบ Sweep จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จะคล้ายกับกราฟจากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 3.25 แต่เนื่องจากมีความถี่ฮาร์โมนิกอื่นแทรกมาด้วย จึงทำให้การสั่นของเพียโซที่ความถี่สั่นพ้องนั้นมีแอมพลิจูดไม่สูงมาก



รูปที่ 3.25 แรงดันจากการวัดที่ความถี่ 2 KHz ถึง 4 KHz

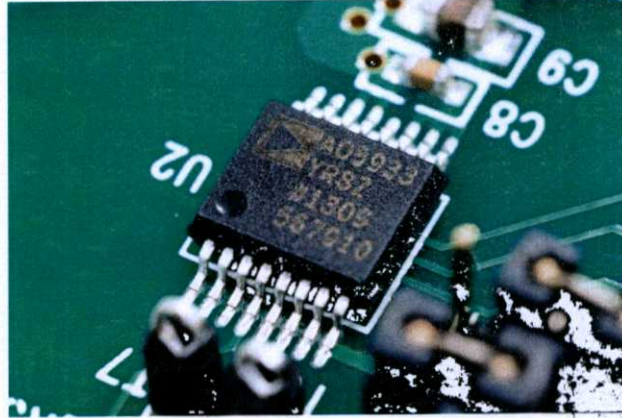
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จากเทคนิคการวัดนี้จำนวน 20 ครั้ง ต่อเพียโซแต่ละแผ่น พร้อมค่ากลางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าค่าที่อ่านได้มีความละเอียดอยู่ที่ประมาณ 30 Hz และมีค่าความถี่ที่ต่ำกว่าการวัดอ้างอิงด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Microcontroller Oscillator

Microcontroller Oscillator					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2450.98	4032.26	1288.66	1689.19	1543.21
2	2500.00	3906.25	1358.68	1666.67	1602.56
3	2403.85	3676.47	1329.79	1602.56	1582.28
4	2403.85	4032.26	1329.79	1666.67	1562.50
5	2450.98	4032.26	1288.66	1644.74	1562.50
6	2358.49	4166.67	1237.62	1602.56	1562.50
7	2450.98	4032.26	1288.66	1666.67	1602.56
8	2450.98	3787.88	1250.00	1666.67	1562.50
9	2403.85	4032.26	1237.62	1689.19	1543.21
10	2358.49	4032.26	1250.00	1666.67	1562.50
11	2500.00	3906.25	1237.62	1562.50	1562.50
12	2450.98	3676.47	1250.00	1562.50	1562.50
13	2450.98	4032.26	1225.49	1666.67	1543.21
14	2358.49	4032.26	1237.62	1712.33	1543.21
15	2403.85	3906.25	1250.00	1623.38	1582.28
16	2450.98	4032.26	1237.62	1666.67	1562.50
17	2450.98	4032.26	1237.62	1666.67	1562.50
18	2403.85	4032.26	1329.79	1689.19	1562.50
19	2450.98	3787.88	1250.00	1666.67	1524.39
20	2500.00	4166.67	1225.49	1689.19	1602.56
AVG	2432.68	3966.78	1267.04	1653.37	1564.72
SD	44.2946	139.6683	40.8531	41.5821	21.0748

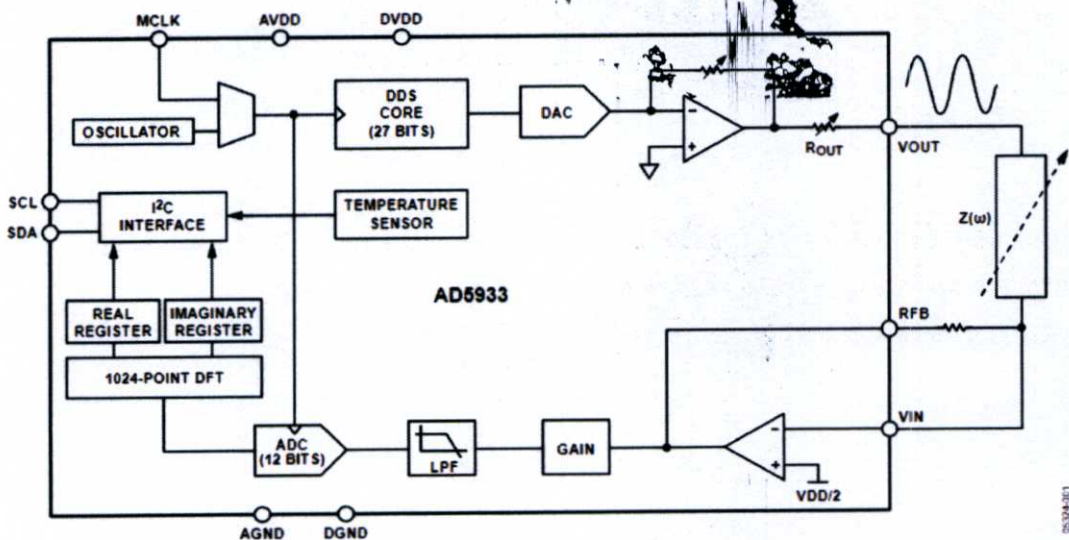
3.2.3 ไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (AD5933)

จากการศึกษาพบว่าไอซีของ Analog device รุ่น AD5933 [55] ซึ่งเป็นไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์แบบ Complete Chip ดังรูปที่ 3.26 ซึ่งเป็นไอซีที่มีความสามารถคล้ายกับเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์แต่จะต่างกันที่ความละเอียดและประสิทธิภาพ [40 - 42]



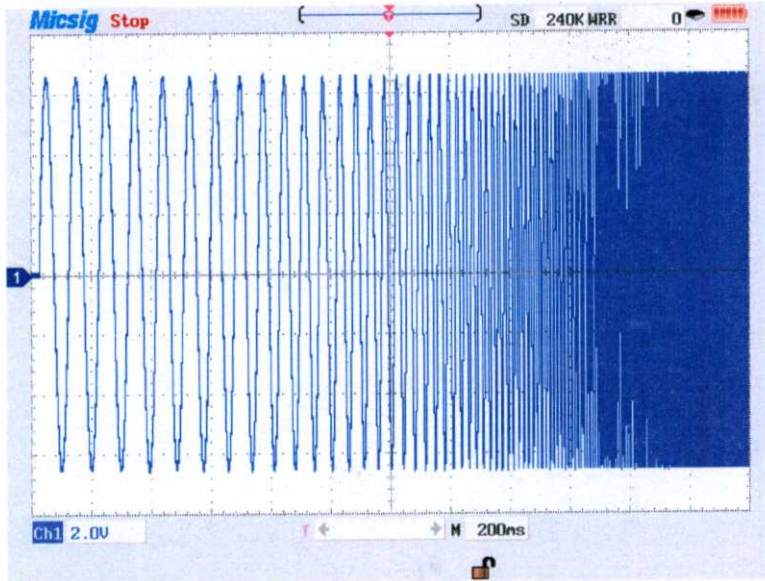
รูปที่ 3.26 ชิพไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ AD5933

ภายในของไอซีตัวนี้จะมีโมดูลสร้างสัญญาณไซน์ที่ปรับความถี่ได้ และโมดูลแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิทัล และมีหน่วยประมวลผลสำหรับคำนวณค่าอิมพีแดนซ์อยู่ในทั้งหมด ดังรูปที่ 3.27 ดังนั้นการนำเอาไอซีนี้มาใช้ สามารถต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงได้เนื่องจากเป็นไอซีสำเร็จรูปแล้ว



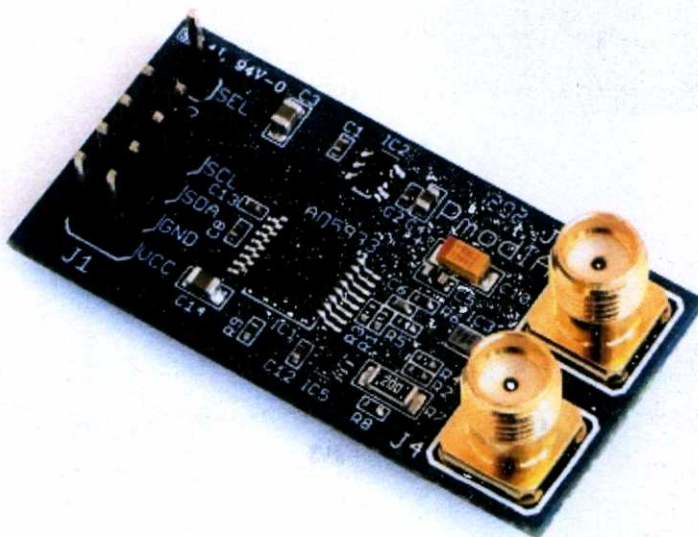
รูปที่ 3.27 โครงสร้างภายในของไอซี AD5933

สัญญาณที่ไอซีตัวนี้ใช้ขับเพียโซนั้น มีลักษณะเดียวกับเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ คือ เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ปรับความถี่แบบ Sweep ตามค่าความถี่สูงสุดต่ำสุดที่ได้ตั้งไว้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 สัญญาณรูปไซน์แบบ Sweep ความถี่

ในการทดลองจะนำไอซีตัวนี้มาต่อวงจรเพื่อวัดค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซ ดังรูปที่ 3.29 และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่า ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งผ่านพอร์ตสัญญาณ I²C



รูปที่ 3.29 บอร์ดสำเร็จรูปของไอซี AD5933

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จาก AD5933 จำนวน 20 ครั้งต่อเพียโซแต่ละแผ่น พร้อมค่ากลางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีความละเอียดอยู่ที่ 1 Hz การกระจายข้อมูลประมาณ 2 Hz และค่าที่อ่านได้มีความใกล้เคียงกับการวัดอ้างอิงด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์มาก เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าทั้ง Resistance และ Reactance

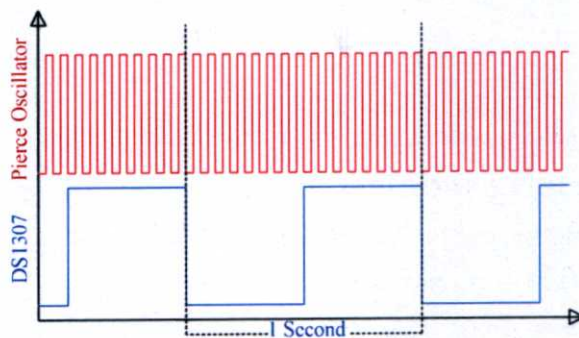
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยไอซีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ AD5933

Impedance Analyzer AD5933					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2620	4220	1360	1795	1845
2	2621	4220	1361	1795	1844
3	2620	4220	1361	1795	1844
4	2621	4221	1361	1796	1844
5	2622	4220	1361	1795	1844
6	2621	4220	1361	1795	1843
7	2621	4220	1361	1794	1844
8	2619	4220	1362	1795	1844
9	2621	4219	1360	1796	1843
10	2621	4220	1361	1796	1844
11	2621	4221	1361	1797	1844
12	2620	4221	1362	1795	1845
13	2621	4220	1363	1795	1844
14	2621	4220	1361	1795	1844
15	2620	4220	1361	1795	1844
16	2621	4221	1360	1795	1844
17	2622	4220	1361	1794	1844
18	2621	4220	1361	1795	1844
19	2621	4221	1361	1795	1847
20	2621	4222	1361	1795	1844
AVG	2620.80	4220.30	1361.05	1795.15	1844.15
SD	0.6958	0.6569	0.6863	0.6708	0.8127

3.3 เทคนิคการสั่นทางไฟฟ้า (Oscillation Technique)

ในข้อนี้จะเป็นการประยุกต์วงจรสร้างการสั่นสะเทือนทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซ เทคนิคนี้จะเป็นการทำให้อุปกรณ์ไม่เสถียรและเกิดการสั่นทางไฟฟ้าขึ้น (Resonate) โดยองค์ประกอบที่ทำให้การสั่นนั้นคงที่คือวัสดุเพียโซที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองมีผลโดยตรงกับการยืดหดของวัสดุเพียโซ และวัสดุเพียโซเป็นวัสดุแข็งที่มีความถี่สั่นพ้อง จึงทำให้วัสดุนี้มีพฤติกรรมต่อความถี่ทางไฟฟ้าสอดคล้องกับความถี่ทางกล

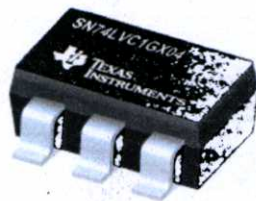
ในการนับความถี่นั้น เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเทคนิคนี้จะเป็นสัญญาณความถี่สั่นพ้องเลย และการวิจัยนี้เน้นไปทางกระประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีทรัพยากรต่ำ จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวนับความถี่ โดยใช้เทคนิคนับจำนวนพัลส์เทียบกับฐานเวลาจริง 1 วินาที จากไอซี Real-Time Clock DS1307 ดังรูปที่ 3.30 โดยจะได้ค่าความถี่ที่มีความละเอียดสูงถึง 1Hz และใช้เวลาในการเก็บค่าเพียง 1 วินาที ต่อครั้ง หรือนับค่ายาว 10 วินาที ติดต่อกันแล้วนำค่าที่ได้มาหาร 10 ก็จะได้ความละเอียดที่ 0.1 Hz ที่เวลาเก็บค่า 10 วินาที



รูปที่ 3.30 วิธีการนับความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

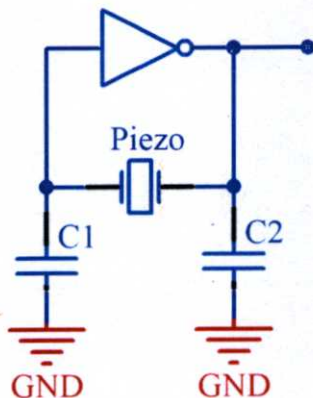
3.3.1 วงจร Pierce Gate Oscillator

ในหัวข้อนี้จะเป็นการประยุกต์นำวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์มาใช้ในการสร้างความถี่สั่นพ้องของเพียโซ ซึ่งวงจรนี้เป็นวงจรสำหรับสร้างความถี่ในวงจรดิจิทัล โดยใช้ผลึกควอทซ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดความถี่ ซึ่งแผ่นควอทซ์ก็มีคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเช่นเดียวกัน ซึ่งมีไอซีสำหรับสร้างสัญญาณจากควอทซ์คริสตัลโดยเฉพาะ เช่น SN74LVC1GX04 ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งไอซีนี้ถูกสร้างขึ้นมาสำหรับใช้งานเฉพาะผลึกควอทซ์ที่กระแสไหลผ่านต่ำ



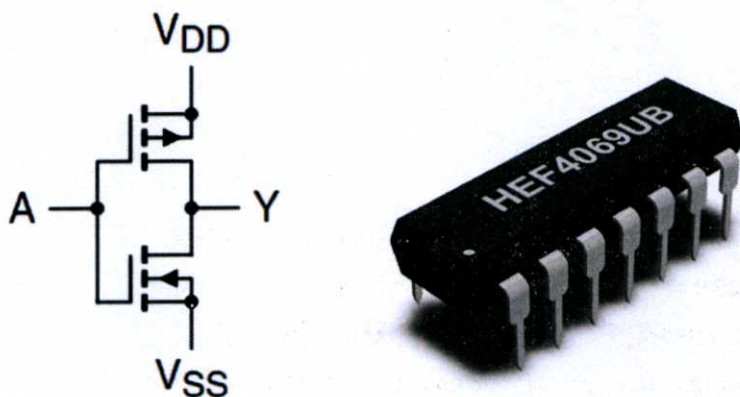
รูปที่ 3.31 ไอซี Pierce Oscillator เบอร์ SN74LVC1GX04

วงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ประกอบไปด้วย Logic-Gate เพียงตัวเดียว ซึ่งเป็น Not-Gate และต่อสัญญาณ Output ผ่านเพียโซและมาเข้า Input ดังรูปที่ 3.32 เพื่อที่จะทำให้วงจรไม่เสถียร เกิดการกลับด้าน Logic ไปมา โดยมีความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซเป็นตัวกำหนดความถี่ของวงจร [43-46] วงจรนี้จึงเป็นวงจรที่สามารถสร้างความถี่สั่นพ้องได้แบบ Real-Time



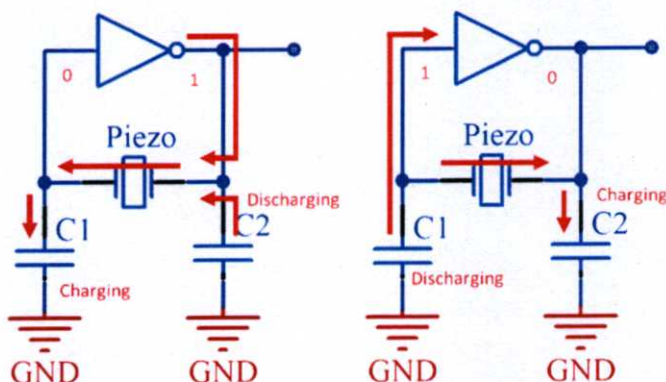
รูปที่ 3.32 วงจร Pierce Oscillator

เนื่องจากวัสดุเพียโซ เช่นบัสเซอร์ต้องใช้พลังงานในการขับมากกว่าแผ่นควอทซ์ จึงไม่สามารถนำไอซีข้างต้นมาขับได้โดยตรง จากการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ให้ทราบอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ที่นำมาใช้มีค่าประมาณ 150Ω ที่ความถี่สั่นพ้อง ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไอซี Not-Gate เบอร์ HEF4069UB ที่สามารถจ่ายกระแสได้ 10 mA และ Output เป็นแบบ Push-Pull ซึ่งเหมาะสมมาใช้ในการขับเพียโซแทนดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ไอซี Not Gate HEF4069UB

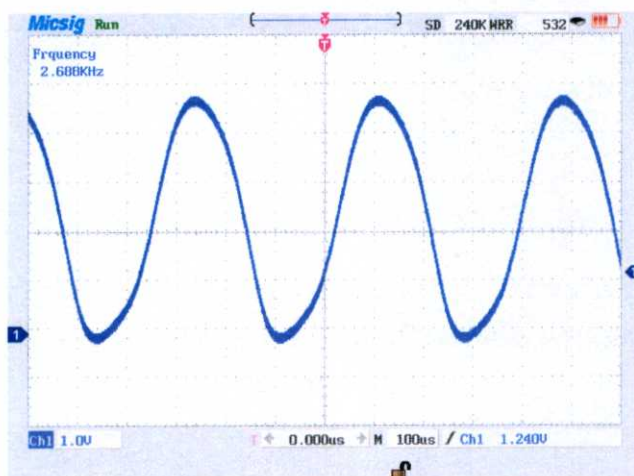
การทำงานของวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์นั้นเป็นการกลับ Logic ไปมา โดยกระแสจะไหลผ่านเพียโซที่มีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง เข้าไปเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุอีกด้านหนึ่งกลับไปมาดังรูปที่ 3.34 จะสังเกตได้ว่า ขนาดของตัวเก็บประจุจะมีผลต่อแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10 โดยที่ C_L คือค่าความเก็บประจุของเพียโซ และ C_1, C_2 ให้มีค่าที่เท่ากัน



รูปที่ 3.34 หลักการทำงานของวงจร Pierce Oscillator

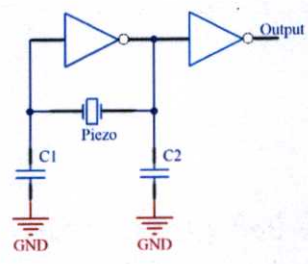
$$C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.10)$$

เนื่องจากวงจรนี้ใช้ Logic Gate เป็นตัวสร้างความถี่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางดิจิทัล ทำให้สัญญาณ Output มีรูปร่างบิดเบี้ยวซึ่งมีฮาร์มอนิกอื่นเข้ามารบกวนการสั่งดังรูปที่ 3.35 จึงอาจจะมีผลต่อความถี่สั่งที่อ่านได้อาจทำให้ความแม่นยำน้อยลง

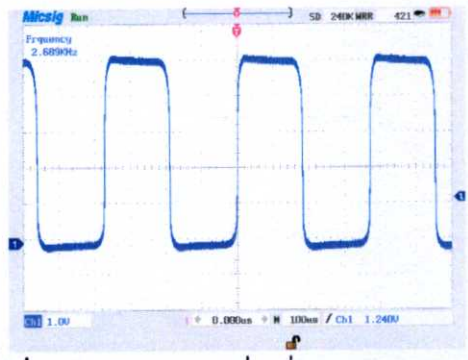


รูปที่ 3.35 สัญญาณที่ออกจากวงจร Pierce Oscillator

เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นรูปไซน์ จึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาณให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมก่อนโดยสามารถใช้ลอจิกเกตที่มีในไอซีมารับสัญญาณ ทาง Output จะออกมาเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถนำไปใช้นับโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ดังรูปที่ 3.36 โดยจะให้สัญญาณออกเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.37

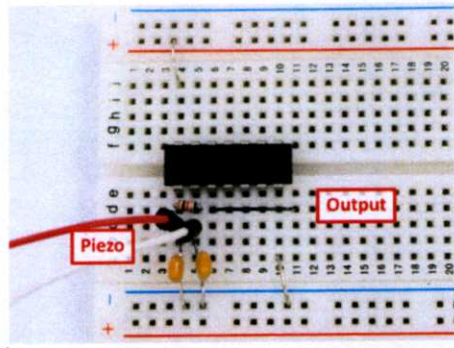


รูปที่ 3.36 วงจรปรับปรุงสัญญาณให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.37 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจาก Not Gate

ในการทดลองวงจร Pierce Gate Oscillator ทางผู้วิจัยได้ต่อวงจรลงบอร์ดทดลอง (Protoboard) เพื่อทำการวัดค่า ดังรูปที่ 3.38 จะสังเกตได้ว่าวงจรนี้ใช้อุปกรณ์น้อย มีความซับซ้อนน้อยและสามารถให้สัญญาณที่ความถี่สั้นพองได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการเก็บค่าและคำนวณ



รูปที่ 3.38 บอร์ดทดลองวงจร Pierce Oscillator

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวเก็บประจุสำหรับเพียโซแต่ละชิ้นสำหรับวงจร Pierce และ Colpitts

	Piezo 1	Piezo 2	Piezo 3	Piezo 4	Piezo 5
C1 (nF)	12	15	6	8	64
C2 (nF)	12	15	6	8	64

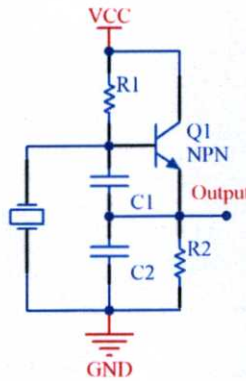
ตารางที่ 3.6 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จากวงจร Pierce Gate Oscillator จำนวน 20 ครั้งต่อเพียโซแต่ละแผ่น พร้อมค่ากลางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีความละเอียดอยู่ที่ 1 Hz ที่เวลาในการวัด 1 วินาที มีการกระจายของข้อมูลประมาณ 3 Hz ไม่สามารถวัดเพียโซชิ้นที่ 2 ได้เนื่องจากความถี่สั่นพ้องมีหลายโหมดและไม่ชัดเจน ทำให้วงจรไม่เกิดการ Oscillate

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Pierce Gate Oscillator

Pierce Gate Oscillator					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2685	-	1393	1800	1884
2	2683	-	1392	1800	1885
3	2684	-	1393	1800	1885
4	2685	-	1394	1799	1885
5	2685	-	1394	1801	1885
6	2685	-	1394	1801	1883
7	2685	-	1395	1800	1885
8	2684	-	1394	1799	1885
9	2685	-	1394	1800	1885
10	2685	-	1395	1798	1886
11	2685	-	1395	1800	1886
12	2686	-	1394	1800	1885
13	2685	-	1394	1802	1884
14	2685	-	1394	1800	1885
15	2684	-	1394	1800	1885
16	2686	-	1396	1800	1885
17	2685	-	1393	1801	1885
18	2686	-	1394	1800	1885
19	2685	-	1394	1800	1887
20	2685	-	1393	1801	1886
AVG	2684.90	-	1393.95	1800.10	1885.05
SD	0.7182	-	0.8870	0.8522	0.82558

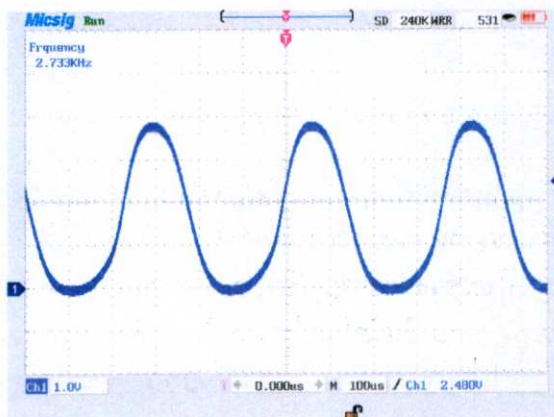
3.3.2 วงจร Colpitts Crystal Oscillator

ในหัวข้อนี้จะเป็นการประยุกต์นำวงจร Colpitts Crystal Oscillator มาใช้ขับแผ่นเพียโซ วงจรนี้นิยมใช้กับควอตซ์คริสตัลสำหรับใช้สร้างความถี่วิทยุ ซึ่งให้สัญญาณที่ค่อนข้างสมบูรณ์คือ สัญญาณรูปไซน์ [47-51] ที่มีฮาร์มอนิกอื่นน้อยมาก ดังรูปที่ 3.39 และเป็นวงจรที่มีความซับซ้อนน้อยประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์เพียง 1 ตัว และตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุอย่างละสองตัว โดยค่าความเก็บประจุ C_1, C_2 จะใช้สมการเดียวกับวงจร Pierce Oscillator ดังสมการที่ 3.10 สามารถประยุกต์ใช้กับเพียโซที่ใช้พลังงานสูงได้โดยการเปลี่ยนทรานซิสเตอร์

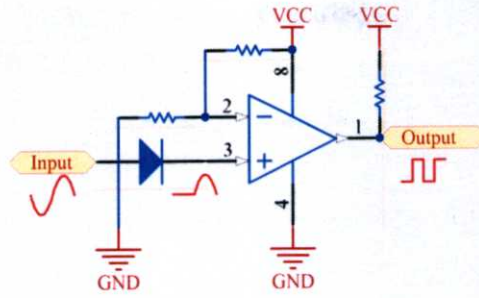


รูปที่ 3.39 วงจร Colpitts Crystal Oscillator

สัญญาณที่ได้ออกมานั้นจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ดังรูป 3.40 จะต้องมีการปรับปรุงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลก่อนนำไปนับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งวงจรปรับปรุงสัญญาณนั้นจะมีสองส่วนคือ วงจรเรียงกระแส (Rectifier) สำหรับปรับสัญญาณกระแสสลับจากวงจรเป็นกระแสตรงก่อนและผ่านวงจรเปรียบเทียบแรงดันดังรูปที่ 3.41 โดยใช้ไอซี Comparator เบอร์ LM393 เพื่อให้สัญญาณ Output ออกมาเป็น Logic แบบดิจิตอล

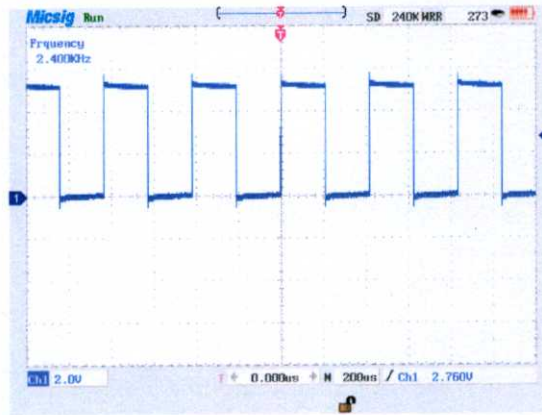


รูปที่ 3.40 สัญญาณจากวงจร Colpitts Crystal Oscillator

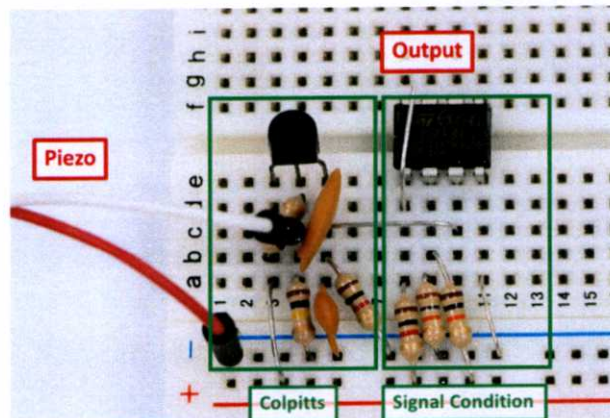


รูปที่ 3.41 วงจรปรับปรุงสัญญาณรูปไซน์เป็นรูปสี่เหลี่ยม

หลังจากปรับปรุงสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมแบบ TTL ที่สามารถอินพุตเข้าไปนับโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ดังรูปที่ 3.42 ทำการทดลองโดยต่อวงจรลงบอร์ดทดลองดังรูปที่ 3.43 จะสังเกตได้ว่าความซับซ้อนของวงจรมีน้อย ใช้อุปกรณ์ไม่มาก



รูปที่ 3.42 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากวงจรปรับปรุงสัญญาณด้วย Comparator



รูปที่ 3.43 บอร์ดทดลองวงจร Colpitts Crystal Oscillator

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าความถี่สั่นพ้องที่อ่านได้จากวงจร Colpitts Crystal Oscillator จำนวน 20 ครั้งต่อเพียโซแต่ละแผ่น พร้อมค่ากลางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีความละเอียดอยู่ที่ 1 Hz ที่เวลาในการวัด 1 วินาที มีการกระจายของข้อมูลประมาณ 2 Hz สำหรับเพียโซชิ้นที่ 1 ไม่สามารถวัดเพียโซชิ้นที่ 2 และ 5 ได้เนื่องจากความถี่สั่นพ้องมีหลายโหมดและไม่ชัดเจน ทำให้วงจรไม่เกิดการ Oscillate และเพียโซชิ้นที่ 3 และ 4 มีค่าความถี่ที่สูงเนื่องจากวงจรนี้จะ Oscillate ที่ความถี่สูงได้ง่ายกว่า หากเพียโซมีความถี่สั่นพ้องโหมดอื่นที่สูงกว่า

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยวงจร Colpitts Crystal Oscillator

Colpitts Crystal Oscillator					
	Piezo 1 (Hz)	Piezo 2 (Hz)	Piezo 3 (Hz)	Piezo 4 (Hz)	Piezo 5 (Hz)
1	2733	-	41845	14535	-
2	2733	-	41846	14540	-
3	2733	-	41847	14540	-
4	2733	-	41850	14538	-
5	2732	-	41850	14539	-
6	2732	-	41859	14538	-
7	2733	-	41856	14537	-
8	2733	-	41852	14539	-
9	2734	-	41855	14540	-
10	2734	-	41854	14542	-
11	2733	-	41855	14541	-
12	2733	-	41857	14541	-
13	2733	-	41856	14539	-
14	2734	-	41860	14539	-
15	2733	-	41858	14538	-
16	2733	-	41855	14543	-
17	2733	-	41854	14546	-
18	2734	-	41855	14550	-
19	2733	-	41856	14548	-
20	2733	-	41856	14548	-
AVG	2733.10	-	41853.80	14541.05	-
SD	0.5525	-	4.200	4.019	-

บทที่ 4

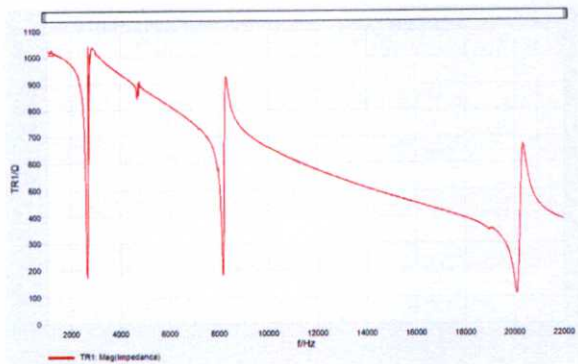
การเปรียบเทียบผลการทดลอง

4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซที่นำมาทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอฮาร์มอนิกต่างๆ ของเพียโซแต่ละชิ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ผลจากการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของแต่ละวงจร และทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง

4.1.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชิ้นที่ 1

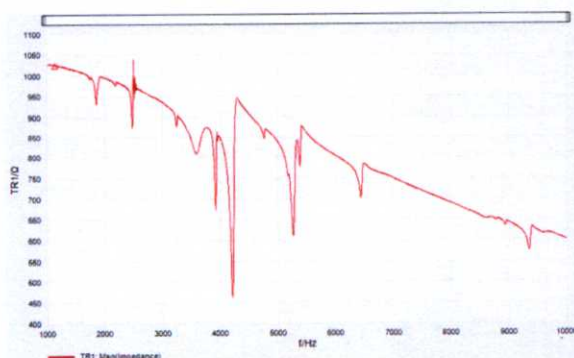
จากรูปที่ 4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชิ้นที่ 1 แสดงให้เห็นความถี่สั่นพ้องระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 22 kHz มีอยู่ทั้งหมด 3 ความถี่ขนาดใหญ่และ 1 ความถี่ขนาดเล็ก โดยความถี่สั่นพ้องหลักจะอยู่ที่ประมาณ 2.5 kHz, 8 kHz และ 20 kHz



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชิ้นที่ 1

4.1.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชิ้นที่ 2

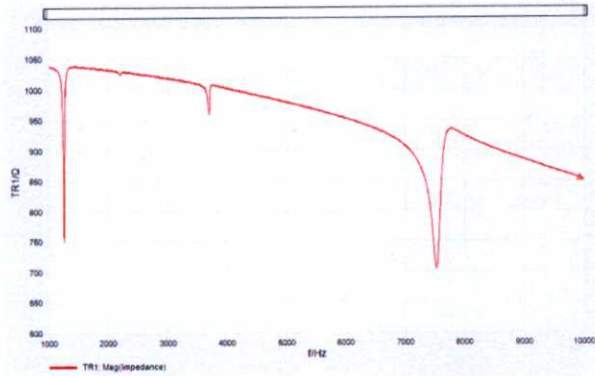
จากรูปที่ 4.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชิ้นที่ 2 แสดงให้เห็นความถี่สั่นพ้องระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 10 kHz ที่ชัดเจนเพียงแค่ 2 ความถี่ ที่ 4.2 kHz และ 5.2 kHz และมีความถี่สั่นพ้องที่ไม่ชัดเจนอีกมากมาย แสดงให้เห็นว่าไม่ควรนำเพียโซชนิดนี้ไปใช้ในงาน Resonant Type เนื่องจากรูปทรง และการเจาะรูทำให้เกิดความถี่สั่นพ้องเพียงบางจุดในบางความถี่ขึ้น



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชิ้นที่ 2

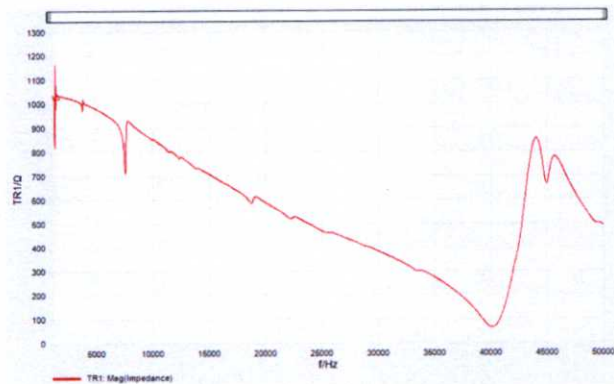
4.1.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 3

จากรูปที่ 4.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 3 แสดงให้เห็นความถี่สั่นพ้องระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 10 kHz หลักอยู่ 2 ความถี่ ที่ประมาณ 1.3 kHz และ 7.5 kHz ซึ่งถือว่าเหมาะแก่การนำไปใช้งานในโหมด Resonant Type



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชั้นที่ 3

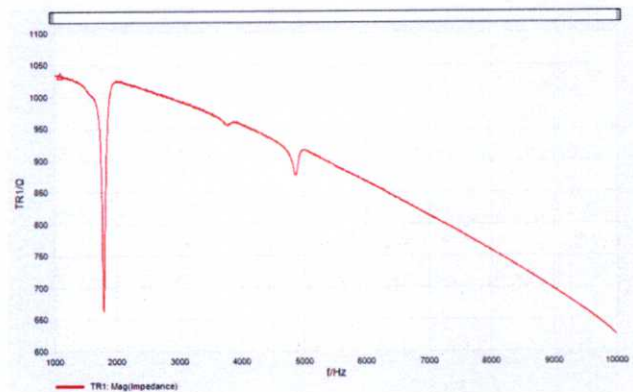
จากผลการทดลองของวงจร Colpitts Crystal Oscillator ที่ให้ความถี่สั่นพ้องของเพียโซ 3 ที่สูงถึง 40 kHz จึงทำการวัดเพิ่มเติมด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Bode 100 ทำให้เห็นว่า ที่ความถี่ 40 kHz เกิดลักษณะคล้ายความถี่สั่นพ้องอยู่จริงและมีความกว้างของความถี่มาก



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 3 ที่ความถี่ 40 kHz

4.1.4 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 4

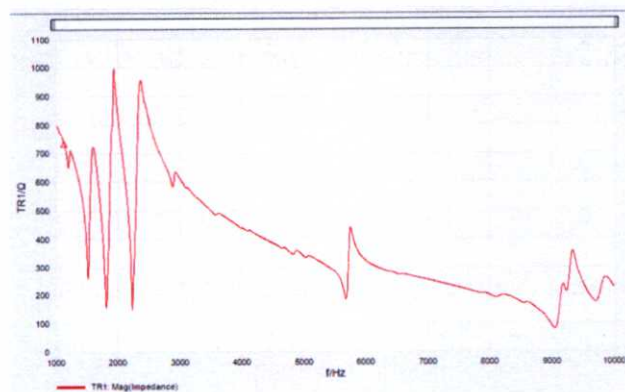
จากรูปที่ 4.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 4 แสดงให้เห็นความถี่สั่นพ้องระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 10 kHz ที่ชัดเจนมากเพียงความถี่เดียวประมาณ 1.8 kHz ซึ่งเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้ในงาน Resonant Type มาก แต่เนื่องจากค่าความถี่ประจุกที่สูงทำให้ที่ความถี่สูงมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชั้นที่ 4

4.1.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 5

จากรูปที่ 4.6 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซชั้นที่ 5 แสดงให้เห็นความถี่สั่นพ้องระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 10 kHz หลักอยู่ใกล้กันถึง 3 ความถี่คือประมาณ 1.5 kHz, 1.8 kHz และ 2.2 kHz และยังมีความถี่สั่นพ้องที่จุดอื่นอีก



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของเพียโซชั้นที่ 5

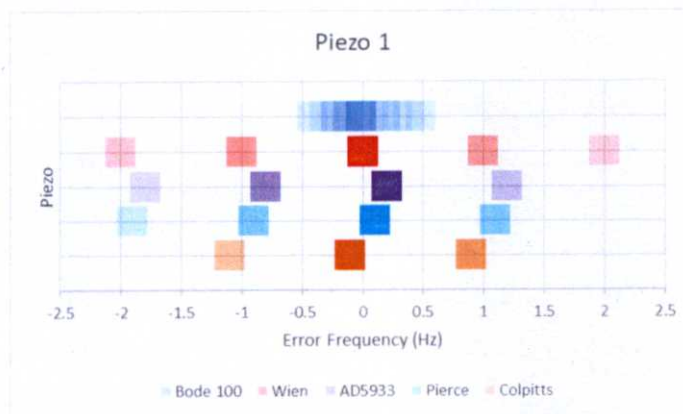
4.2 ข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซและการเปรียบเทียบ

4.1.1 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชิ้นที่ 1



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 1

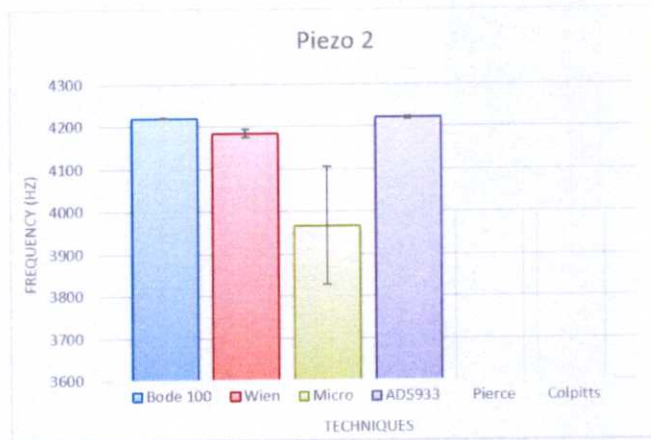
จากรูปที่ 4.7 จากแผ่นเพียโซชิ้นที่ 1 ที่เป็นเพียโซซบซเซอร์นั้นสามารถใช้ได้กับทุกเทคนิคข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวิธีวัดโดยใช้ Wien Bridge และ AD5933 นั้นมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความถี่จริง หรือที่วัดโดย Bode 100 เนื่องจากสัญญาณ เป็นสัญญาณรูปไซน์แท้จริง ที่มีฮาร์มอนิกเดียว ส่วนวิธีอื่น จะสังเกตได้ว่าถ้ามีฮาร์มอนิกอื่นมากความถี่สั่นพ้องจะคลาดเคลื่อนมาก เช่น สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 1

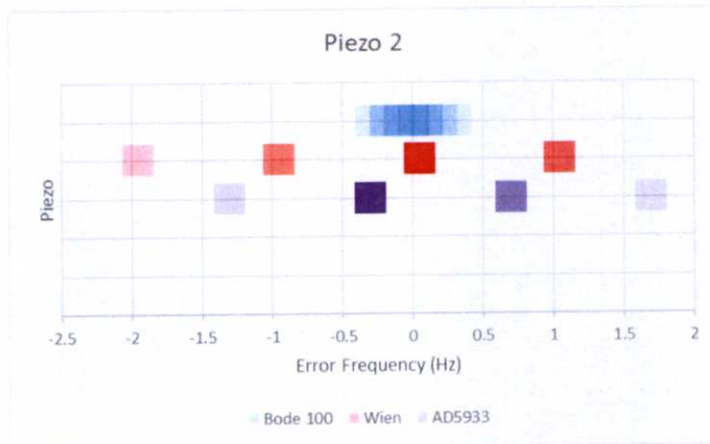
จากรูปที่ 4.8 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลให้ชัดเจนขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ Bode 100 จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด รองลงมาคือค่าที่ได้จากวงจร Colpitts เนื่องจากเป็นวงจรสร้างความถี่ที่มีความเสถียรค่อนข้างสูง เนื่องจากใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวนับความถี่จึงสามารถตั้งความละเอียดได้เพียง 1 Hz การกระจายข้อมูลจึงเป็นช่องว่างห่างกันที่ 1 Hz พอดี

4.1.2 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 2



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชั้นที่ 2

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นเพียโซชั้นที่ 2 ที่มีความถี่สั่นพ้องหลายค่าไม่ชัดเจน จึงไม่สามารถใช้กับเทคนิควงจร Resonator ได้ และทำให้การวัดโดยใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีฮาร์โมนิกหลายค่านั้นเกิดการแกว่งของข้อมูลและไม่สามารถนำค่ามาใช้งานได้ แต่มีผลกระทบกับเทคนิคการวัดแบบวิเคราะห์หาร์มพีแดนซ์โดยใช้สัญญาณรูปไซน์น้อย



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชั้นที่ 2

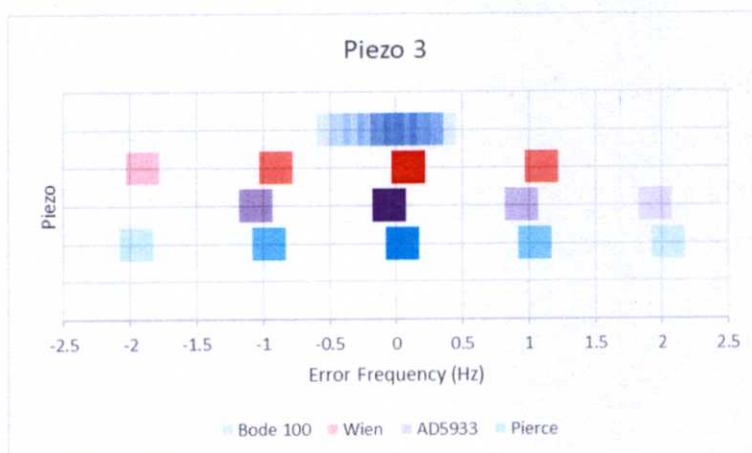
จากรูปที่ 4.10 แสดงภาพการกระจายตัวของข้อมูลความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของข้อมูลเพียโซ 1 แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อเพียโซมีความถี่สั่นพ้องที่ไม่ชัดเจนทำให้ข้อมูลจากการวัดกระจายตัวมากขึ้น ทำให้ความเที่ยงตรงของระบบน้อยลงได้ นอกจากการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาร์มพีแดนซ์ Bode 100 ยังคงให้ความเที่ยงตรงเหมือนเดิม

4.1.3 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชนิดที่ 3



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชนิดที่ 3

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าความถี่สั่นพ้องของเพียโซชนิดที่ 3 แต่ละเทคนิคมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการวัดแอมพลิจูดของแรงดันจากสัญญาณความถี่ที่ใส่ไปในเพียโซอย่างเดียวนั้นเป็นการวัดเฉพาะค่า Resistance ซึ่งเป็นค่าความต้านทานในแกนจริง ไม่สามารถวัด Reactance ซึ่งเป็นค่าความต้านทานในแกนจินตภาพได้ ซึ่งในเพียโซชนิดนี้มีค่า Reactance สูง ค่าที่อ่านได้จึงมาความผิดพลาดจากความไม่เป็นจริง และไม่นำค่าที่อ่านได้จากวงจร Colpitts มาเปรียบเทียบเนื่องจากวงจรนี้จะ Oscillate ที่ความถี่สั่นพ้องในโหมดที่สูง ค่าที่อ่านได้จึงไม่ใช่โหมดเดียวกัน ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชนิดที่ 3

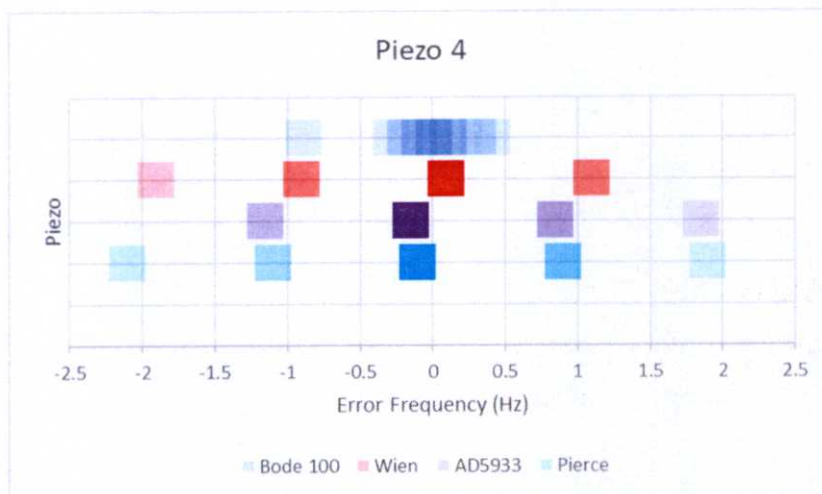
จากรูปที่ 4.12 การกระจายตัวของข้อมูลเพียโซชนิดนี้ค่อนข้างน้อย ค่าที่อ่านได้ค่อนข้างเที่ยงตรงเนื่องจากมีความถี่สั่นพ้องเพียงไม่กี่โหมด และแต่ละโหมดมีความชัดเจนมาก

4.1.4 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชั้นที่ 4



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชั้นที่ 4

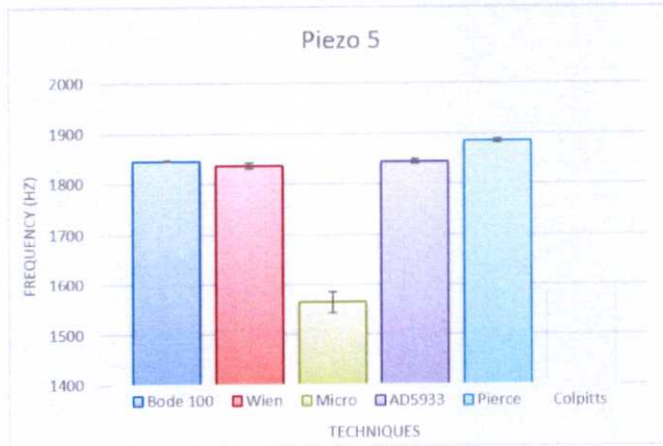
จากรูปที่ 4.13 สำหรับเพียโซที่ชั้นที่ 4 ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับเพียโซชั้นที่ 3 ที่นำมาทดลอง แต่มีขนาดที่กว้างกว่าทำให้ความถี่สั่นพ้องสูงกว่า แต่มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน และมีความถี่สั่นพ้องขนาดใหญ่ที่ประมาณ 17 kHz ทำให้วงจร Colpitts ไม่สามารถใช้งานได้



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชั้นที่ 4

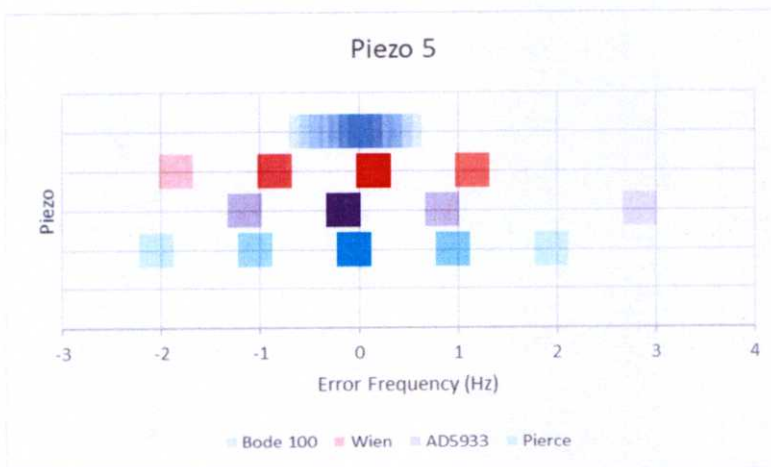
จากรูปที่ 4.14 การกระจายข้อมูลมีลักษณะเดียวกับการทดลองใช้เพียโซชั้นที่ 3 ซึ่งมีความเที่ยงตรงสูงเนื่องจากมีความถี่สั่นพ้องความถี่เดียวขนาดใหญ่

4.1.5 เปรียบเทียบการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซชิ้นที่ 5



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 5

จากรูปที่ 4.15 เนื่องจากเป็นเพียโซชนิดเดียวกับเพียโซชิ้นที่ 3 และชิ้นที่ 4 ผลการเปรียบเทียบจึงออกมาในลักษณะเดียวกัน แต่เนื่องจากเพียโซชิ้นที่ 5 นี้มีความถี่สั่นพ้องเด่นที่ใกล้กันถึง 3 ความถี่ จึงทำให้การวัดค่าโดยใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีฮาร์โมนิกอื่นมากเกิดการคลาดเคลื่อนที่มากตาม ทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่ใกล้ความเป็นจริง และการที่มีความถี่สั่นพ้องเด่นใกล้เคียงกันหลายความถี่ วงจร Pierce Oscillator จึงใช้เวลาเริ่มสั่นค่อนข้างนาน โดยที่วงจรนี้จะสั่นที่ความถี่สั่นพ้องแรก หรือความถี่สั่นพ้องที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของการวัดความถี่สั่นพ้องเพียโซชิ้นที่ 5

จากรูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลการวัด จะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเพียโซชิ้นที่ 3 และชิ้นที่ 4 เนื่องจากเป็นชนิดเดียวกัน มีความถี่สั่นพ้องเด่นที่ชัดเจน คือมีค่าความต้านทานที่ลดลงชัดเจน และช่วงความถี่ที่แคบมาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลการวัดค่าความถี่สั่นพ้องจากเทคนิคและวงจรที่ได้ทำการประยุกต์ขึ้นและแสดงข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิค

5.1 สรุปผลการวัดค่า

5.1.1 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย Wien Bridge Oscillator

เทคนิคการวัดนี้จัดอยู่ในกลุ่มการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ กล่าวคือเป็นการสร้างสัญญาณความถี่ต่างๆด้วยวงจร Wien Bridge Oscillator ผ่านไปในอุปกรณ์ที่ต้องการวัดค่าอิมพีแดนซ์ แล้วทำการวัดแอมพลิจูดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์จะได้อิมพีแดนซ์ และนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งความถี่ที่มีอิมพีแดนซ์ที่ต่ำที่สุดจะได้ค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียงโซ่

ข้อดี

- วงจรมีความซับซ้อนน้อย ใช้อุปกรณ์ราคาถูก
- สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่สมบูรณ์ จึงทำให้สามารถวัดค่าได้แม่นยำ
- สามารถขยายกำลังได้ด้วยวงจรแอมพลิฟายเออร์เพื่อใช้วัดเพียงโซ่ขนาดใหญ่ได้

ข้อเสีย

- ต้องใช้หลอดไฟไส้โลหะเพื่อลดอัตราขยายแบบอัตโนมัติซึ่งทำให้ระบบใช้พลังงานสูง
- ในการปรับความถี่ต้องทำการปรับค่าความต้านทานพร้อมกันสองตัว
- ปรับค่าความต้านทานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ยาก
- ใช้เวลาในการ Sweep ความถี่ค่อนข้างนาน

5.1.2 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย Microcontroller Oscillator

เทคนิคการวัดนี้จัดอยู่ในกลุ่มการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เช่นเดียวกับการใช้วงจร Wien Bridge Oscillator แต่วิธีนี้จะใช้การสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง และวัดแอมพลิจูดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวกัน

ข้อดี

- วงจรมีความซับซ้อนน้อยมาก ใช้อุปกรณ์น้อยมาก
- ในระบบขนาดเล็กสามารถทำให้ใช้พลังงานต่ำมากได้
- สามารถขยายกำลังได้ด้วยวงจรขยายสัญญาณเพื่อใช้วัดเพียโซขนาดใหญ่ได้

ข้อเสีย

- สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมมีฮาร์โมนิกอื่นที่ไม่ต้องการทำให้ค่าที่วัดได้ไม่เที่ยงตรง
- ค่าที่วัดได้มีความแม่นยำต่ำมากเนื่องจากสัญญาณสี่เหลี่ยม
- ปรับความถี่แต่ละขั้นได้ไม่ละเอียด
- ใช้เวลาในการ Sweep ความถี่ค่อนข้างนาน

5.1.3 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วย ไอซี AD5933

เทคนิคการวัดนี้จัดอยู่ในกลุ่มการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เช่นเดียวกับวงจรข้างต้นแต่จะใช้วงจรสำเร็จรูปที่สามารถวัดค่าความต้านทานได้ทั้งแกนจริงและแกนจินตภาพ และวิเคราะห์ออกมาเป็นค่าอิมพีแดนซ์ได้ทันที ทำให้ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

ข้อดี

- วงจรมีความซับซ้อนน้อย
- มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงใกล้เคียงเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์
- สามารถขยายกำลังได้ด้วยวงจรแอมพลิฟายเออร์เพื่อใช้วัดเพียโซขนาดใหญ่ได้
- สามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประสิทธิภาพต่ำได้เนื่องจากไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าใดๆ แล้ว

ข้อเสีย

- ต้นทุนสูงที่สุดในจากวงจรที่ได้เลือกมา ซึ่งราคาไอซีอยู่ที่ประมาณหนึ่งพันบาท
- ใช้เวลาในการวัดนานมาก ประมาณ 10 – 60 วินาที ตามความละเอียดที่ตั้ง
- ต้องมีการ Calibrate ทุกครั้งก่อนวัด ซึ่งใช้เวลามาก

5.1.4 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยวงจร Pierce Gate Oscillator

เทคนิคการวัดนี้จัดอยู่ในกลุ่มวงจร Resonator ซึ่งเป็นวงจรที่ทำให้เกิดการสั่นของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยสามารถกำหนดได้ด้วยค่า RLC หรือ ค่าความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซ กล่าวคือ วงจรนี้จะสามารถสร้างสัญญาณที่ความถี่สั่นพ้องของเพียโซได้แบบ Real-Time โดยวงจรใช้ Not-Gate เพียงตัวเดียว และตัวเก็บประจุขนาดเล็กอีกสองตัวเท่านั้น

ข้อดี

- วงจรมีความซับซ้อนน้อยมาก มีต้นทุนต่ำ
- มีความเที่ยงตรงและแม่นยำค่อนข้างสูง
- ใช้พลังงานต่ำมาก
- สามารถสร้างความถี่สั่นพ้องได้แบบ Real-Time
- ใช้เวลาในการวัดที่น้อยมาก สูงสุด 1 วินาที ที่ความละเอียด 1 Hz

ข้อเสีย

- เนื่องจากสัญญาณมีฮาร์โมนิกอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องบ้างจึงทำให้ความแม่นยำต่ำลง
- มีกำลังขับต่ำ ไม่สามารถใช้กับเพียโซขนาดใหญ่ได้
- วัดความถี่สั่นพ้องได้แค้โหมดแรกสุดคือความถี่ต่ำสุด

5.1.5 การวัดความถี่สั่นพ้องด้วยวงจร Colpitts Crystal Oscillator

เทคนิคการวัดนี้จัดอยู่ในกลุ่มวงจร Resonator เช่นเดียวกับวงจร Pierce Oscillator ซึ่งวงจรมีความถี่สูง หรือความถี่วิทยุ มีความเสถียรสูง และสร้างสัญญาณใกล้เคียงรูปไซน์มากกว่า โดยมีอุปกรณ์หลักเป็นทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว หมายความว่าสามารถเพิ่มกำลังขับได้ด้วยทรานซิสเตอร์นั้น

ข้อดี

- วงจรมีความซับซ้อนน้อยมาก มีต้นทุนที่ถูกลง
- สามารถสร้างความถี่สั่นพ้องได้แบบ Real-Time
- ใช้เวลาในการวัดที่น้อยมาก สูงสุด 1 วินาที ที่ความละเอียด 1Hz
- สามารถขยายกำลังขับได้โดยการเปลี่ยนทรานซิสเตอร์

ข้อเสีย

- เนื่องจากสัญญาณมีฮาร์โมนิกอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องบ้างจึงทำให้ความแม่นยำต่ำลง
- วงจรจะ Oscillate ที่ความถี่สั่นพ้องหลายๆ ซึ่งมีความถี่สูง
- หากมีมากกว่า 1 โหมดจะไม่สามารถวัดโหมดแรกได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยที่ต้องมีการวัดความถี่สั่นพ้องของเพียโซด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพต่ำนั้น สามารถนำเทคนิคที่ได้นำเสนอนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ตามความเหมาะสม ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์เงื่อนไขของการวัดอย่างไรบ้าง จึงจะสามารถเลือกเทคนิควงจรที่เหมาะสมกับงานได้

ยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดทางชีวภาพขนาดพกพานั้น มีวัสดุเพียโซเป็นแผ่นควอทซ์คริสตัลที่มีความถี่สูงมาก โดยมีเงื่อนไขคือจำเป็นต้องใช้เวลาในการวัดสั้นเนื่องจากต้องวัดแบบ Real - time และต้องใช้พลังงานต่ำมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ขนาดพกพาต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ จากเงื่อนไขดังกล่าววงจร Pierce Gate Oscillator จึงเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ในงานนี้ดังงานวิจัยที่ได้นำเสนอในภาคผนวกในบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Comparative study of QCM analyzers based on pierce oscillator and electromechanical impedance techniques, 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON) Laung Prabang, Laos , December 2016, pp. 1-4.

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Saar, M. Reidla, O. Martens, R. Land, M. Min, H. Herranen, "Chirp-based piezo-impedance measurement" **Intelligent Signal Processing (WISP)**, September 2013, pp. 83-86.
- [2] T. Saar, O. Märtens, M. Reidla, A. Ronk, "Chirp-based impedance spectroscopy of piezo-sensors" **Electronics Conference (BEC)**, October 2010, pp. 339 - 342.
- [3] P. Banerjee, S. Dasgupta, R. Ghosh, B. Goswami, "Electrical impedance model of piezoelectric based sensor" **Control, Measurement and Instrumentation (CMI)**, January 2016, pp. 67-71.
- [4] Z. Xinyi, L. Sang, "Large-signal impedance measurements of piezoelectric ultrasonic transducers" **Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)**, July 2015, pp. 731 - 736.
- [5] William R. Cook, "Chapter V: Ferroelectric and piezoelectric materials" **Literature on Dielectrics, Volume 28, 1964**, pp. 179 - 230.
- [6] L. E. Cross, R. E. Newnham, "Ferroelectric, piezoelectric, and electrooptic materials" **Literature on Dielectrics, Volume 34, 1970**, pp. 374 - 432.
- [7] Bhatt, P. "Maximum Marks Maximum Knowledge in Physics." **Allied Publishers. ISBN 9788184244441**. Retrieved 10 January 2014.
- [8] "Pendulum". **Miriam Webster's Collegiate Encyclopedia**. Miriam Webster. 2000. ISBN 0-87779-017-5. pp. 1241
- [9] Franklin Benjamin, "How Franklin Invented the Armonica and How to Build One", July 1762
- [10] R. Nishikawa, N. Satoh, "Frequency characteristics of the piezoelectric device for the floor-vibration generation" **Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, November 2016, pp. 1-4.
- [11] A. Daugela, H. Fujii, G. Kulvietis, H. Uematsu, "Measurement of the contact impedance of polymers using a multilayered piezo vibroimpactor" **Micro Machine and Human Science**, October 1994, pp. 161.
- [12] J.R. Harrison, "Piezo-Electric Resonance and Oscillatory Phenomena with Flexural Vibrations in Quartz Plates" **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, December 1927, pp. 1040 - 1054.

- [13] A. Iqbal, F. Mohd-Yasin, "Comparison of seven cantilever designs for piezoelectric energy harvester based On Mo/AlN/3C-SiC" **Micro and Nanoelectronics (RSM)**, August 2015, pp. 1-4.
- [14] R. Mishra, S. Jain, C. Durgaprasad, "Analysis of piezoelectric buzzers as vibration energy harvesters" **Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)**, March 2016, pp. 1660 - 1664.
- [15] H. Gulec, A. Akyurekli, M. Gul, M. Gurbuz, B. Koc, A. Dogan, "Wide-band piezoelectric resonance frequency energy harvester" **International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)**, May 2014, pp. 1-4.
- [16] Evin Şahin Sadık, et al, "Measurement of glucose levels with Quartz Crystal Microbalance (QCM) based sensor" **Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)**, February 2017, pp. 1-4.
- [17] Prolay Sharma, et al, "Detection of Methyl Salicylate in Black Tea Using a Quartz Crystal Microbalance Sensor" **IEEE Sensors Journal**, May 2016, pp. 5160 - 5166.
- [18] Karekin D. Esmeryan, et al, "Humidity Tolerant Organic Vapor Detection Using a Superhydrophobic Quartz Crystal Microbalance" **IEEE Sensors Journal**, July 2015, pp. 6318 - 6325.
- [19] Nor Aimi Saad, et al, "Quartz crystal microbalance for bacteria application review" **2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED)**, August 2014, pp. 455 - 460.
- [20] Shuichiro Kagiyama, et al, "Detection of influenza virus subtype using quartz crystal microbalance" **2014 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)**, November 2014, pp. 1-2.
- [21] Y. Yao, X. Chen, W. Ma, W. Ling, "Quartz Crystal Microbalance Humidity Sensors Based on Nanodiamond Sensing Films" **IEEE Transactions on Nanotechnology**, March 2014, pp. 386 - 393.
- [22] Ioana Daniela Dulama, et al, "Quartz crystal microbalance used for determination of dyes from wastewaters" **CAS 2013 (International Semiconductor Conference)**, October 2013, pp. 107 - 110.
- [23] Chi-Yen Shen, et al, "The Detection of Cartilage Oligomeric Matrix Protein Using a Quartz Crystal Microbalance" **2010 Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing**, December 2010, pp. 126 - 129.

- [24] I.D. Dulama, et al, "Analysis of liquids and viscoelastic films by quartz crystal microbalance" **CAS 2010 Proceedings (International Semiconductor Conference)**, October 2010, pp. 225 - 228.
- [25] Shamieh C. and McComb G., *Electronics for Dummies*, John Wiley & Sons, 2011.
- [26] Meade R., *Foundations of Electronics*, Cengage Learning, 2002.
- [27] S. K. Kulangara, "Shear-mode piezo transducers for HGA dynamics testing" **IEEE Transactions on Magnetics**, September 2013, pp. 2246 - 2248.
- [28] M. Su, B. Kim, "Energy harvest-power MEMS devices for future sensor network society: Stochastic resonance meets TENG device" **CPMT Symposium Japan (ICSJ)**, November 2016, pp. 71 - 73.
- [29] R. Mishra, S. Jain, C. Durgaprasad, "Analysis of piezoelectric buzzers as vibration energy harvesters" **2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)**, March 2016, pp. 1660 - 1664.
- [30] Hakan Gulec, et al, "Wide-band piezoelectric resonance frequency energy harvester" **Applications of Ferroelectrics, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)**, May 2014, pp. 1-4.
- [31] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, C. Durgaprasad, "A wearable piezoelectric rotational energy harvester" **Body Sensor Networks (BSN), 2013 IEEE International Conference**, May 2013, pp. 1-6.
- [32] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, C. Durgaprasad, "A model for magnetic plucking of piezoelectric beams in energy harvesters" **2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)**, June 2013, pp. 1364 - 1367.
- [33] M. T. Abuelma'atti, Z. J. Khalifa, "A memristor based Wien-bridge sinusoidal/chaotic oscillator" **2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)**, January 2016, pp. 1-4.
- [34] Milan Stork, "Wide range voltage controlled oscillators sinusoidal Wien-bridge and ring" **Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) , 2014 24th International Conference**, April 2014, pp. 1-4.

- [35] F. Tavernier, P. Moreira, K. Poltorak, "Wien bridge-based calibration circuit for CDR applications" **Electronics Letters**, August 2013, pp. 1128 - 1130.
- [36] P. W. Van Der Walt, "A Wien-bridge oscillator with high-amplitude stability" **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, December 1981, pp. 292 - 294.
- [37] E. A. Faulkner; J. B. Grimbleby, "A high-frequency-optimized RC-active filter based on the Wien bridge" **Radio and Electronic Engineer**, September 1975, pp. 462 - 464.
- [38] B. V. Rao; S. H. Kajiji, "Wide band wien bridge R.F. oscillator" **India, IEE-IERE Proceedings**, September 1977, pp. 188 - 194.
- [39] B. Croitoru, A. Tulbure, M. Abrudean, "Microcontroller-based multiple-platform PWM signal generation procedures for industrial " **IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics**, May 2014, pp. 1-6.
- [40] Mitar Simic, "Realization of Complex Impedance Measurement System Based on the Integrated Circuit AD5933" **2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)**, November 2013, pp. 573 - 576.
- [41] Mitar Simic, "Realization of digital LCR meter" **2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)**, October 2014, pp. 769 - 773.
- [42] Lin Yan, Liu Wen Ding, "Low-power design of impedance measurement system based on MSP430F149" **IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering**, June 2011, pp. 252 - 254.
- [43] Z. Z. Wu, V. A. Thakar, A. Peczalcki, M. Rais-Zadeh, "A low phase-noise Pierce oscillator using a piezoelectric-on-silica micromechanical resonator" **2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)**, June 2013, pp. 490 - 493.
- [44] H. Bahadur; R. Parshad, "Modified Pierce oscillator circuit" **Proceedings of the IEEE**, February 1978, pp. 258 - 259.
- [45] J. R. Pierce, "Discussion on "Reflex Oscillators" (J. R. Pierce)" **Proceedings of the IRE**, July 1945, pp. 483 - 485.

- [46] Pierce, George W, "Piezoelectric crystal resonators and crystal oscillators applied to the precision calibration of wavemeters", **Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences**, October 1923, pp.81–106.
- [47] W. L. Chen, L. H. Zheng, X. X. Song, "Design of two-stage chaotic Colpitts oscillator", **IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)**, June 2016, pp. 1029 – 1031.
- [48] Anisha M. Apte, et al, "Colpitts oscillator: A new criterion of energy saving for high performance signal sources" , **IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)**, May 2016, pp. 1-7.
- [49] T. Adachi, M. Hirose, Y. Tsuzuki, "Computer Analysis of Colpitts Crystal Oscillator", **39th Annual Symposium on Frequency Control**, May 1985, pp. 176 - 182.
- [50] T. Adachi, M. Hirose, Y. Tsuzuki, "Computer Analysis of Colpitts Crystal Oscillator", **39th Annual Symposium on Frequency Control**, May 1985, pp. 176 - 182.
- [51] Theron Jones. "Design a Crystal Oscillator to Match Your Application". **Maxim tutorial 5265**, September 2012, Maxim Integrated Products, Inc
- [52] Piezoelectricity. Available: <http://dev.nsta.org/evwebs/2014102/news/default.html>
- [53] Etienne Herth et al, "Detection of out-of-plane and in-plane (XYZ) motions of piezoelectric microcantilever by 3D-Laser Doppler Vibrometry" **Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)**, June 2016 pp. 1 – 4.
- [54] Keysight E4990A Datasheet Available: literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-3888EN.pdf
- [55] AD5933 Datasheet Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>
- [56] Q-Sense QCM-D Available: <http://www.biolinscientific.com/q-sense/technologies/>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

ก-1 บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Subhawatt Jayasvasti, Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang “Comparative study of QCM analyzers based on piezoelectric oscillator and electromechanical impedance techniques” , 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEICON) Laung Prabang, Laos , December 2016, pp. 1-4.

9th Biomedical Engineering International Conference (BMEICON), Laung Prabang, Laos



BME*i*CON 2016

Program and Abstracts
The 9th Biomedical Engineering
International Conference
December 7-9, 2016



Comparative Study of QCM Analyzers Based on Pierce Oscillator and Electromechanical Impedance Techniques

Subhawat Jayasvasti, Don Isarakorn and Songmoung Nundrakwang
Department of Instrumentation and Control Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
kidon@kmitl.ac.th

Abstract—This paper presents a comparison between pierce oscillator and impedance analysis techniques for measuring the frequency of the quartz crystal. The QCM analyzer based on pierce oscillator is designed, realized, and then compared to the impedance analyzer (Type bode 100). The comparison is focused on accuracy and precision of measurement. The pierce oscillator in a completed-chip is employed in the QCM analyzing device in order to simplify the circuit of system. The frequency drift and standard deviation (SD) values which are obtained from resonant frequency measurement are studied in order to investigate the accurate and precise measurement of devices. In the experiment, an AT-cut quartz disc of crystal oscillator package HC49U is unloaded and loaded while it is being measured the frequency. From the experimental results, the QCM analyzer based on pierce oscillator and impedance analyzer have the approximate accuracy and precision of measurement. The QCM analyzer based on pierce oscillator has lower sensitivity due to the frequency drift.

Keywords—Pierce Oscillator ; Accuracy and Precision of Resonant Frequency Measurement

I. INTRODUCTION

In recent years, the quartz crystal microbalance (QCM) biosensor technology is not only increasingly important in various fields of work, but it also has received more attention from many researchers due to its low cost, high sensibility and high stability. Many QCM biosensors have been employed in the works of medical diagnostics, agricultures, and environmental monitoring [1-3]. The QCM biosensors typically consist of an oscillating quartz disc with circular electrodes on its surfaces, and a quartz driver circuit. When the liquid or mass is adsorbed or placed into a quartz surface, the oscillating frequency is decreased due to the characteristic of piezoelectric effect [4]. As consequence of this, the referential between resonant frequencies of a quartz disc with load and no-load on its surface is utilized to recognize the weight mass and viscosity of liquid or mass.

The popularity approaches for measuring the resonant frequency of the QCM biosensor are gate oscillator and electromechanical impedance techniques. However, both of them present advantages and disadvantages depending on the

application. Since the AT-cut quartz discs with resonant frequency higher than 1 MHz are commonly used in QCM biosensor in order to detect the minimum mass [5-8], the impedance analyzer which can measure high-frequency is required. Even though the high-frequency impedance analyzer can provide the high performance of measurement, it is expensive, needs to be calibrated to prevent measurement errors, and consists of the complicated circuit. On the other hand, the gate oscillator is cheap, low profile of circuit and can measure the high-frequency, but it provides the lower accuracy and precision of measurement.

The aim of this paper is to design and realize the QCM analyzer based on gate oscillator (pierce oscillator). Then, the fabricated QCM analyzer is investigated by detecting the liquid load on the surface of oscillating crystal. The errors in measured values of the fabricated QCM analyzer and the high-frequency impedance analyzer (Type bode 100) are lastly compared.

II. DESIGN AND FABLICATION OF QCM ANALYZER BASED ON PIERCE OSCILLATOR

A. Conceptual System

The conceptual QCM analyzer is a handheld and convenient device for both indoor and outdoor use, which consists of the frequency measurement circuit, data logger, and power management circuit as shown in Fig. 1.

In order to simplify the frequency measurement circuit, the pierce oscillator integrated circuit SN74LCV1GX04 is employed for detecting the frequency of quartz crystal as illustrated in Fig. 2. The frequency of quartz crystal through the pierce oscillator is going to be the Transistor-transistor logic (TTL) square wave, which can be directly counted using the internal timer counter module of microcontroller. To prevent the false of frequency counting, the pulse waves from pierce oscillator are compared to the pulse waves with calibrated frequency of 1 Hz from Real-time clock DS1037 while counting as shown in Fig.3.

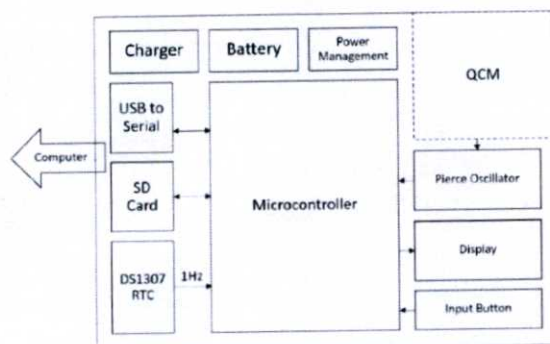


Fig. 1. Block diagram of conceptual QCM analyzer based on pierce oscillator

While the quartz crystal is being driven without based clamp or case, the external vibrations will produce the false results on frequency measurement, therefore in the Fig. 4 the quartz crystal is clamped and covered to prevent the disturbance of external vibration. In addition, the electrical signal from pierce oscillator for driving the quartz crystal is very weak which can easily be disturbed by the external electrical field (noise), consequently the pierce oscillator circuit is placed where closest with crystal oscillator as illustrate in Fig.5.

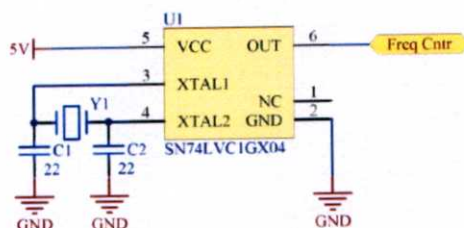


Fig. 2. A quartz crystal driver circuit.

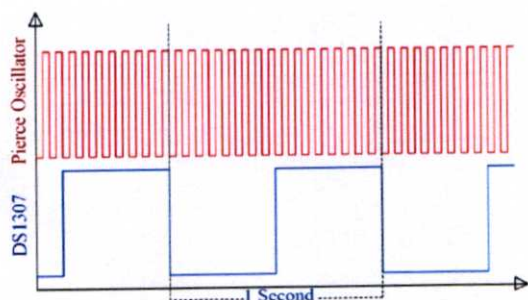


Fig. 3. The comparison between pulse waves of pierce oscillator and real-time clock DS1037

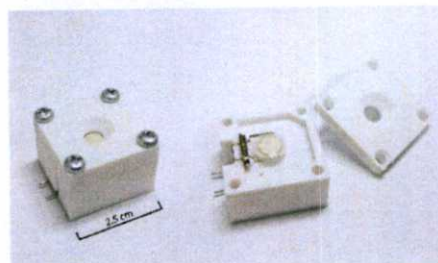


Fig. 4. Printed QCM case from 3D printer

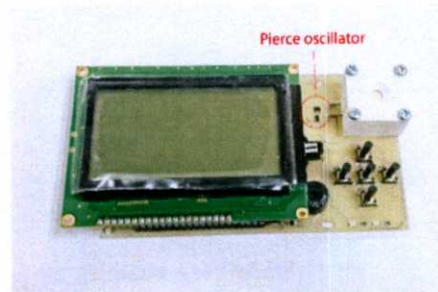


Fig. 5. Fabricated QCM analyzer based on pierce oscillator

III. EXPERIMENTAL SETUP

To investigate the accurate and precise measurement of fabricated QCM analyzer based on pierce oscillator and the high-frequency impedance analyzer (Type bode 100), both of them are tested measuring the resonant frequency of a same quartz crystal. The AT-cut quartz disc of crystal oscillator package HC49U in Fig.6 is used for experiment, which has a diameter of 8mm and resonant frequency of 6 MHz. In the experiment, the QCM analyzers are used to measure the frequency of quartz disc which is unloaded and loaded with the 2, 4, and 6 μl of distilled water on its surface.

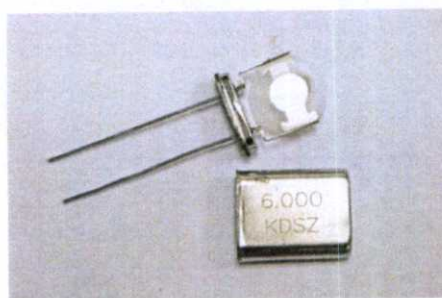


Fig. 6. A quartz disc of crystal oscillator package HC49U

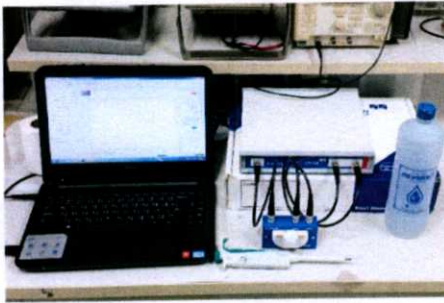


Fig. 7. Measurement setup of impedance analyzer (Type bode 100)

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In Fig.8, the electrical signal from pierce oscillator for driving a quartz crystal is not the pure sine wave which has many harmonics. These harmonic waves drive the quartz crystal in many vibration modes shape. Therefore, the measured resonant frequencies from pierce oscillator are not match to the measured resonant frequencies from the high-impedance analyzer as show in Table.1, though both of the pierce oscillator and the high-impedance analyzer are measured the same quartz crystal. These problems are not the core issue for the mass measurement, since the measured weight mass and viscosity of liquid or mass obtained from frequency drift.

To obtain the accurate and precise measurement of pierce oscillator and the high-frequency impedance analyzer (Type bode 100), the measured resonant frequencies and frequency drift are analyzed. Fig.9 shows the measured resonant frequencies from pierces oscillator. While the quartz crystal is unloaded and loaded with 2, 4, and 6 μl of distilled water, its resonant frequency is dropped by 5995763, 5995319, 5994844, and 5994205 Hz, respectively; the measured resonant frequencies are the average values, since they are swing while the quartz crystal is loaded.

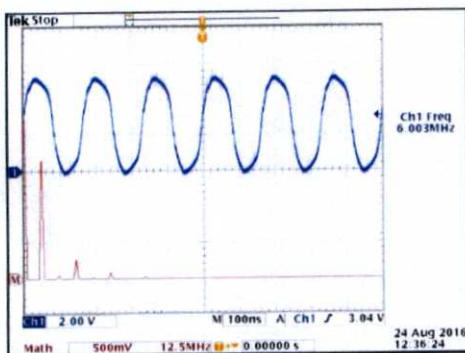


Fig. 8. The electrical signal from pierce oscillator for driving quartz crystal

Fig.10 illustrates the measurement results of impedance analyzer. The resonant frequencies of quartz crystal are obtained by using the impedance analyzer to measure the impedance magnitude of quartz crystal. During measurement, the impedance analyzer will sweep the frequencies with 1 Vrms through a reference resistance $50\ \Omega$ to a quartz crystal. As the graphs in Fig.10, the lowest point with minimum impedance is the resonant frequency.

To compare the precise measurement of pierce oscillator with the precise measurement of impedance analyzer, the measured resonant frequency of both pierce oscillator and impedance analyzer are plotted as the frequency drift in the Fig.11. As can be seen, the interaction between measured resonant frequency and quartz-crystal's proof mass of the two measurement techniques are not the same. But their frequency drift increasingly shifts in linear. Therefore, their precise measurement is quite the same.

In addition, the accurate measurements between the measurements of pierce oscillator and impedance analyzer can be compared by considering standard deviation (SD) and relative error of the measured resonant frequency. The standard deviation value is obtained from the resonant frequency measurement that implemented more than one time, which is demonstrated in Table 1. From Table 1, The SD values of impedance analyzer is less than the SD values of pierce oscillator, consequently the impedance analyzer has the better accuracy in frequency measurement. Even though, the pierce oscillator has lower accuracy, it is usable because its SD values or error are approximate to the SD values of an impedance analyzer

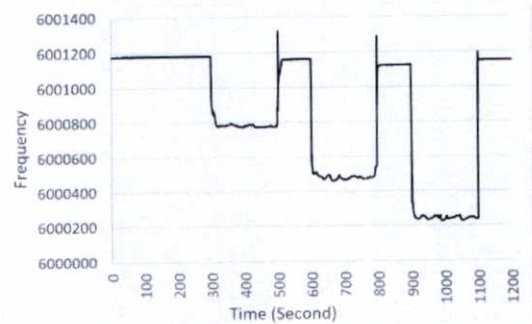


Fig. 9. The measured frequencies from QCM analyzer based on pierce oscillator

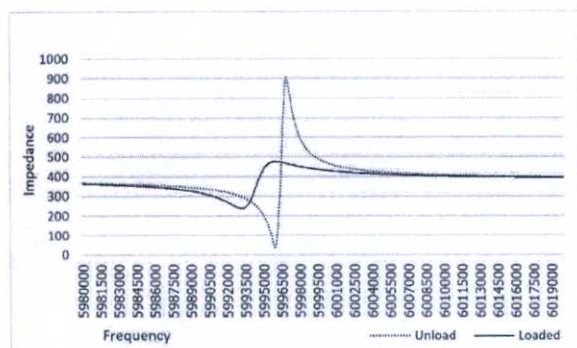


Fig. 10. The measured frequencies from impedance analyzer

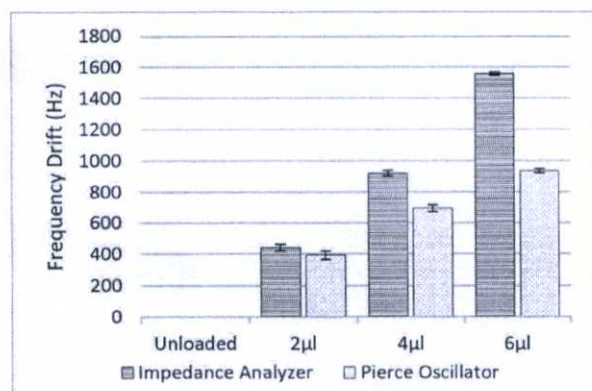


Fig. 11. Frequency drift of measured resonant frequency

TABLE I. THE MEASURED RESONANT FREQUENCIES AND STANDARD DEVIATION VALUES

		Unload	2 μ l	4 μ l	6 μ l
Impedance Analyzer	Mean (Hz)	5995763	5995319	5994844	5994205
	SD	0	19.0832	18.6024	10.2746
	Relative error (%)	0	0.000318	0.000310	0.000171
Pierce Oscillator	Mean (Hz)	6001179	6000786	6000484	6000244
	SD	1.0985	28.0505	23.9915	15.0675
	Relative error (%)	0.000183	0.000467	0.000399	0.000251

V. CONCLUSIONS

The comparison between pierce oscillator and impedance techniques for measuring the frequency of quartz crystal are drawn in this paper. The QCM analyzer based on pierce oscillator is designed and fabricated. The comparison is focused on the accurate and precise measurement of The QCM analyzer based on pierce oscillator and high-frequency impedance analyzer (Type bode 100), which is done by

following the parameters of frequency drift, standard deviation (SD) values and relative error. As the results, the accurate and precise measurement of QCM analyzer based on pierce oscillator is approximate to the accurate and precise measurement of impedance analyzer.

ACKNOWLEDGMENT

Mr. Subhawati Jayasvasti would like to express sincere appreciation to the Higher Education Research Promotion – National Research Universities (HERP - NRU) for the financial support in this research and acknowledge to King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand for supplying the excellent research facilities.

REFERENCES

- [1] Matthew J. van der Werff, Yong J. Yuan and W. L. Xu, "Quartz Crystal Microbalance for Medical Diagnostics," 1st International Conference on Sensing Technology, pp. 500 - 5004, 2005.
- [2] Heydari, S. and Haghayegh, G.H, "Application of Nanoparticles in Quartz Crystal Microbalance Biosensors," Journal of Sensor Technology, vol. 4, pp. 81-100, 2014.
- [3] Palchetti, I. and Mascini, M, "Nucleic Acid Biosensors for Environmental Pollution Monitoring," Analyst, vol.133, pp. 846-854, 2008.
- [4] Bustabad E.A, Garcia.G, Rodriguez-Pardo.L, Faria.J, Perrot.H, Gabrielli.C, Bucur. B, Lazerges. M, Rose. D, Compere. C and Amaub A, "A biosensor for detection of DNA sequences based on a 50MHz QCM electronic oscillator circuit," Sensors , vol. 1-3, pp. 687 - 690, October 2009.
- [5] Chang-Yu Lin, I-Yu Huang and En-Chang Wu, "The Effect of Glutaraldehyde Cross-Linking layer on QCM Based Alpha-Fetoprotein Biosensor," IEEE SENSORS Conference, pp. 379-383, 2009.
- [6] Z. Şen, I. Gürol, G. Gümüş, E. Musluoğlu, M. Harbeck and V. Ahsen, Z. Z. Öztürk, "Organophosphate Sensing with Vic-Dioximes using QCM Sensors," IEEE SENSORS Conference, pp. 2127- 2130, 2010.
- [7] Xiao-Lan Wei, Jing Zhang and Zhi-Hong Mo, "Regulation of Chemokine Receptor CXCR4 in HepG2 Cell Adhesion Sensing by QCM," International Conference on Human Health and Biomedical Engineering, pp. 1317- 1320, 2011.
- [8] Uraivan Waiwijit, Kata Jaruwongrungrsee, Nipa Chokesajjawatee, Jurairat Promjai, Tanom Lomas, Pompimol Sritongkham, and Adisorn Tuantranont, "QCM-Based DNA Biosensor for Salmonella typhimurium Detection", IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), pp.1-3, 2012.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 กันยายน 2534
ที่อยู่	99/11 หมู่บ้านกุลพันธ์วิลล์ 8 ต.หนองควาย อ.หางดง จ.เชียงใหม่ 50230
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. วงจรปรับปรุงสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ (Signal Conditioning) 2. การจัดการสัญญาณรบกวน (Noise Reduction Technique) 3. ออกแบบและประยุกต์ Sensor/Transducer 4. การบริหารพลังงานขนาดเล็ก (Micro-Energy Management)

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- Don Isarakorn and Subhawat Jayasvasti, “ 10 Selections Vending Machine” , Worldlink Info Tech co. ltd, 2013.
- Don Isarakorn and Subhawat Jayasvasti, “ 18 Selections Vending Machine” , Worldlink Info Tech co. ltd, 2016.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang and Subhawat Jayasvasti, “ Impedance analyzer for laboratory” , Faculty of Engineering, King Mongkut’ s Institute of Technology Ladkrabang, 2014.
- Don Isarakorn, Songmoung Nundrakwang, Thapanun Sudhawiyangkul and Subhawat Jayasvasti, “ The implementation of Ultrasonic Technology for Biofouling Mitigation”, PTT Public Company Limited, 2015.
- Don Isarakorn and Subhawat Jayasvasti, “ Low Cost Piezoelectric Biosensor System”, Office of the Higher Education Commission, 2016
- Don Isarakorn Songmoung Nundrakwang, Pattanaphong Janphung and Subhawat Jayasvasti, “Bicycle Power Meter”, Spin Mode co. ltd, 2017.