

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ

DESIGN OF METAL DETECTOR



เลขหมู่.....**71962**
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ย. 2550

b. 414 600 65
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF METAL DETECTOR



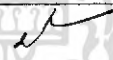
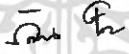
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ
DESIGN OF METAL DETECTOR
นักศึกษาผู้จัดทำ นายพลาดล บวกไชสง รหัสนักศึกษา 46010503
นายพิสิฐ บุราสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 46010534
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์	
ผศ.ดร.อัมพวัน ใจกล้า	

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ.ประภาส อุกกิตมาพันธุ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ	
	DESIGN OF METAL DETECTOR	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายพลาดล บวกโรสง	รหัสนักศึกษา 46010503
	นายพิสิฐ บุราสิทธิ์	รหัสนักศึกษา 46010534
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์	
	ศศ.ดร.อัมพวัน ใจกล้า	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ ซึ่งสามารถตรวจจับโลหะ และแสดงระยะห่างของโลหะ ยิ่งกว่านั้นยังได้มีการพัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถบอกประเภทและขนาดของโลหะที่มีขนาดเล็กถึง 1 cm² ในการตรวจจับได้ โดยได้นำหลักการพื้นฐานของการผสมควมถี่แบบเบียดควมถี่ (BFO) มาใช้ในการตรวจหาโลหะ อีกทั้งในส่วนของการแสดงผลยังได้มีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม Buzzer และ 7-segment เพื่อควบคุมเสียงและแสดงระยะทางในการตรวจจับ พร้อมทั้งได้มีการนำเสนอผลการพิสูจน์สมรรถนะและการทดลองวัดโลหะไว้ภายในด้วย

Thesis Title	Design Of Metal DETECTOR	
Author	Mr. Paladon	Buakthaisong
	Mr. Pisit	Burasit
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Prasit	Julsereewong
	Asst.Prof.Dr Amphawan	Chaikla
Year	2006	

ABSTRACT

This project presents a desing of metal detector ,which can simultaneously detect the metal and measure the distances of the found metals. Moreover,it can be applied to any kind and size of at least 1 Sq.cm. of metal. The proposed metal detector is base on the beat frequency oscillator principle.The sound of buzzer can be obtained using P89V51RD2BN Microcontroller and distance of found metals can be seen on the 7-segment screen.Experimental results demonstrating the performances of the proposed metal are also included

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและการวิจัยจาก รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ และ ผศ.ดร. อัมพวัน ใจกล้า ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ และให้กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณห้องสมุดและภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งค้นคว้าข้อมูลและเป็นสถาบันที่ใช้ในการทำงานวิจัย ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือ พร้อมทั้งอนุเคราะห์เป็นสถานที่ใช้ทดสอบงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่สั่งสอนและอบรมให้เป็นคนดี รวมทั้งเป็นผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ในการศึกษาของข้าพเจ้า และให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 หลักการตรวจจับสนิทโลหะ.....	3
2.1 หลักการออสซิลเลเตอร์.....	3
2.2 การเปลี่ยนแปลงภายในขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าไป.....	6
2.2.1 ผลของ eddy current	6
2.2.2 ผลของ Magnetism และ Permeability.....	10
2.3 เส้นแรงแม่เหล็กที่หัวตรวจ.....	12
2.4 ประเภทเครื่องตรวจจับสนิทโลหะ.....	13
2.4.1 VLF Phase Angle.....	13
2.4.2 Pulse Induction (PI).....	14
2.4.3 Off Resonance.....	15
2.4.4 Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR).....	16
2.4.5 Beat Frequency Oscillator (BFO)	17
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องตรวจจับสนิทโลหะ.....	18
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องตรวจจับสนิทโลหะ.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 ส่วนของวงจรตรวจหาโลหะ.....	19
3.1.2 ส่วนของวงจรแปลงสัญญาณ.....	19
3.1.3 ส่วนของวงจรประมวลผลและแสดงผล.....	20
3.1.4 ส่วนของแหล่งจ่ายไฟ.....	20
3.2 การทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์.....	20
3.2.1 การทำงานในส่วนของวงจรตรวจจับโลหะ.....	20
3.2.2 การทำงานในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณ.....	25
3.2.2.1 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า.....	25
3.2.2.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล.....	29
3.2.3 ส่วนของวงจรประมวลผลและแสดงผล.....	32
3.2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	32
3.2.3.2 การต่อ MCS-51 กับ RS-232.....	42
3.2.3.3 การขับ LED ตัวเลข 7 ส่วนแบบมัลติเพล็กซ์.....	44
3.3 การทำงานในส่วนของ Software ของเครื่องตรวจจับโลหะ.....	46
3.3.1 ขั้นตอนการทำงานในรูปแบบของโฟลชาร์ท.....	47
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดลอง.....	49
4.1 เครื่องตรวจจับโลหะ.....	49
4.2 วิธีการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ.....	50
4.3 ผลการทดลอง.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผล.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าต่าง ๆ ภายในรีจิสเตอร์.....	34
3.2 พอร์ต P3 และการทำงานแต่ละบิต.....	36
3.3 แสดง Special Function Register (SFR).....	39
3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของวัตถุกับสัญญาณดิจิทัล 8 บิต.....	46
4.1 แสดงผลการทดลองวงจร F/V CONVERTER	57
4.2 แสดงระยะทางการตรวจจับของเครื่องตรวจจับโลหะ.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ Vpอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมของออสซิลเลเตอร์.....	4
2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจร_VLF Phase Angle	13
2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจร2 Pulse Induction (PI).....	14
2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance.....	15
2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR).....	16
2.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจร_Beat Frequency Oscillator (BFO).....	17
3.1 การทำงานในแบบวงจรแผนผัง.....	18
3.2 วงจรผลิตความถี่ของหัวตรวจ.....	20
3.3 วงจรผลิตความถี่คงที่	23
3.4 วงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่.....	24
3.5 แสดงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า.....	25
กราฟที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสม ความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 9cmx9cmx6mm (กว้าง x ยาว x หนา).....	27
3.6 ลักษณะการต่อวงจร F/V CONVERTOR เข้ากับวงจร A/D CONVERTOR	29
3.7 A/D CONVERTER.....	29
3.8 แสดงวิธีทดสอบ A/D.....	30
3.9 แสดงการเชื่อมโยง ADC 0804 เข้ากับ MCS-51.....	31
3.10 แสดงโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89V51RD2BN.....	32
3.11 แสดงการต่อ MCS-51 กับ MAX-232.....	43
3.12 แสดงการทำงานในส่วนของวงจรประมวลผลและแสดงผล.....	44
3.13 แสดงขั้นตอนการทำงานในรูปแบบของโฟลชาร์ท.....	47
4.1 การวางอุปกรณ์และกล่องควบคุม.....	49
4.2 โครงสร้างของเครื่องตรวจจับโลหะ.....	49
4.3 เครื่องตรวจจับโลหะ.....	50
4.4 ลักษณะการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ.....	50
4.5 แสดงการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ.....	51
4.6 แสดงการตรวจพบโลหะ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจ.....	52
4.8 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ที่.....	52
4.9 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจหลังจากผ่าน ไอซีเนนค์เกต.....	52
4.10 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ที่หลังจากผ่าน ไอซีเนนค์เกต พร้อมทั้งหาร 2 ความถี่.....	53
4.11 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อภาคผลิตความถี่ทั้ง 2 เกิดการอินเฟสกัน.....	53
4.12 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อหัวตรวจเข้าใกล้กับโลหะ.....	53
กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของ เครื่องตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 7cmx7cmx6mm	54
กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของ เครื่องตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 9cmx9cmx6mm	54
กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของ เครื่องตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 20cmx20cmx6mm.....	55
กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและ ผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 7cmx7cmx6mm (กว้าง x ยาว xหนา).....	55
กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและ ผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 9cmx9cmx6mm (กว้าง x ยาว x หนา).....	56
กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและ ผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 20cmx20cmx6m (กว้าง x ยาว x หนา).....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริศยานิพนธ์

ในปัจจุบันได้มีการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะออกมามากมายหลายชนิด โดยใช้หลักการในการสร้างที่แตกต่างกันไป ซึ่งแต่ละชนิดก็มีหลักการทำงานและข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับในโครงการนี้เป็นกรออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ โดยใช้หลักการ Beat Frequency Oscillator (BFO) โดยหลักการมีอยู่ว่าหากเอาความถี่ 2 ความถี่มาผสมกัน จะกำเนิดความถี่ใหม่ขึ้นมาได้ ยกเว้นว่าความถี่ทั้งสองนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผู้จัดทำได้ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะแบบต่าง ๆ ที่ใช้หลักการของ BFO แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานในแต่ละส่วนของวงจร และดูผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้รวมไปถึงพิจารณาถึงข้อดีของเครื่องตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้ศึกษามา จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาทั้งหมดมาทำการออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะ เพื่อให้ได้เครื่องที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถวัดระยะทางของวัตถุโลหะขนาดคงที่ขนาดหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวอย่างวัตถุสำหรับกรณีศึกษา นอกจากนี้ได้มีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมการทำงานของ เครื่องตรวจจับโลหะที่ออกแบบด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของปริศยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาถึงหลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่มีหลักการทำที่แตกต่างกันออกไป
2. เพื่อศึกษาการทำงานในแต่ละส่วนของวงจร และดูผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้รวมไปถึงพิจารณาถึงข้อดีของเครื่องตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ได้ศึกษามา
3. เพื่อทำการออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถวัดระยะทางของวัตถุโลหะขนาดคงที่ขนาดหนึ่งซึ่งเป็นวัตถุกรณีศึกษา พร้อมทั้งบอกระยะทางได้ถูกต้องและแม่นยำ
4. เพื่อเป็นแนวทางในการขยายไปสู่การออกแบบ และสร้างเครื่องตรวจจับโลหะให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของปริศยานิพนธ์

1. สามารถนำไปใช้ในการตรวจจับโลหะได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจจับได้
3. เขียนโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
4. สร้างหัวตรวจซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของวงจรรอสซิลเลเตอร์ ให้สามารถกำเนิดความถี่ออกมาได้

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์
2. ศึกษาการทำงานของวงจรมลิตความถี่คงที่
3. ศึกษาวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่
4. ศึกษาวงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณแรงดัน
5. ศึกษาวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
6. ศึกษาการเขียนโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีกับไมโครคอนโทรลเลอร์
7. ศึกษาการรับส่งข้อมูล MCS-51 กับ RS-232 โดยใช้ไอซี MAX232 มาเชื่อมต่อ
8. ศึกษาการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการตรวจจับสนุติ

เครื่องตรวจจับสนุติแยกการทำงานตามลักษณะและวิธีการทำงานของเครื่อง แต่ส่วนสำคัญที่สุดจะอยู่ที่ขดลวดหัวตรวจ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ (L) ในวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบโลหะ และนำสัญญาณนี้ไปแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในขดลวดเมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้ จะเกิดจากสาเหตุ 2 ข้อ คือการเกิด eddy current ในโลหะ และการเปลี่ยนแปลงความซึมซาบได้ (Permeability) ของตัวกลางจากผล Magnetism ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 หลักการออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์คือ วงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก รูปที่ 1 แสดงให้เห็นบล็อกไดอะแกรม ของวงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันดังนี้

$$v_e = v_s + v_f \quad (2.1)$$

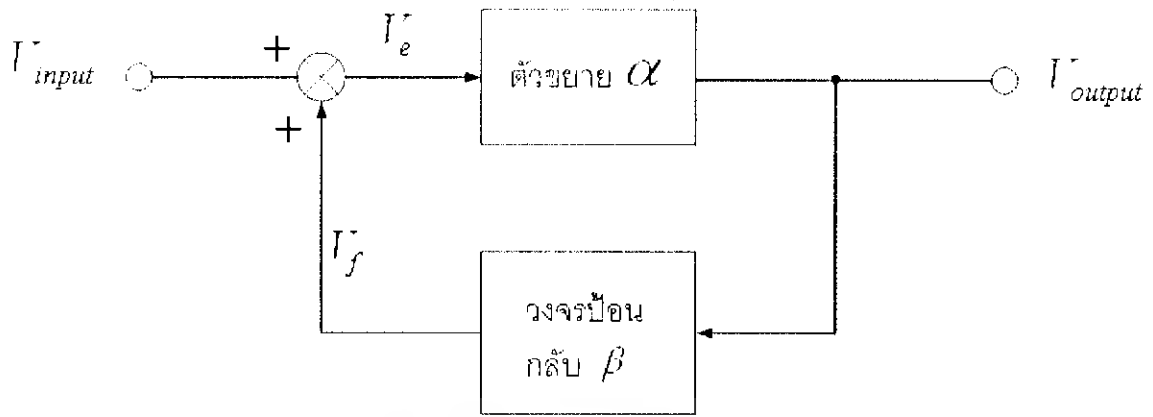
$$v_o = \alpha v_e \quad (2.2)$$

$$v_f = \beta v_o \quad (2.3)$$

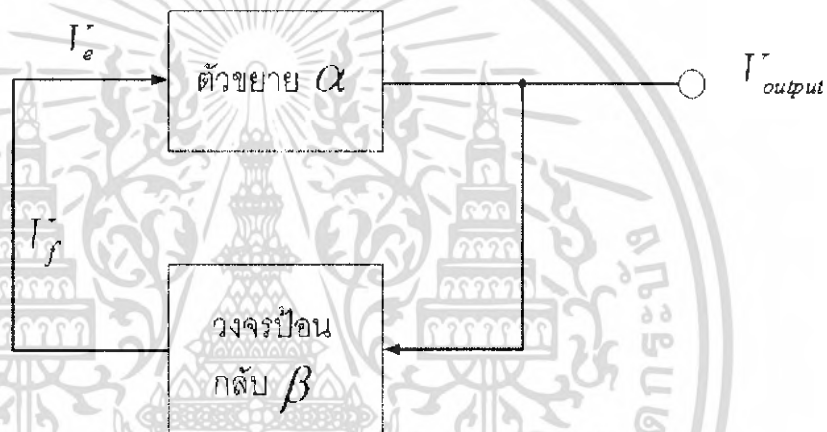
อัตราขยายแรงดันลูฟปิด

$$\begin{aligned} A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{\alpha v_e}{v_e - v_f} \\ &= \frac{\alpha v_e}{v_e - \beta v_o} = \frac{\alpha v_e}{v_e - \beta \alpha v_e} \\ &= \frac{\alpha}{1 - \beta \alpha} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของออสซิลเลเตอร์

จากสมการที่ 2.4 ถ้า $1 - \alpha\beta = 0$ ทำให้ A_f มีค่าสูงมาก ๆ นั่นก็จะมีขนาดสัญญาณเอาต์พุตถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุตมีค่าต่ำมาก ๆ ถ้าสัญญาณอินพุต $V_s = 0$ และวงจรขยายจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อ $1 - \alpha\beta = 0$ จะได้อัตราขยายลูฟคือ

$$\alpha\beta = 1$$

เขียนสมการในรูปแบบเชิงขั้ว

$$\alpha\beta = 1 \angle 0^\circ \text{ หรือ } 1 \angle 360^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของการออสซิลเลต

1. ขนาดของอัตราขยายลูฟ $|\alpha\beta|$ จะต้องเท่ากับหนึ่ง หรือสูงกว่าเล็กน้อยที่ความถี่ออสซิลเลตตามต้องการ

2. ที่ความถี่เดียวกันการเลื่อนเฟสทั้งหมด ϕ ของอัตราขยายลูฟจะต้องเท่ากับ 0 หรือ 360

3. เงื่อนไขทั้งข้อที่ 1 และ 2 จะไม่เกิดขึ้นที่ความถี่อื่น

4. เงื่อนไขทั้งข้อที่ 1 และ 2 จะต้องครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อายุการใช้งานและการเปลี่ยนอุปกรณ์

ถ้าให้เฟสของวงจรถยาย (α) เลื่อนไป 180° ดังนั้นวงจรถย้อนกลับ (β) จะต้องให้เฟสเลื่อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 180° จึงจะได้การเลื่อนเฟสทั้งหมดของลูฟ $(\alpha\beta)$ เท่ากับ 360° การสร้างรูปแบบรูปคลื่นของวงจรออสซิลเลเตอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเช่น รูปคลื่นไซน์ซอซด์สี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยม ส่วนความถี่ของการออสซิลเลตขึ้นกับค่าของอุปกรณ์ป้อนกลับอย่างเช่น (1) อุปกรณ์ RC สามารถสร้างรูปคลื่นไซน์ซอซด์ในช่วงความถี่วิทยุ (2) อุปกรณ์ LC สามารถสร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในช่วงความถี่วิทยุประมาณ 100 kHz ถึง 100 MHz (3) ผลึกสามารถสร้างรูปคลื่นสามเหลี่ยมหรือฟันเลื่อยในช่วง 10 kHz ถึง 10 MHz เป็นต้น

ออสซิลเลเตอร์สามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้อนกลับและรูปแบบของวงจร เช่น ออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (phase-shift oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบควอดเรเจอร์ (quadrature oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบวินบริดจ์ (Wien-bridge oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบโคลพิตต์ส (Colpitts oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบฮาร์ดเลย์ (Hartley oscillator) และ ออสซิลเลเตอร์ผลึก (Crystal oscillator)

- เสถียรภาพของความถี่

ความสามารถของออสซิลเลเตอร์ที่จะออสซิลเลตได้ความถี่ถูกต้องเรียกว่า เสถียรภาพของความถี่ (frequency stability) ความถี่ออสซิลเลตขึ้นอยู่กัส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจร (เช่น LC) และสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อุปกรณ์ เสถียรภาพของความถี่ที่ดีได้โดยการทำให้การเลื่อนเฟสขึ้นอยู่กัความถี่เรโซแนนซ์อย่างแน่นอน นั่นคืออัตราการเลื่อนเฟสต่อความถี่ $|d\phi/d\omega|$ ที่ $\omega = \omega_0$ มีค่าสูง ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนแปลง ω เพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เฟสเลื่อนได้รับการแก้ไขและปรับเปลี่ยนอัตราขยายลูฟเพื่อให้การเลื่อนเฟสเท่ากับศูนย์

ตัวประกอบคุณภาพ Q (quality factor หรืออาจใช้คำว่า figure of merit) ของวงจรยังสามารถใช้คำนวณหาเสถียรภาพของความถี่ นั่นคือ Q มีค่าสูง ๆ ทำให้เสถียรภาพของความถี่ดีขึ้นด้วย เนื่องจากการแปรเปลี่ยนเฟสที่ความถี่เข้าใกล้เรโซแนนซ์มีค่าสูงขึ้น ปกติออสซิลเลเตอร์ผลึกมีเสถียรภาพของความถี่ดีกว่าออสซิลเลเตอร์แบบ RC หรือ LC โดยเฉพาะที่ความถี่สูง ๆ เพราะว่าวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของผลึกมีค่า Q สูงมาก ซึ่งทำให้ $d\phi/d\omega$ มีค่าสูงด้วย ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสซิลเลเตอร์ผลึกและ LC ใช้สำหรับสร้างสัญญาณที่มีความถี่สูง ส่วนออสซิลเลเตอร์แบบ RC ใช้สำหรับสร้างสัญญาณที่มีความถี่ในย่านวิทยุ

- เสถียรภาพของแอมพลิจูด

เช่นเดียวกับเสถียรภาพของความถี่ อัตราของวงจรถายจริง ๆ สามารถแปรเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ อายุการใช้งานและจุดทำงาน ดังนั้น $|\alpha\beta|$ อาจลดลงต่ำกว่าหนึ่งหน่วย ถ้าขนาดของ $(\alpha\beta)$ ลดลงต่ำกว่าหนึ่งหน่วย ทำให้วงจรออสซิลเลเตอร์หยุดออสซิลเลต ในทางปฏิบัติจะออกแบบออสซิลเลเตอร์ให้มีค่า $|\alpha\beta|$ สูงกว่าหนึ่งหน่วยเล็กน้อยที่มีความถี่ ออสซิลเลต (ประมาณ 5 %) แต่ถ้าค่า $|\alpha\beta|$ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้แอมพลิจูดที่เอาต์พุตเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก่อให้เกิดความบิดเบือนของสัญญาณ

สำหรับเสถียรภาพของแอมพลิจูดที่ดี การเปลี่ยนแปลงของอัตราขยาย (a) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดแรงดันเอาต์พุต V_o ควรจะมีค่าสูง นั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลง (a) ต่อ $V_o [da/dV_o]$ จะต้องเป็นจำนวนลบสูง ๆ ปกติเพิ่มอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับจำกัดแรงดันเพื่อให้ออสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพของแอมพลิจูดเช่น ไดโอด

2.2 การเปลี่ยนแปลงภายในขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้

2.2.1 ผลของ eddy current

Eddy current คือกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า อันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า จะเกิด eddy current ในแกนเหล็ก จากเส้นแรงของขดลวดที่พันในหม้อแปลงนั้น ถ้าแกนเหล็กบาง eddy current ก็เกิดขึ้นน้อยตามขนาดของแกน แต่ถ้าแกนเหล็กของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่จะเกิด eddy current สูง จะมีผลโดยตรงกับขนาดของขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง ดังนั้นจะใช้หลักการเหล่านี้เพื่อทำเป็นหลักการของเครื่องตรวจจับโลหะ โดยให้ขดลวดเป็นเสมือนลวดที่ใช้พันในหม้อแปลง แต่พันด้วยแกนอากาศแทนและให้โลหะที่จะตรวจจับเสมือนเป็นแกนเหล็กในหม้อแปลง ซึ่งสามารถพิจารณาผลที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีดังต่อไปนี้

ใช้ขดลวดพันเพียงรอบเดียวในการคำนวณ ใช้ขนาดรัศมี b และจ่ายกระแสให้ขดลวดด้วยค่า $I_o e^{j\omega t}$ และให้มีทรงกลมเล็กรัศมี a ลอยอยู่เหนือจุดกึ่งกลางของขดลวด

ในการคำนวณ จะคำนวณเกี่ยวกับแรงในทรงกลมพลังงานที่เข้าทรงกลม (ที่เกิด eddy-current) และการเปลี่ยนแปลงค่า inductance ของขดลวด เนื่องจากโลหะทรงกลม

สิ่งสำคัญที่สุด คือ อัตราส่วน skin depth, ρ คอรัสมิ

skin depth เป็นค่าของระยะทางของคลื่นที่เข้าไปในตัวนำหนึ่ง แล้วคลื่นถูกลดทอน

(attenuated) เหลือ $\frac{1}{2}$ หรือ 37%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{skin depth, } \rho = \frac{\sqrt{2}}{\omega\mu_0\sigma} \text{ เมตร} \quad (2.5)$$

โดย ω เป็น circular frequency (ความถี่ของสนามแม่เหล็กที่เข้าทรงกลม)

σ เป็น ค่า conductivity ของโลหะทรงกลมนี่

μ_0 เป็น ค่า permeability ของโลหะทรงกลมนี้ในสุญญากาศ

ถ้าใช้ความถี่ 400 KHz มี $\sigma = 10^7 \text{ ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ จะได้ค่า $\rho = 4 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.4 \text{ m.m}$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า โลหะทรงกลมที่ใช้ทดลองต้องมีขนาดเล็กที่สุด 1 cm. จึงจะได้

$$\rho/a \ll 1$$

ค่า $\rho/a \ll 1$ นี้เป็นตัวกำหนดความถี่ที่สัมพันธ์กับขนาดที่ใช้กับเครื่องตรวจจับโลหะ เพราะถ้าความถี่ต่ำลง ค่า skin depth จะสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงว่าโลหะที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขดลวดต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อใช้ค่า $\rho/a \ll 1$ นี้ผลของ eddy current ทั้งหมดก็เปรียบเสมือนกระแสไหลวน อยู่เฉพาะผิวของโลหะเท่านั้น ซึ่งเสมือนตัวป้องกัน magnetic flux ไม่ให้ไหลผ่านเข้าไปภายใน โลหะ ทำให้สามารถสมมติได้ว่า ภายในโลหะมี $B=0$ ได้

เมื่อมีโลหะเข้ามาอยู่ในสนามแม่เหล็กจะได้ว่า

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.6)$$

H = magnetic field

M = magnetization ของโลหะ

โดยที่

$$H = (H_{oe}^{j\omega t} - H_{demag})k \quad (2.7)$$

K = unit vector

เทอม $H_{oe}^{j\omega t}$ เป็น magnetic field เมื่อไม่มีโลหะที่มี $e^{j\omega t}$ อยู่ด้วย เนื่องจากเราจ่ายกระแส $I_{oe}^{j\omega t}$ ให้แก่ขดลวด จึงสร้างสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกระแสด้วย

H_{demag} = Demagnetizing field ซึ่งเกิดจากโลหะสร้างสนามที่ได้จากการเหนี่ยวนำของสนามเดิม ซึ่งจะมีทิศตรงข้ามสนามเดิมจึงลบกัณฑ์สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็น โลหะทรงกลม

$$H_{demag} = 1/3 M \quad (2.8)$$

$$B = \mu_o (H_{oe}^{j\omega t} - 1/3 M + M) \quad (2.9)$$

เนื่องจากใช้โลหะที่ $\rho/a \ll 1$ ดังนั้นภายในโลหะเสมือน $B = 0$
จะได้

$$0 = \mu_o (H_{oe}^{j\omega t} + 2/3 M)$$

ดังนั้น

$$M = -3/2 H_{oe}^{j\omega t} k \quad (2.10)$$

จะหาค่า magnetic moment ของโลหะทรงกลมนั้น
โดยที่ magnetic moment , $m = vM$

เมื่อ $V =$ ปริมาตรของโลหะทรงกลม $= 4/3 \pi r^3$

$M =$ Magnetization ของโลหะ

จากสมการ (6) จะได้

$$\begin{aligned} m &= [4/3 \pi a^3] [-3/2 H_{oe}^{j\omega t} k] \\ m &= -2 \pi a^3 H_{oe}^{j\omega t} k \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ $a =$ รัศมีวงกลม

Magnetic moment , m เกิดขึ้นจากผลของ eddy current ที่ไหลวนที่ผิวโลหะทรงกลม
ดังนั้นเราสามารถแสดงค่านี้ได้ให้อยู่ในรูปที่เป็นกระแสไหลวนใน loop coil ซึ่งเป็นขดลวด (coil)
รัศมี a มีจำนวนหนึ่งรอบ

ได้ magnitude ของกระแสเป็น $I \pi a^2$ ซึ่งเท่ากับ magnetic moment เพราะเป็นการ
เปรียบเทียบมาจากโลหะทรงกลมเดียวกัน

ดังนั้น

$$\begin{aligned} I \pi a^2 &= -2 a^3 \pi H_{oe}^{j\omega t} \\ I &= -2 a H_{oe}^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในสมการ (B) นี้จะเป็นตัวสร้าง axial field เนื่องจาก axial magnetic field เป็น

$$B = (I_0/2) \frac{ub^2 e^{j\omega t} k}{(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.13)$$

จากสมการ axial magnetic field ที่เกิดจาก Single loop รัศมี b ณ.จุดบนแกน ห่างออกไป Z ด้วยกระแส I_0

ดังนั้นตามสมการนี้ เมื่อทรงกลมมีกระแสดังสมการจะได้ axial magnetic field ของทรงกลมเป็น B_m ดังนี้

$$B_m = -(2ahoe^{j\omega t} \mu_0/2) \left[a^2/2(a^2 + z^2)^{3/2} \right] k \quad (2.14)$$

ถ้าสมมติว่า สนามนี้คงที่อยู่เหนือพื้นที่ของ loop ดังนั้น flux ที่ไหลผ่าน loop เป็น

$$\phi_{loop} = \frac{-\mu_0 a^3 \pi b^2 \cdot b^2 \cdot I_0 e^{2j\omega t}}{2(a^2 + z^2)^{3/2} \cdot 2(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.15)$$

ทำการเฉลี่ยตลอดช่วง

$$\phi_{loop} = \left[\mu_0 \pi a^3 b^4 / B(a^2 + z^2)^{3/2} (b^2 + z^2)^{3/2} \right] I_0 \quad (2.16)$$

ค่า inductance จะเปลี่ยนได้เนื่องจากถูก induce ด้วย eddy current
ดังนั้น

$$\Delta L = \frac{d\phi_{loop}}{dI_0} = \frac{\mu_0 \pi a^3 b^4}{B(a^2 + z^2)^{3/2} (b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.17)$$

Self inductance ของ loop เป็น

$$L = b \{ \mu_0 [\ln(Bb/d) - 2] + 1/4 \mu_0 \} \quad (2.18)$$

โดยที่ d = รัศมีของขดลวด

ถ้า $a = 0.5$ cm, $b = 2.5$ cm, $z = 0.5$ cm, $d = 1/8$ inch.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า inductance เปลี่ยนแปลงไปเป็น

$$\Delta L = 4.12 \times 10^{-7} H$$

และค่า Self inductance

$$L = 1.44 \times 10^{-6} H$$

เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่า loop เกิดการเปลี่ยนแปลงถึง 30% ซึ่งผลนี้เองที่นำมาใช้กับ Metal detector โดยโลหะเข้าใกล้ขดลวด แล้วจะทำให้ค่า L ของขดลวดเปลี่ยนไป สามารถนำการเปลี่ยนแปลงของขดลวดนี้ไปเข้าวงจรตรวจจับ เพื่อใช้แสดงผล

จากการแสดงวิธีการทั้งหมดนี้ เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า inductance ของขดลวด

การเปลี่ยนแปลงของค่า L เมื่อมีโลหะมาในระยะใกล้ขดลวดระยะหนึ่ง โดยคิดจากผลของ eddy current ซึ่งเกิดขึ้นในโลหะ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ flux เทียบกับกระแส eddy current

ผลของ eddy current ซึ่งเป็นกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น โดยการใช้หลักการนี้มาใช้ในเครื่องตรวจจับโลหะเมื่อโลหะเข้าใกล้ขดลวด ผลของ eddy current จะทำให้ค่า inductance ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อจ่ายกระแสสลับให้แก่ขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดทำให้เกิด eddy current ในโลหะ โดยเขียนแทนขดลวดและโลหะในลักษณะของ Transformer coupling

2.1.2 ผลของ Magnetism และ Permeability

เนื่องจากโลหะชนิด Ferrous มีค่า permeability (μ) สูงมาก เมื่อโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็กของขดลวด ก็จะได้รับอำนาจแรงดึงดูดจากขดลวด แต่โลหะนี้จะทำให้ค่า inductance ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากค่า μ ของโลหะมีค่าสูงมาก เราจะแสดงความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงของค่า L ของขดลวดกับค่า μ ของโลหะดังนี้

ถ้า L_0 เป็น inductance ของขดลวด เมื่อไม่มีโลหะเข้าใกล้

L เป็น inductance ของขดลวดที่เพิ่มขึ้นไปหลังจากมีโลหะมาใกล้ขดลวด

ค่า L ที่เปลี่ยนไป $dL = L - L_0$

เราจะหาค่า L ที่เปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยการให้

Inductive energy, $E =$ magnetic energy stored in the field

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Inductive energy, } E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.19)$$

i = กระแสภายในขดลวด และ Magnetic energy stored ในขดลวดหาได้ดังนี้
 เนื่องจาก Energy density , $\rho_m = 1/2 \mu H^2$ ซึ่งเป็น energy density จุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก
 จะเป็น energy ต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

Total magnetic energy density = $1/2 \int \mu H^2 dv$ = magnetic energy stored
 เนื่องจากให้ inductive energy = magnetic energy stored in the field
 ฉะนั้นได้

$$\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \int \mu H^2 dV \quad (2.20)$$

ถ้าไม่มีโลหะอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะได้

$$\frac{1}{2} L_0 i^2 = \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV \quad (2.21)$$

แต่ถ้ามีโลหะอยู่ในสนามแม่เหล็กโดยโลหะมีค่า permeability = μ

จะได้

$$\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV - \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV + \frac{1}{2} \int \mu H^2 dV \quad (2.22)$$

สมการ(18)-(17)จะได้

$$\frac{1}{2} dLi^2 = \frac{1}{2} \int_{V_{sample}} (\mu - \mu_0) H^2 dV \quad (2.23)$$

เนื่องจาก $\mu = \mu_0 \mu_r$

μ = permeability ของโลหะที่เป็น Sample เข้ามาในสนามแม่เหล็กของขดลวด

μ_r = relative permeability

ดังนั้น

$$dL = 1/i^2 \int_{V_{sample}} (\mu_r - 1) \mu_0 H^2 dV \quad (2.30)$$

จากสมการนี้พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า inductance ของขดลวด เมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้
 ถ้าใช้ coil เป็นวงจร resonant กับ Capacitor จะมีผลทางความถี่ดังนี้คือ

$$dW = (-W^3 C dL) / 2 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อเกิดค่า dL คือมีโลหะมาใกล้ขดลวดนั้นจะทำให้ความถี่ของ LC resonant ลดลงไป

2.3 เส้นแรงแม่เหล็กที่หัวตรวจ

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic force) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสกับจำนวนรอบของขดลวดหรือเท่ากับผลคูณระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับค่าการเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$mmf = NI = HL$$

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด แล้วจะทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ได้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาจากผลของสนามแม่เหล็กนั่นเอง เส้นแรงแม่เหล็กนี้เองที่ทำให้เกิด linkage flux ซึ่ง flux นี้เองที่เรานำไปใช้งาน

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อแรงเคลื่อนผ่านลูปปิดหนึ่งๆจะมีกระแสไหลผ่านเกิดขึ้น โดยมีทิศทางการไหลของกระแสสวนทางกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นเอง

ดังนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสขึ้น ถ้ามีขดลวดพันด้วยจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ก็คือ $mmf = NI$ นั่นเอง

จากความสัมพันธ์ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) จะทำให้เกิด

$$B = \mu H$$

ซึ่งก็คือจะเกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นนั่นเองและผลอันนี้เราก็จะได้ฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) หาได้จากผลคูณระหว่าง พื้นที่หน้าตัดของขดลวดกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\phi = B A$$

จากกฎของเลนซ์ (Lenze's law) ถ้ามีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านลูปปิดอันหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดนั้นๆ จะมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น ฟลักซ์แม่เหล็กตัวนี้จะทำให้เกิด linkage flux จากสมการ

$$X = N \phi$$

จากคุณสมบัติของ linkage flux ซึ่งเราต้องนำไปใช้งาน สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$mmf = NI = HL$$

$$I = HL / N = BL / \mu N$$

2.4 ประเภทเครื่องตรวจจับโลหะ

ในปัจจุบันได้มีการทำเครื่องตรวจจับโลหะ (METAL DETECTOR) ออกมามากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่ที่ได้รับความนิยมและรู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่

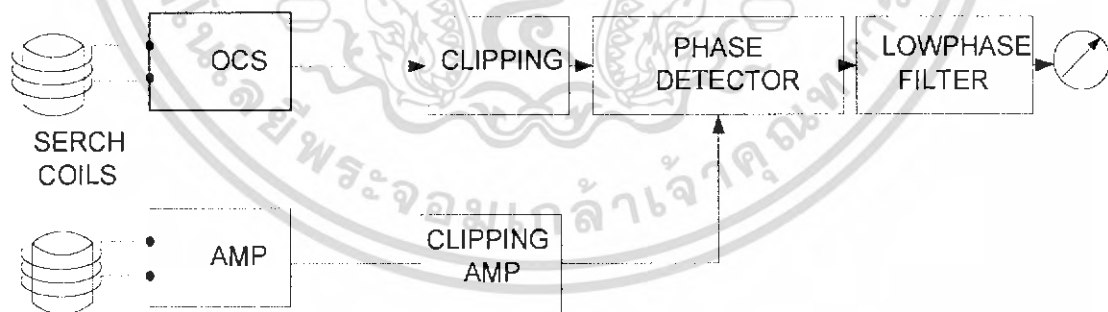
1. VLF Phase Angle
2. Pulse Induction (PI)
3. Off Resonance
4. Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)
5. Beat Frequency Oscillator (BFO)

ซึ่งจะได้อธิบายลักษณะการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะแต่ละชนิด ดังต่อไปนี้

2.4.1 VLF Phase Angle

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้จะใช้ค่าความต่างเฟสมาเป็นตัวตรวจจับ ซึ่งมีการทำงานดังใน

Block diagram ต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจร VLF Phase Angle

สำหรับวงจรนี้จะใช้ขดลวด 2 ขด ซึ่งทำหน้าที่เป็น Search coil โดยขดลวดหนึ่งจะต่ออยู่กับวงจร Oscillator ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่เป็น Square wave ออกมาที่ความถี่ค่าหนึ่ง ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่ง จะเป็นตัวรับสัญญาณที่ความถี่เดียวกันแล้วนำไปเข้าวงจร Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

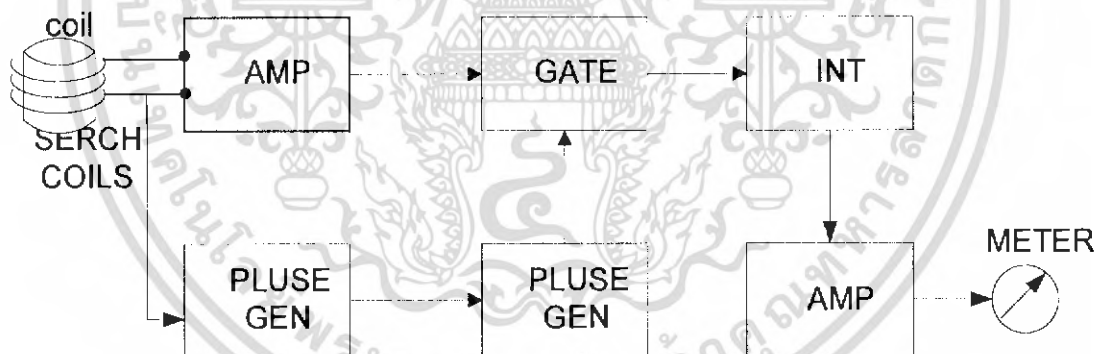
เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณ Square wave ทั้งสอง ไปเข้าวงจร Phase detector เพื่อสร้างสัญญาณที่เกิดจากความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสอง และเมื่อมีโลหะเข้าใกล้ Search coil จะทำให้ค่าความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีความต่างเฟสมากขึ้นเมื่อโลหะนั้นเป็น ferrous และความต่างเฟสจะลดลงถ้าเป็นโลหะชนิด non-ferrous หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จากความต่างเฟสนี้จะผ่านเข้าวงจรกรองความถี่ชนิด Low pass filter เพื่อกรองคอมโปเน้นท์ความถี่สูง และนำไปเร็คติไฟร์เป็นสัญญาณแรงดันดี.ซี. ซึ่งสามารถวัดได้จาก meter หรืออาจนำไปเข้าวงจร chopper เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ Low audio ที่เราสามารถรับฟังได้

วิธีนี้จะใช้ที่ความถี่ต่ำ ๆ ประมาณ 3-6 KHz ซึ่งมีความสามารถทะลุทะลวงผ่านพื้นผิวบริเวณที่ตรวจจับได้ดี และป้องกันผลจาก ground capacitance ด้วย อย่างไรก็ตาม วงจรนี้จะกินกระแสมาก เพื่อให้ได้ sensitivity สูง ๆ กับโลหะที่มีขนาดเล็กดังนั้นจึงต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ความสามารถในการหาตำแหน่งที่แน่นอน (pinpoint) ก็ไม่ค่อยดี

สำหรับความสามารถในการตรวจจับ สำหรับเหรียญ 1 บาท ได้ในระยะ 60-80 mm. และสำหรับเหรียญ 5 บาท ได้ในระยะ 100-150 mm.

2.4.2 Pulse Induction (PI)

ลักษณะ โครงสร้างและการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะชนิด PI เป็นดังรูป



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจร 2 Pulse Induction (PI)

เนื่องจากเราทราบว่า Coil จะสร้างสนามแม่เหล็กออกไป เป็นสัดส่วนกับจำนวนของกระแสที่ผ่านเข้าไปใน Coil และจำนวนรอบของ Coil

จากวงจร Pulse Generator จะส่งสัญญาณที่เป็น Pulse ช่วงสั้น ๆ ไปยัง Search Coil ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ Coil ที่ขอบขาลงของสัญญาณแต่ละ Pulse สนามแม่เหล็กบริเวณ Coil จะลดลง จนกระทั่ง Voltage ตกลงเป็น 0 ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน Coil แต่เนื่องจาก Coil สะสมพลังงานไว้ภายใน จึงเกิดเป็น back e.m.f. เนื่องจากสนามแม่เหล็กไหลกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำให้ Voltage คร่อม Coil มีทิศตรงข้าม (Reverse Voltage) แต่เนื่องจากเป็นพลังงานสะสม จึงสลายตัวลงจน back e.m.f. ตกลงเป็น 0 และเราใช้การสลายตัวนี้เป็นจุดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ในการตรวจจับโลหะ

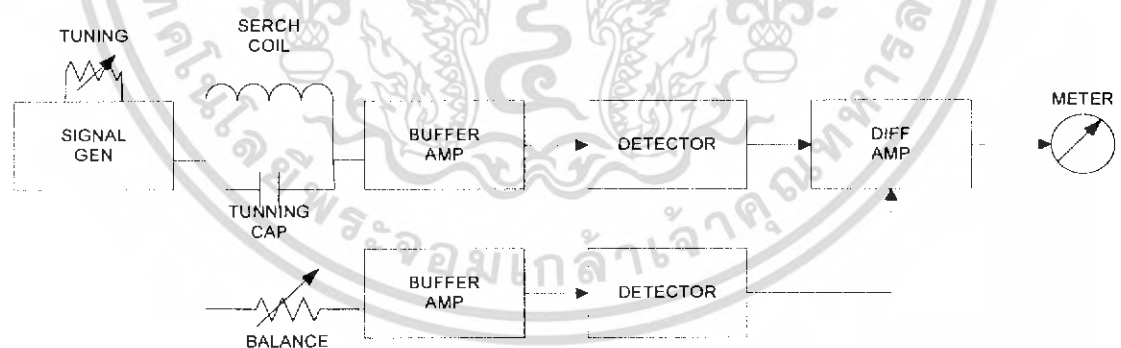
เมื่อมีโลหะไม่ว่าจะเป็น Ferrous หรือ Non-ferrous เข้าใกล้ Coil มันจะได้รับผลจาก สนามแม่เหล็ก เกิดเป็น eddy current หรือ magnetized ที่โลหะนั้นตามแต่ชนิดของโลหะ และ ผลนี้จะเป็นชนิดใดก็ตาม จะทำให้ back e.m.f. ที่ตกไปเป็น 0 มีระยะเวลายาวกว่าเดิม

วงจร detector จะเป็นวงจรที่ตรวจจับจากพื้นที่ภายใต้สัญญาณของการ decay ของ back e.m.f. ซึ่งจะทำให้ได้โดย นำสัญญาณจาก Coil มาขยาย และทำเป็น Sample Voltage ซึ่งไป เข้า integrator ซึ่งจะทำให้ integrator สร้าง output เป็นที่เป็นสัดส่วนกับเวลาในการ decay ของ back e.m.f. แล้วนำ voltage จาก output ของ integrator นี้ไปควบคุม voltage control oscillator (VCO) ซึ่งไปจับลำโพงอีกทีหนึ่ง

สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้จะมี Sensitivity มาก โดยส่วนประกอบของเครื่องนี้ จะไม่เป็นโลหะไม่ได้ เพราะจะไปรบกวนและมีผลต่อเครื่องตรวจจับ แต่ไม่ปัญหาเกี่ยวกับ Ground Effect สำหรับข้อเสียคือไม่สามารถแยกได้ว่าโลหะชนิดนั้นเป็น Ferrous หรือ Non Ferrous และยังต้องใช้ Power มากด้วย

2.4.3 Off Resonance

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้ จะมีหลักการทำงานคล้ายกับวิธี Beat Frequency Oscillator แต่อาศัยหลักการ balance ของสนามแม่เหล็กด้วยดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance

Signal Generator จะส่งสัญญาณไปยัง Buffer Amplifier และวงจร Detector โดยผ่าน วงจร LC Tuning ซึ่งทำหน้าที่เป็น Serch coil และสัญญาณโดยตรงจาก Serch coil จะนำไปเข้าสู่ Control Balance ต่อไปยัง Buffer Amplifier และวงจร Detector อีกชุดหนึ่ง ดังรูป สัญญาณ output

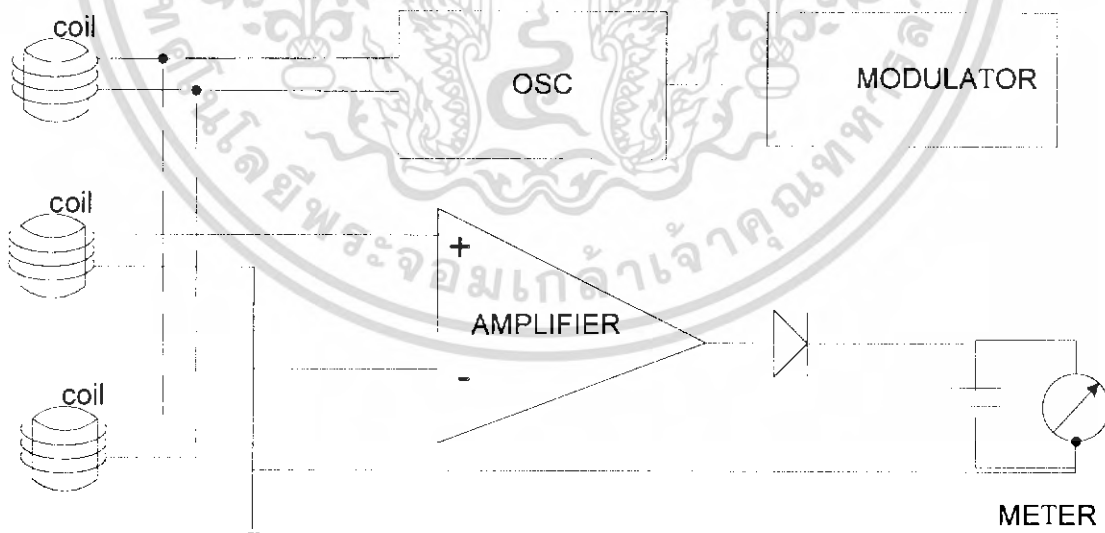
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจร Detector ทั้งสองจะนำไปเข้าวงจร Differential Amplifier ซึ่งจะเป็นตัวจับความแตกต่างของสัญญาณจาก Detector ทั้งสอง ในขณะที่ปกติ เราจะปรับ balance ให้ output เป็น Zero จากส่วน Control Balance และเมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้ Search coil จะทำให้เกิดการ Shift Resonance Frequency ที่วงจร Tuning เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า Inductance ทำให้เกิด Imbalance ขึ้นที่ Diff Amp ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยใช้ Meter หรืออาจอ่านสัญญาณจาก Diff Amp มาสร้างเป็นสัญญาณที่เรา รับฟังได้

สำหรับเครื่องตรวจจับ โลหะชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าไร เนื่องจากมี Sensitivity ที่ต่ำ และวงจรมีความยุ่งยาก

2.4.4 Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)

เครื่องตรวจจับ โลหะชนิดนี้จะใช้หลักการ Inductance Balance ซึ่งได้ใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ ในการส่งสัญญาณไปยังขดลวดส่ง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวด ขดลวดรับซึ่งวาง เหลื่อมกันกับขดลวดส่งจะรับสนามแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะสมดุล ทำให้เกิดสัญญาณที่เอาท์พุท เพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย เมื่อโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการไม่สมดุล ของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ขดรับเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการเปลี่ยนแปลงนี้ สามารถนำไปผ่านวงจรขยาย วงจรเรียงกระแส และวงจรกรอง จะได้สัญญาณเอาท์พุทจากระบบ เป็นสัญญาณแรงเคลื่อน ดี.ซี. นำสัญญาณนี้ไปใช้แสดงผล โดยต่อเข้ากับมิเตอร์, วงจรกำเนิดเสียง, หรืออุปกรณ์ที่สามารถแสดงผลอื่นได้

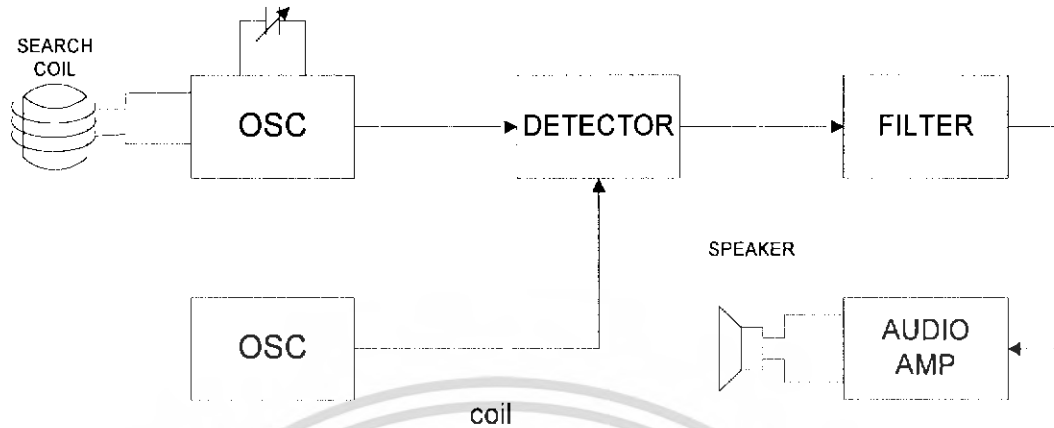


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 Beat Frequency Oscillator (BFO)

โดยหลักการทำงานดัง Block diagram



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Beat Frequency Oscillator (BFO)

ในวงจรนี้จะมี วงจร Oscillator 2 วงจร ซึ่งจะสร้างความถี่ออกมาที่ใกล้เคียงกันมาก โดยวงจรหนึ่งจะใช้สร้างความถี่เป็น Reference Frequency ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะเปลี่ยนค่าความถี่ได้ โดยค่า inductance ที่ Serch coil ขณะที่โลหะเข้าใกล้ เมื่อวงจร Oscillator ทั้งสอง มีความถี่ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แล้วนำมาผ่านวงจร Detector สัญญาณ output ที่ได้จะเกิดเป็นสัญญาณ beat ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าความถี่ทั้งสอง ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นสัญญาณที่เราฟังได้ โดยผ่านวงจร Filter แล้วส่งออกทาง Headphone

สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะที่เราได้สร้างขึ้นนี้จะอาศัยหลักการ BFO ซึ่งได้อธิบายวิธีการสร้างการทดลอง และ การใช้งานในบทต่อจากนี้ไป

71962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการตรวจจับโลหะ

เครื่องตรวจจับโลหะแยกการทำงานตามลักษณะและวิธีการทำงานของเครื่อง แต่ส่วนสำคัญที่สุดจะอยู่ที่ขดลวดหัวตรวจ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ (L) ในวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบโลหะ และนำสัญญาณนี้ไปแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในขดลวดเมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้ จะเกิดจากสาเหตุ 2 ข้อ คือการเกิด eddy current ในโลหะ และการเปลี่ยนแปลงความซึมซาบได้ (Permeability) ของตัวกลางจากผล Magnetism ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 หลักการออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์คือ วงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก รูปที่ 1 แสดงให้เห็นบล็อกไดอะแกรม ของวงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันดังนี้

$$v_e = v_s + v_f \quad (2.1)$$

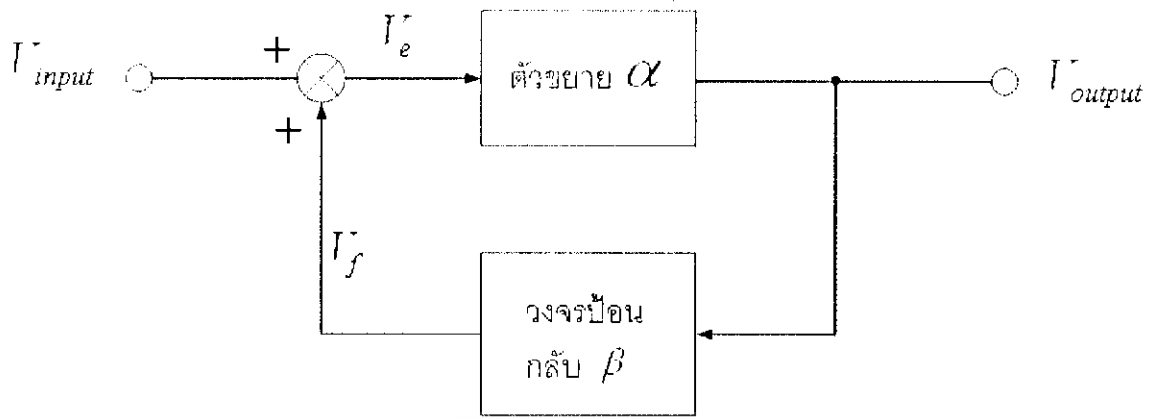
$$v_o = \alpha v_e \quad (2.2)$$

$$v_f = \beta v_o \quad (2.3)$$

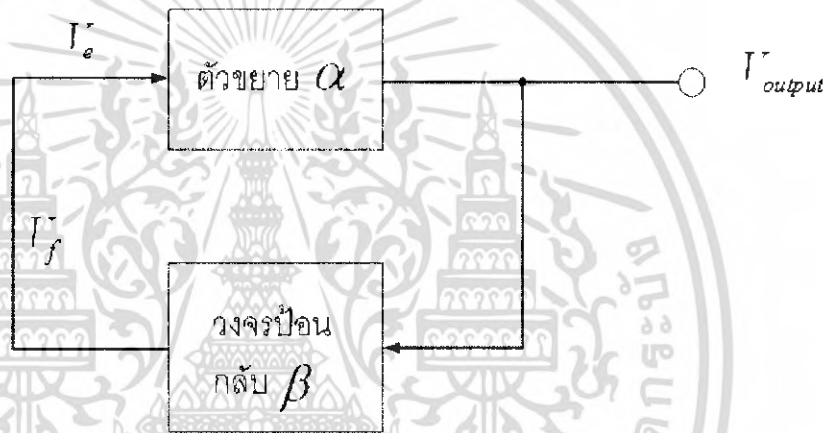
อัตราขยายแรงดันลูฟปีด

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{\alpha v_e}{v_e - v_f} \\ &= \frac{\alpha v_e}{v_e - \beta v_o} = \frac{\alpha v_e}{v_e - \beta \alpha v_e} \\ &= \frac{\alpha}{1 - \beta \alpha} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของออสซิลเลเตอร์

จากสมการที่ 2.4 ถ้า $1 - \alpha\beta = 0$ ทำให้ A_f มีค่าสูงมาก ๆ นั่นคือจะมีขนาดสัญญาณเอาต์พุตถึงแม้ว่าสัญญาณอินพุตมีค่าต่ำมาก ๆ ถ้าสัญญาณอินพุต $V_s = 0$ และวงจรขยายจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อ $1 - \alpha\beta = 0$ จะได้อัตราขยายลูปคือ

$$\alpha\beta = 1$$

เขียนสมการในรูปแบบเชิงขั้ว

$$\alpha\beta = 1 \angle 0^\circ \text{ หรือ } 1 \angle 360^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของการออสซิลเลต

1. ขนาดของอัตราขยายลูฟ $|\alpha\beta|$ จะต้องเท่ากับหนึ่ง หรือสูงกว่าเล็กน้อยที่ความถี่ออสซิลเลตตามต้องการ

2. ที่ความถี่เดียวกันการเลื่อนเฟสทั้งหมด ϕ ของอัตราขยายลูฟจะต้องเท่ากับ 0 หรือ 360

3. เงื่อนไขทั้งข้อที่ 1 และ 2 จะไม่เกิดขึ้นที่ความถี่อื่น

4. เงื่อนไขทั้งข้อที่ 1 และ 2 จะต้องครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อายุการใช้งานและการเปลี่ยนอุปกรณ์

ถ้าให้เฟสของวงจรถยาย (α) เลื่อนไป 180° ดังนั้นวงจรถยายกลับ (β) จะต้องให้เฟสเลื่อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 180° จึงจะได้การเลื่อนเฟสทั้งหมดของลูฟ $(\alpha\beta)$ เท่ากับ 360° การสร้างรูปแบบรูปคลื่นของวงจรรออสซิลเลเตอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเช่น รูปคลื่นไซน์ซอซอด์ สี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยม ส่วนความถี่ของการออสซิลเลตขึ้นกับค่าของอุปกรณ์ป้อนกลับอย่างเช่น (1) อุปกรณ์ RC สามารถสร้างรูปคลื่นไซน์ซอซอด์ในช่วงความถี่วิทยุ (2) อุปกรณ์ LC สามารถสร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในช่วงความถี่วิทยุประมาณ 100 kHz ถึง 100 MHz (3) ผลึกสามารถสร้างรูปคลื่นสามเหลี่ยมหรือฟันเลื่อยในช่วง 10 kHz ถึง 10 MHz เป็นต้น

ออสซิลเลเตอร์สามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้อนกลับและรูปแบบของวงจร เช่น ออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (phase-shift oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบควอดเรเจอร์ (quadrature oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบวินบริดจ์ (Wien-bridge oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบโคลพิตต์ส (Colpitts oscillator) ออสซิลเลเตอร์แบบฮาร์ตเลย์ (Hartley oscillator) และออสซิลเลเตอร์ผลึก (Crystal oscillator)

- เสถียรภาพของความถี่

ความสามารถของออสซิลเลเตอร์ที่จะออสซิลเลตได้ความถี่ถูกต้องเรียกว่า เสถียรภาพของความถี่ (frequency stability) ความถี่ออสซิลเลตขึ้นอยู่กับการประกอบต่าง ๆ ของวงจร (เช่น LC) และสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อุปกรณ์ เสถียรภาพของความถี่ที่ดีได้โดยการทำให้การเลื่อนเฟสขึ้นอยู่กับความถี่เรโซแนนซ์อย่างแน่นอน นั่นคืออัตราการเลื่อนเฟสต่อความถี่ $|d\phi/d\omega|$ ที่ $\omega = \omega_0$ มีค่าสูง ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนแปลง ω เพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เฟสเลื่อนได้รับการแก้ไขและปรับเปลี่ยนอัตราขยายลูฟเพื่อให้การเลื่อนเฟสเท่ากับศูนย์

ตัวประกอบคุณภาพ Q (quality factor หรืออาจใช้คำว่า figure of merit) ของวงจรยังสามารถใช้คำนวณหาเสถียรภาพของความถี่ นั่นคือ Q มีค่าสูง ๆ ทำให้เสถียรภาพของความถี่ดีขึ้นด้วย เนื่องจากการแปรเปลี่ยนเฟสที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าสูงขึ้น ปกติออสซิลเลเตอร์ผลึกมีเสถียรภาพของความถี่ดีกว่าออสซิลเลเตอร์แบบ RC หรือ LC โดยเฉพาะที่ความถี่สูง ๆ เพราะว่วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของผลึกมีค่า Q สูงมาก ซึ่งทำให้ $d\phi/d\omega$ มีค่าสูงด้วย ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสซิลเลเตอร์ผลึกและ LC ใช้สำหรับสร้างสัญญาณที่มีความถี่สูง ส่วนออสซิลเลเตอร์แบบ RC ใช้สำหรับสร้างสัญญาณที่มีความถี่ในย่านวิทยุ

- เสถียรภาพของแอมพลิจูด

เช่นเดียวกับเสถียรภาพของความถี่ อัตราของวงจรถยายจริง ๆ สามารถแปรเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ อายุการใช้งานและจุดทำงาน ดังนั้น $|\alpha\beta|$ อาจลดลงต่ำกว่าหนึ่งหน่วย ถ้าขนาดของ $(\alpha\beta)$ ลดลงต่ำกว่าหนึ่งหน่วย ทำให้วงจรออสซิลเลเตอร์หยุดออสซิลเลต ในทางปฏิบัติจะออกแบบออสซิลเลเตอร์ให้มีค่า $|\alpha\beta|$ สูงกว่าหนึ่งหน่วยเล็กน้อยที่มีความถี่ ออสซิลเลต (ประมาณ 5 %) แต่ถ้าค่า $|\alpha\beta|$ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้แอมพลิจูดที่เอาต์พุตเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก่อให้เกิดความบิดเบือนของสัญญาณ

สำหรับเสถียรภาพของแอมพลิจูดที่ดี การเปลี่ยนแปลงของอัตราขยาย (a) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดแรงดันเอาต์พุต V_o ควรจะมีค่าสูง นั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลง (a) ต่อ $V_o [da/dV_o]$ จะต้องเป็นจำนวนลบสูง ๆ ปกติเพิ่มอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับจำกัดแรงดันเพื่อให้ออสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพของแอมพลิจูดเช่น ไดโอด

2.2 การเปลี่ยนแปลงภายในขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้

2.2.1 ผลของ eddy current

Eddy current คือกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า อันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า จะเกิด eddy current ในแกนเหล็ก จากเส้นแรงของขดลวดที่พันในหม้อแปลงนั้น ถ้าแกนเหล็กบาง eddy current ก็จะเกิดขึ้นน้อยตามขนาดของแกน แต่ถ้าแกนเหล็กของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่จะเกิด eddy current สูง จะมีผลโดยตรงกับขนาดของขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง ดังนั้นจะใช้หลักการเหล่านี้เพื่อทำเป็นหลักการของเครื่องตรวจจับโลหะ โดยให้ขดลวดเป็นเสมือนลวดที่ใช้พันในหม้อแปลง แต่พันด้วยแกนอากาศแทนและให้โลหะที่จะตรวจจับเสมือนเป็นแกนเหล็กในหม้อแปลง ซึ่งสามารถพิจารณาผลที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีดังต่อไปนี้

ใช้ขดลวดพันเพียงรอบเดียวในการคำนวณ ใช้ขนาดรัศมี b และจ่ายกระแสให้ขดลวดด้วยค่า $I_o e^{j\omega t}$ และให้มีทรงกลมเล็กรัศมี a ลอยอยู่เหนือจุดกึ่งกลางของขดลวด

ในการคำนวณ จะคำนวณเกี่ยวกับแรงในทรงกลมพลังงานที่เข้าทรงกลม (ที่เกิด eddy-current) และการเปลี่ยนแปลงค่า inductance ของขดลวด เนื่องจากโลหะทรงกลม

สิ่งสำคัญที่สุด คือ อัตราส่วน skin depth, ρ คอรัสมิ

skin depth เป็นค่าของระยะทางของคลื่นที่เข้าไปในตัวนำหนึ่ง แล้วคลื่นถูกลดทอน (attenuated) เหลือ $\frac{1}{2}$ หรือ 37%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{skin depth, } \rho = \frac{\sqrt{2}}{\omega\mu_0 c} \text{ เมตร} \quad (2.5)$$

โดย ω เป็น circular frequency (ความถี่ของสนามแม่เหล็กที่เข้าทรงกลม)

C เป็น ค่า conductivity ของโลหะทรงกลมนี้

μ_0 เป็น ค่า permeability ของโลหะทรงกลมนี้ในสุญญากาศ

ถ้าใช้ความถี่ 400 KHz มี $C = 10^7 \text{ ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ จะได้ค่า $\rho = 4 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.4 \text{ m.m}$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า โลหะทรงกลมที่ใช้ทดลองต้องมีขนาดเล็กที่สุด 1 cm. จึงจะได้

$$\rho / a \ll 1$$

ค่า $\rho / a \ll 1$ นี้เป็นตัวกำหนดความถี่ที่สัมพันธ์กับขนาดที่ใช้กับเครื่องตรวจจับโลหะ เพราะถ้าความถี่ต่ำลง ค่า skin depth จะสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงว่าโลหะที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขดลวดต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อใช้ค่า $\rho / a \ll 1$ นี้ผลของ eddy current ทั้งหมดก็เปรียบเสมือนกระแสไหลวน อยู่เฉพาะผิวของโลหะเท่านั้น ซึ่งเสมือนตัวป้องกัน magnetic flux ไม่ให้ไหลผ่านเข้าไปภายใน โลหะ ทำให้สามารถสมมติได้ว่า ภายในโลหะมี $B = 0$ ได้

เมื่อมีโลหะเข้ามาอยู่ในสนามแม่เหล็กจะได้ว่า

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.6)$$

H = magnetic field

M = magnetization ของโลหะ

โดยที่

$$H = (H_0 e^{j\omega t} - H_{demag}) k \quad (2.7)$$

K = unit vector

เทอม $H_0 e^{j\omega t}$ เป็น magnetic field เมื่อไม่มีโลหะที่มี $e^{j\omega t}$ อยู่ด้วย เนื่องจากเราจ่ายกระแส $I_0 e^{j\omega t}$ ให้แก่ขดลวด จึงสร้างสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกระแสด้วย

H_{demag} = Demagnetizing field ซึ่งเกิดจากโลหะสร้างสนามที่ได้จากการเหนี่ยวนำของสนามเดิม ซึ่งจะมีทิศตรงข้ามสนามเดิมจึงลบกัณฑ์สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็น โลหะทรงกลม

$$H_{demag} = 1/3 M \quad (2.8)$$

$$B = \mu_o (H_{oe}^{j\omega t} - 1/3 M + M) \quad (2.9)$$

เนื่องจากใช้โลหะที่ $\rho/a \ll 1$ ดังนั้นภายในโลหะเสมือน $B = 0$
จะได้

$$0 = \mu_o (H_{oe}^{j\omega t} + 2/3 M)$$

ดังนั้น

$$M = -3/2 H_{oe}^{j\omega t} k \quad (2.10)$$

จะหาค่า magnetic moment ของโลหะทรงกลมนั้น
โดยที่ magnetic moment , $m = vM$

เมื่อ $V =$ ปริมาตรของโลหะทรงกลม $= 4/3 \pi r^3$

$M =$ Magnetization ของโลหะ

จากสมการ (6) จะได้

$$\begin{aligned} m &= [4/3 \pi a^3] [-3/2 H_{oe}^{j\omega t} k] \\ m &= -2 \pi a^3 H_{oe}^{j\omega t} k \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ $a =$ รัศมีวงกลม

Magnetic moment , m เกิดขึ้นจากผลของ eddy current ที่ไหลวนที่ผิวโลหะทรงกลม
ดังนั้นเราสามารถแสดงค่านี้ได้ให้อยู่ในรูปที่เป็นกระแสไหลวนใน loop coil ซึ่งเป็นขดลวด (coil)
รัศมี a มีจำนวนหนึ่งรอบ

ได้ magnitude ของกระแสเป็น $I \pi a^2$ ซึ่งเท่ากับ magnetic moment เพราะเป็นการ
เปรียบเทียบมาจากโลหะทรงกลมเดียวกัน

ดังนั้น

$$\begin{aligned} I \pi a^2 &= -2 a^3 \pi H_{oe}^{j\omega t} \\ I &= -2 a H_{oe}^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในสมการ (B) นี้จะเป็นตัวสร้าง axial field เนื่องจาก axial magnetic field เป็น

$$B = (I_0/2) \frac{ub^2 e^{j\omega t} k}{(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.13)$$

จากสมการ axial magnetic field ที่เกิดจาก Single loop รัศมี b ณ.จุดบนแกน ห่างออกไป Z ด้วยกระแส I_0

ดังนั้นตามสมการนี้ เมื่อทรงกลมมีกระแสดังสมการจะได้ axial magnetic field ของทรงกลมเป็น B_m ดังนี้

$$B_m = -(2ahoe^{j\omega t} \mu_0/2) \left[a^2/2(a^2 + z^2)^{3/2} \right] k \quad (2.14)$$

ถ้าสมมติว่า สนามนี้คงที่อยู่เหนือพื้นที่ของ loop ดังนั้น flux ที่ไหลผ่าน loop เป็น

$$\phi_{loop} = \frac{-\mu_0 a^3 \pi b^2 \cdot b^2 \cdot I_0 e^{2j\omega t}}{2(a^2 + z^2)^{3/2} \cdot 2(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.15)$$

ทำการเฉลี่ยตลอดช่วง

$$\phi_{loop} = \left[\mu_0 \pi a^3 b^4 / B(a^2 + z^2)^{3/2} (b^2 + z^2)^{3/2} \right] I_0 \quad (2.16)$$

ค่า inductance จะเปลี่ยนได้เนื่องจากถูก induce ด้วย eddy current
ดังนั้น

$$\Delta L = \frac{d\phi_{loop}}{dI_0} = \frac{\mu_0 \pi a^3 b^4}{B(a^2 + z^2)^{3/2} (b^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.17)$$

Self inductance ของ loop เป็น

$$L = b \{ \mu_0 [\ln(Bb/d) - 2] + 1/4 \mu_0 \} \quad (2.18)$$

โดยที่ d = รัศมีของขดลวด

ถ้า $a = 0.5$ cm, $b = 2.5$ cm, $z = 0.5$ cm, $d = 1/8$ inch.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า inductance เปลี่ยนแปลงไปเป็น

$$\Delta L = 4.12 \times 10^{-7} H$$

และค่า Self inductance

$$L = 1.44 \times 10^{-6} H$$

เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่า loop เกิดการเปลี่ยนแปลงถึง 30% ซึ่งผลนี้เองที่นำมาใช้กับ Metal detector โดยโลหะเข้าใกล้ขดลวด แล้วจะทำให้ค่า L ของขดลวดเปลี่ยนไป สามารถนำการเปลี่ยนแปลงของขดลวดนี้ไปเข้าวงจรตรวจจับ เพื่อใช้แสดงผล

จากการแสดงวิธีการทั้งหมดนี้ เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า inductance ของขดลวด

การเปลี่ยนแปลงของค่า L เมื่อมีโลหะมาในระยะใกล้ขดลวดระยะหนึ่ง โดยคิดจากผลของ eddy current ซึ่งเกิดขึ้นในโลหะ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ flux เทียบกับกระแส eddy current

ผลของ eddy current ซึ่งเป็นกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น โดยการใช้หลักการนี้มาใช้ในเครื่องตรวจจับโลหะเมื่อโลหะเข้าใกล้ขดลวด ผลของ eddy current จะทำให้ค่า inductance ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อจ่ายกระแสสลับให้แก่ขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดทำให้เกิด eddy current ในโลหะ โดยเขียนแทนขดลวดและโลหะในลักษณะของ Transformer coupling

2.1.2 ผลของ Magnetism และ Permeability

เนื่องจากโลหะชนิด Ferrous มีค่า permeability (μ) สูงมาก เมื่อโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็กของขดลวด ก็จะได้รับอำนาจแรงดึงดูดจากขดลวด แต่โลหะนี้จะทำให้ค่า inductance ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากค่า μ ของโลหะมีค่าสูงมาก เราจะแสดงความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงของค่า L ของขดลวดกับค่า μ ของโลหะดังนี้

ถ้า L_0 เป็น inductance ของขดลวด เมื่อไม่มีโลหะเข้าใกล้

L เป็น inductance ของขดลวดที่เพิ่มขึ้นไปหลังจากมีโลหะมาใกล้ขดลวด

ค่า L ที่เปลี่ยนไป $dL = L - L_0$

เราจะหาค่า L ที่เปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยการให้

Inductive energy, $E =$ magnetic energy stored in the field

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Inductive energy, } E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.19)$$

i = กระแสภายในขดลวด และ Magnetic energy stored ในขดลวดหาได้ดังนี้
 เนื่องจาก Energy density , $\rho_m = 1/2 \mu H^2$ ซึ่งเป็น energy density จุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก
 จะเป็น energy ต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

Total magnetic energy density = $1/2 \int \mu H^2 dv$ = magnetic energy stored
 เนื่องจากให้ inductive energy = magnetic energy stored in the field
 ฉะนั้นได้

$$\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \int \mu H^2 dV \quad (2.20)$$

ถ้าไม่มีโลหะอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะได้

$$\frac{1}{2} L_0 i^2 = \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV \quad (2.21)$$

แต่ถ้ามีโลหะอยู่ในสนามแม่เหล็กโดยโลหะมีค่า permeability = μ

จะได้

$$\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV - \frac{1}{2} \int \mu_0 H^2 dV + \frac{1}{2} \int \mu H^2 dV \quad (2.22)$$

สมการ(18)-(17)จะได้

$$\frac{1}{2} dLi^2 = \frac{1}{2} \int_{V_{sample}} (\mu - \mu_0) H^2 dV \quad (2.23)$$

เนื่องจาก $\mu = \mu_0 \mu_r$

μ = permeability ของโลหะที่เป็น Sample เข้ามาในสนามแม่เหล็กของขดลวด

μ_r = relative permeability

ดังนั้น

$$dL = 1/i^2 \int_{V_{sample}} (\mu_r - 1) \mu_0 H^2 dV \quad (2.30)$$

จากสมการนี้พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า inductance ของขดลวด เมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้
 ถ้าใช้ coil เป็นวงจร resonant กับ Capacitor จะมีผลทางความถี่ดังนี้คือ

$$dW = (-W^3 C dL) / 2 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อเกิดค่า dL คือมีโลหะมาใกล้ขดลวดนั้นจะทำให้ความถี่ของ LC resonant ลดลงไป

2.3 เส้นแรงแม่เหล็กที่หัวตรวจ

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic force) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสกับจำนวนรอบของขดลวดหรือเท่ากับผลคูณระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับค่าการเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$mmf = NI = HL$$

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด แล้วจะทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ได้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาจากผลของสนามแม่เหล็กนั่นเอง เส้นแรงแม่เหล็กนี้เองที่ทำให้เกิด linkage flux ซึ่ง flux นี้เองที่เรานำไปใช้งาน

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อแรงเคลื่อนผ่านลูปปิดหนึ่งๆจะมีกระแสไหลผ่านเกิดขึ้น โดยมีทิศทางการไหลของกระแสสวนทางกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นเอง

ดังนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสขึ้น ถ้ามีขดลวดพันด้วยจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ก็คือ $mmf = NI$ นั่นเอง

จากความสัมพันธ์ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) จะทำให้เกิด

$$B = \mu H$$

ซึ่งก็คือจะเกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นนั่นเองและผลอันนี้เราก็จะได้ฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) หาได้จากผลคูณระหว่าง พื้นที่หน้าตัดของขดลวดกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\phi = B A$$

จากกฎของเลนซ์ (Lenze's law) ถ้ามีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านลูปปิดอันหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดนั้นๆ จะมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น ฟลักซ์แม่เหล็กตัวนี้จะทำให้เกิด linkage flux จากสมการ

$$X = N \phi$$

จากคุณสมบัติของ linkage flux ซึ่งเราต้องนำไปใช้งาน สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$mmf = NI = HL$$

$$I = HL / N = BL / \mu N$$

2.4 ประเภทเครื่องตรวจจับโลหะ

ในปัจจุบันได้มีการทำเครื่องตรวจจับโลหะ (METAL DETECTOR) ออกมามากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่ที่ได้รับความนิยมและรู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่

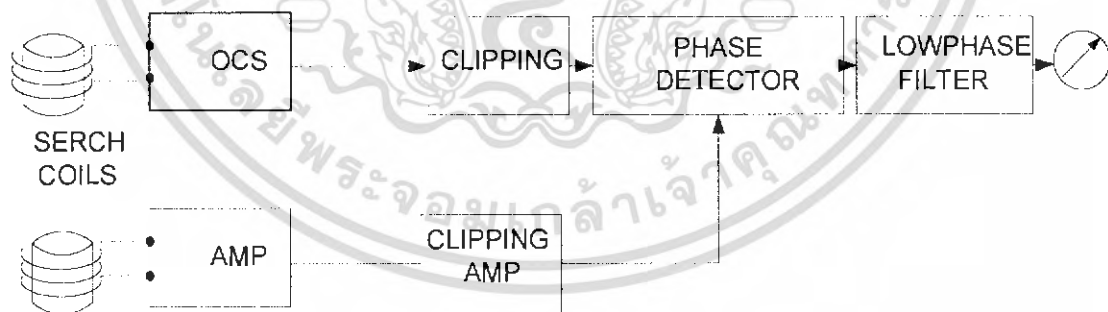
1. VLF Phase Angle
2. Pulse Induction (PI)
3. Off Resonance
4. Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)
5. Beat Frequency Oscillator (BFO)

ซึ่งจะได้อธิบายลักษณะการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะแต่ละชนิด ดังต่อไปนี้

2.4.1 VLF Phase Angle

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้จะใช้ค่าความต่างเฟสมาเป็นตัวตรวจจับ ซึ่งมีการทำงานดังใน

Block diagram ต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจร VLF Phase Angle

สำหรับวงจรนี้จะใช้ขดลวด 2 ขด ซึ่งทำหน้าที่เป็น Search coil โดยขดลวดหนึ่งจะต่ออยู่กับวงจร Oscillator ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่เป็น Square wave ออกมาที่ความถี่ค่าหนึ่ง ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่ง จะเป็นตัวรับสัญญาณที่ความถี่เดียวกันแล้วนำไปเข้าวงจร Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

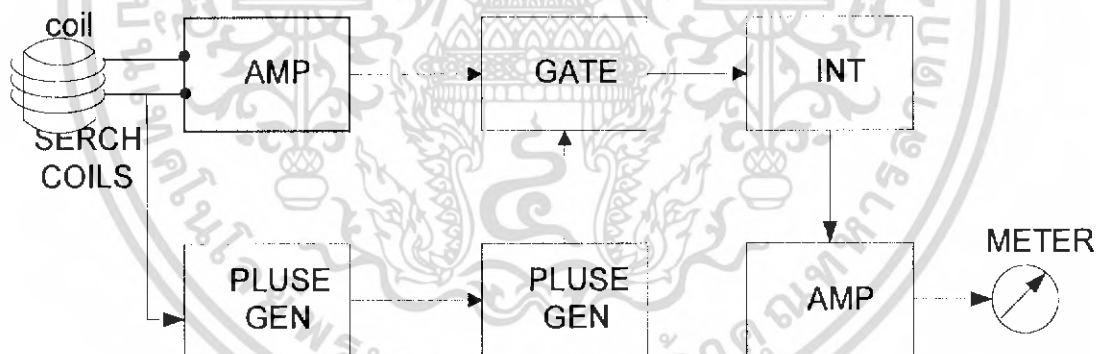
เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณ Square wave ทั้งสอง ไปเข้าวงจร Phase detector เพื่อสร้างสัญญาณที่เกิดจากความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสอง และเมื่อมีโลหะเข้าใกล้ Search coil จะทำให้ค่าความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีความต่างเฟสมากขึ้นเมื่อโลหะนั้นเป็น ferrous และความต่างเฟสจะลดลงถ้าเป็นโลหะชนิด non-ferrous หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จากความต่างเฟสนี้จะผ่านเข้าวงจรกรองความถี่ชนิด Low pass filter เพื่อกรองคอมโปเน้นท์ความถี่สูง และนำไปเร็คติไฟร์เป็นสัญญาณแรงดันดี.ซี. ซึ่งสามารถวัดได้จาก meter หรืออาจนำไปเข้าวงจร chopper เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ Low audio ที่เราสามารถรับฟังได้

วิธีนี้จะใช้ที่ความถี่ต่ำ ๆ ประมาณ 3-6 KHz ซึ่งมีความสามารถทะลุทะลวงผ่านพื้นผิวบริเวณที่ตรวจจับได้ดี และป้องกันผลจาก ground capacitance ด้วย อย่างไรก็ตาม วงจรนี้จะกินกระแสมาก เพื่อให้ได้ sensitivity สูง ๆ กับโลหะที่มีขนาดเล็กดังนั้นจึงต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ความสามารถในการหาตำแหน่งที่แน่นอน (pinpoint) ก็ไม่ค่อยดี

สำหรับความสามารถในการตรวจจับ สำหรับเหรียญ 1 บาท ได้ในระยะ 60-80 mm. และสำหรับเหรียญ 5 บาท ได้ในระยะ 100-150 mm.

2.4.2 Pulse Induction (PI)

ลักษณะ โครงสร้างและการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะชนิด PI เป็นดังรูป



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจร 2 Pulse Induction (PI)

เนื่องจากเราทราบว่า Coil จะสร้างสนามแม่เหล็กออกไป เป็นสัดส่วนกับจำนวนของกระแสที่ผ่านเข้าไปใน Coil และจำนวนรอบของ Coil

จากวงจร Pulse Generator จะส่งสัญญาณที่เป็น Pulse ช่วงสั้น ๆ ไปยัง Search Coil ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ Coil ที่ขอบขาลงของสัญญาณแต่ละ Pulse สนามแม่เหล็กบริเวณ Coil จะลดลง จนกระทั่ง Voltage ตกลงเป็น 0 ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน Coil แต่เนื่องจาก Coil สะสมพลังงานไว้ภายใน จึงเกิดเป็น back e.m.f. เนื่องจากสนามแม่เหล็กไหลกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำให้ Voltage คร่อม Coil มีทิศตรงข้าม (Reverse Voltage) แต่เนื่องจากเป็นพลังงานสะสม จึงสลายตัวลงจน back e.m.f. ตกลงเป็น 0 และเราใช้การสลายตัวนี้เป็นจุดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ในการตรวจจับโลหะ

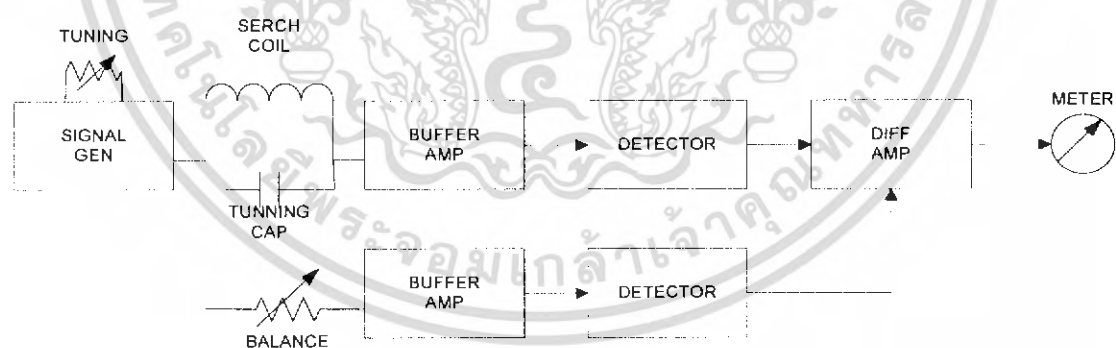
เมื่อมีโลหะไม่ว่าจะเป็น Ferrous หรือ Non-ferrous เข้าใกล้ Coil มันจะได้รับผลจาก สนามแม่เหล็ก เกิดเป็น eddy current หรือ magnetized ที่โลหะนั้นตามแต่ชนิดของโลหะ และ ผลนี้จะเป็นชนิดใดก็ตาม จะทำให้ back e.m.f. ที่ตกไปเป็น 0 มีระยะเวลายาวกว่าเดิม

วงจร detector จะเป็นวงจรที่ตรวจจับจากพื้นที่ภายใต้สัญญาณของการ decay ของ back e.m.f. ซึ่งจะทำให้ได้โดย นำสัญญาณจาก Coil มาขยาย และทำเป็น Sample Voltage ซึ่งไป เข้า integrator ซึ่งจะทำให้ integrator สร้าง output เป็นที่เป็นสัดส่วนกับเวลาในการ decay ของ back e.m.f. แล้วนำ voltage จาก output ของ integrator นี้ไปควบคุม voltage control oscillator (VCO) ซึ่งไปจับลำโพงอีกทีหนึ่ง

สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้จะมี Sensitivity มาก โดยส่วนประกอบของเครื่องนี้ จะไม่เป็นโลหะไม่ได้ เพราะจะไปรบกวนและมีผลต่อเครื่องตรวจจับ แต่ไม่ปัญหาเกี่ยวกับ Ground Effect สำหรับข้อเสียคือไม่สามารถแยกได้ว่าโลหะชนิดนั้นเป็น Ferrous หรือ Non Ferrous และยังต้องใช้ Power มากด้วย

2.4.3 Off Resonance

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้ จะมีหลักการทำงานคล้ายกับวิธี Beat Frequency Oscillator แต่อาศัยหลักการ balance ของสนามแม่เหล็กด้วยดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance

Signal Generator จะส่งสัญญาณไปยัง Buffer Amplifier และวงจร Detector โดยผ่าน วงจร LC Tuning ซึ่งทำหน้าที่เป็น Serch coil และสัญญาณโดยตรงจาก Serch coil จะนำไปเข้าสู่ Control Balance ต่อไปยัง Buffer Amplifier และวงจร Detector อีกชุดหนึ่ง ดังรูป สัญญาณ output

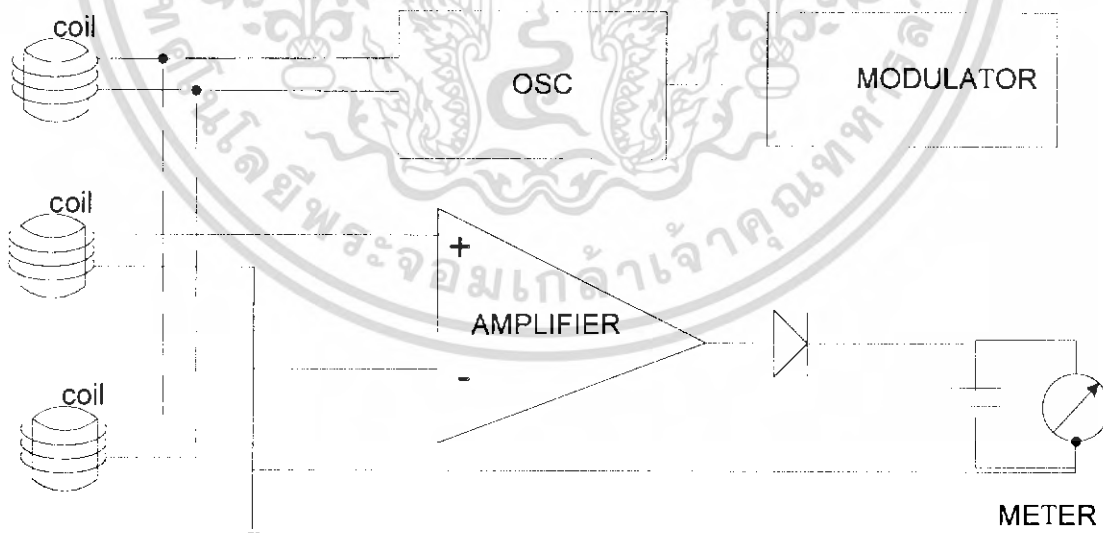
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจร Detector ทั้งสองจะนำไปเข้าวงจร Differential Amplifier ซึ่งจะเป็นตัวจับความแตกต่างของสัญญาณจาก Detector ทั้งสอง ในขณะที่ปกติ เราจะปรับ balance ให้ output เป็น Zero จากส่วน Control Balance และเมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้ Search coil จะทำให้เกิดการ Shift Resonance Frequency ที่วงจร Tuning เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่า Inductance ทำให้เกิด Imbalance ขึ้นที่ Diff Amp ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยใช้ Meter หรืออาจอ่านสัญญาณจาก Diff Amp มาสร้างเป็นสัญญาณที่เรา รับฟังได้

สำหรับเครื่องตรวจจับ โลหะชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าไร เนื่องจากมี Sensitivity ที่ต่ำ และวงจรมีความยุ่งยาก

2.4.4 Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)

เครื่องตรวจจับ โลหะชนิดนี้จะใช้หลักการ Inductance Balance ซึ่งได้ใช้วงจรออสซิลเลเตอร์ ในการส่งสัญญาณไปยังขดลวดส่ง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวด ขดลวดรับซึ่งวาง เหลื่อมกันกับขดลวดส่งจะรับสนามแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะสมดุล ทำให้เกิดสัญญาณที่เอาท์พุท เพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย เมื่อโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการไม่สมดุล ของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ขดรับเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการเปลี่ยนแปลงนี้ สามารถนำไปผ่านวงจรขยาย วงจรเรียงกระแส และวงจรกรอง จะได้สัญญาณเอาท์พุทจากระบบ เป็นสัญญาณแรงเคลื่อน ดี.ซี. นำสัญญาณนี้ไปใช้แสดงผล โดยต่อเข้ากับมิเตอร์, วงจรกำเนิดเสียง, หรืออุปกรณ์ที่สามารถแสดงผลอื่นได้

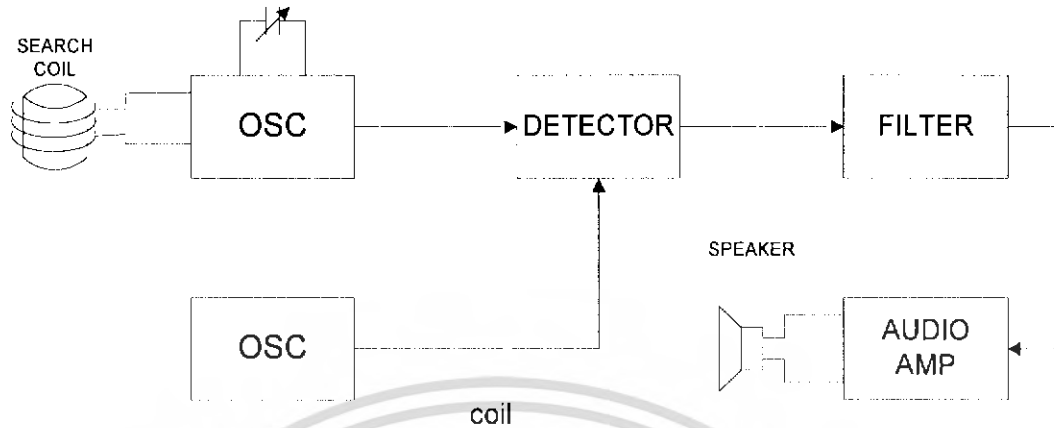


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Inductance Balance (IB) และ Transmit/receive (TR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 Beat Frequency Oscillator (BFO)

โดยหลักการทำงานดัง Block diagram



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Beat Frequency Oscillator (BFO)

ในวงจรนี้จะมี วงจร Oscillator 2 วงจร ซึ่งจะสร้างความถี่ออกมาที่ใกล้เคียงกันมาก โดยวงจรหนึ่งจะใช้สร้างความถี่เป็น Reference Frequency ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะเปลี่ยนค่าความถี่ได้ โดยค่า inductance ที่ Serch coil ขณะที่โลหะเข้าใกล้ เมื่อวงจร Oscillator ทั้งสอง มีความถี่ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แล้วนำมาผ่านวงจร Detector สัญญาณ output ที่ได้จะเกิดเป็นสัญญาณ beat ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าความถี่ทั้งสอง ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นสัญญาณที่เราฟังได้ โดยผ่านวงจร Filter แล้วส่งออกทาง Headphone

สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะที่เราได้สร้างขึ้นนี้จะอาศัยหลักการ BFO ซึ่งได้อธิบายวิธีการสร้างการทดลอง และ การใช้งานในบทต่อจากนี้ไป

71962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

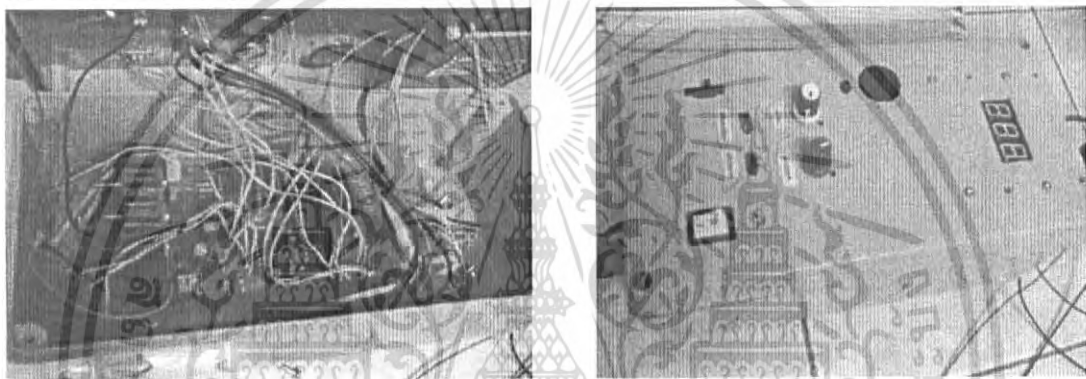
บทที่ 4

การทดลอง

4.1 เครื่องตรวจจับโลหะ

- การสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ

บรรจุวงจรทั้งหมดลงในกล่องพลาสติกขนาด 157x95x54 มิลลิเมตร โดยวางวงจรซ้อนกัน คือ ให้อุปกรณ์ตรวจหาโลหะอยู่ด้านล่างและวงจรแสดงผลอยู่ด้านบน ส่วนฝาปิดกล่องเจาะรูเพื่อสอดแกนวอลุ่ม 4 รู, LED 2 รู, สวิตช์เปิดลำโพง 1 รู, สวิตช์ปิดเปิดเครื่อง 1 รู, Buzzer รู, และส่วนแสดงผลที่เป็น 7-segment 3 Digit อีก 1 รู



รูปที่ 4.1 การวางอุปกรณ์และกล่องควบคุม

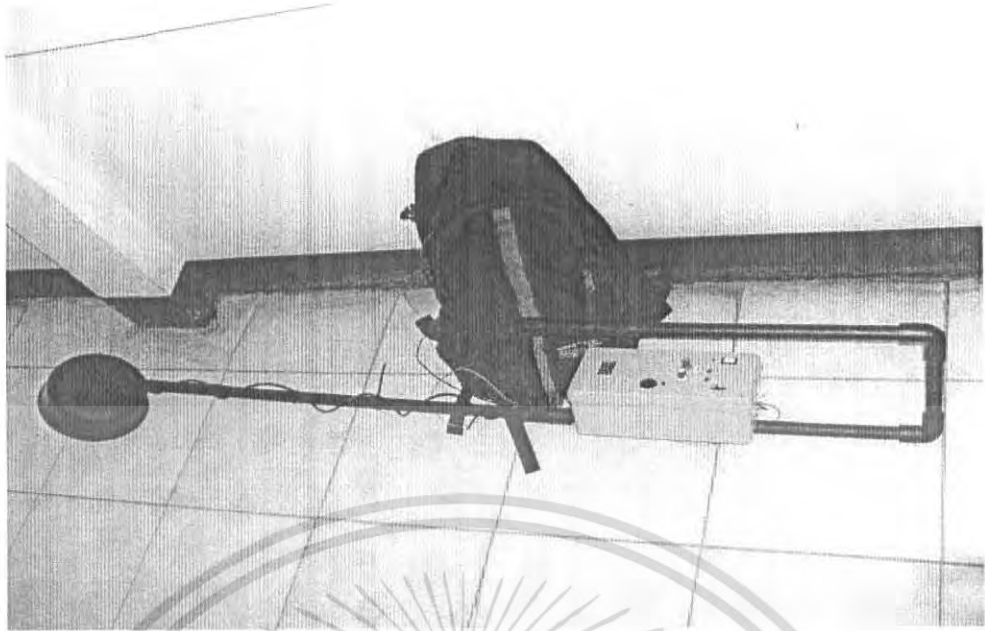
- การทำโครงของเครื่องตรวจจับโลหะ

ใช้ท่อ PVC ตัดขนาดตามรูปที่ 4.2 ในจุดที่มีข้อต่อใช้กาวทาเพื่อยึดติดต่อกับข้อต่อจะทำให้จุดเชื่อมต่อนั้นแน่นยิ่งขึ้น ในส่วนของหัวตรวจใช้ฝาครอบขนาด 180 mm และใช้ลูมิเนียมจากเพื่อล็อกฝาครอบเข้ากับด้ามจับแล้วขันน็อตเพื่อยึดติดอุปกรณ์ทั้งสองเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเครื่องตรวจจับโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



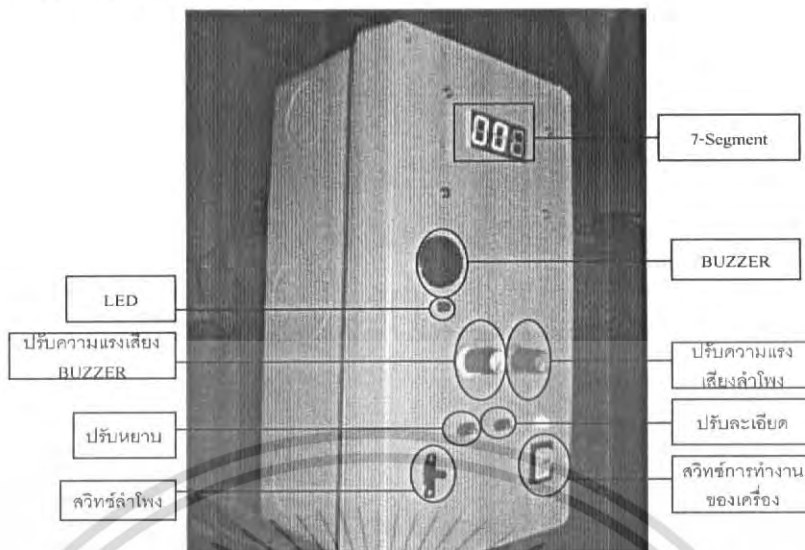
รูปที่ 4.3 เครื่องตรวจจับโลหะ



รูปที่ 4.4 ลักษณะการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ



รูปที่ 4.5 แสดงการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะ

ขั้นตอนแรก การใช้งานนั้นต้องปรับความถี่ของหัวตรวจด้วยตัวปรับหนายบ และตัวปรับละเอียด เพื่อให้สัญญาณของภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจเกิดการอินเฟสกับความถี่ของภาคผลิตความถี่ลงที่ปรับเครื่องจนไม่มีเสียงดังออกมาจาก BUZZER พร้อมทั้ง LED ไม่เปล่งแสงออกมาหรือปรับให้ชุดแสดงผล 7-SEGMENT มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะหมายถึงเกิดการอินเฟสของภาคผลิตความถี่ทั้งสอง



รูปที่ 4.6 แสดงการตรวจพบโลหะ

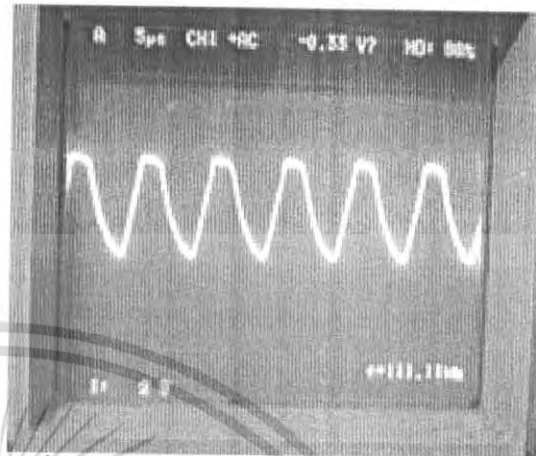
เมื่อหัวตรวจถูกนำไปใกล้โลหะ จะทำให้ความถี่ในภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้เกิดการไม่อินเฟสกับภาคผลิตความถี่คงที่ จึงทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้น ซึ่งจะทำให้ BUZZER มีเสียงดังออกมา และ LED เปล่งแสง พร้อมทั้งชุดแสดงผล 7-SEGMENT จะแสดงค่าระยะทางของวัตถุที่ตรวจพบออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลอง

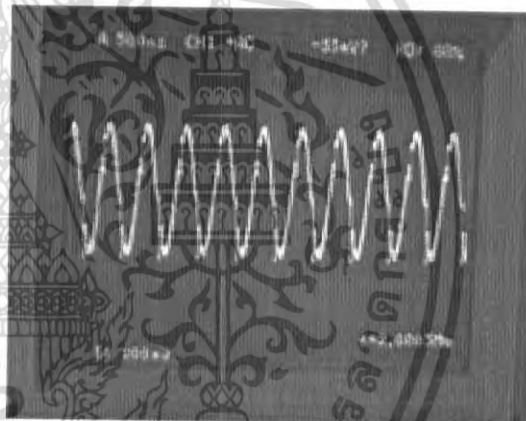
- เมื่อทดลองต่อวงจรแล้วทำการวัดสัญญาณ ณ จุดต่างๆ ในวงจรสามารถแสดงสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ดังนี้

1. สัญญาณที่ได้จากภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจ จะเป็นสัญญาณ sine wave มีความถี่ที่ 111.1 kHz ดังรูปที่ 4.7



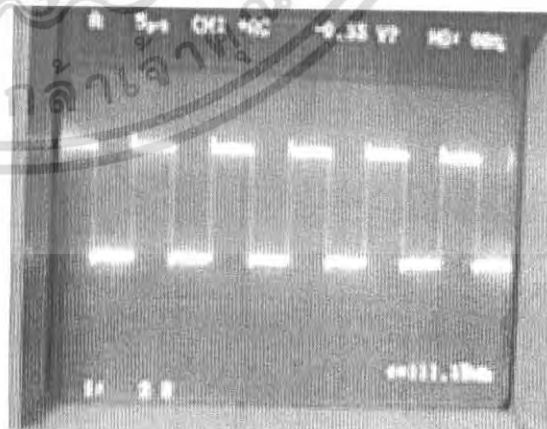
รูปที่ 4.7 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจ

2. สัญญาณที่ได้จากภาคผลิตความถี่ที่จะเป็นสัญญาณ sine wave มีความถี่ที่ 2 MHz ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ที่

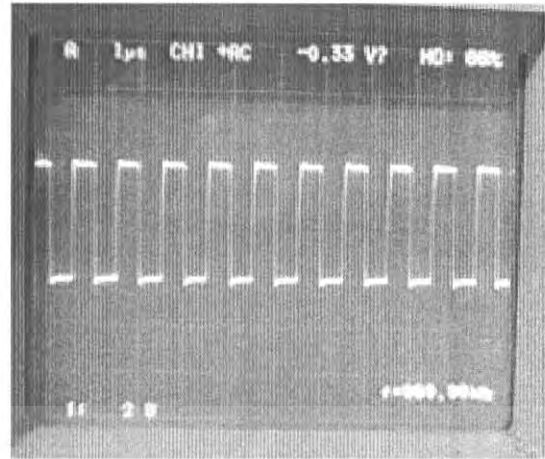
3. สัญญาณที่ได้จากภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจหลังจากผ่านไอซีแนนด์เกต ซึ่งจะทำให้รูปสัญญาณที่ได้ เป็นสัญญาณความถี่รูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่ของหัวตรวจ
หลังจากผ่านไอซีแนนด์เกต

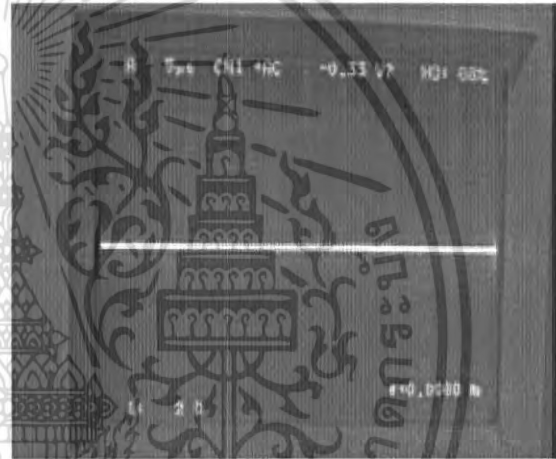
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สัญญาณที่ได้จากภาคผลิตความถี่คงที่ หลังจากผ่านไอซีเนนด์เกต พร้อมทั้งหาร 2 ความถี่ ซึ่งจะทำให้ความถี่ลดลงเหลือเพียง 1 MHz ดังรูปที่ 4.10



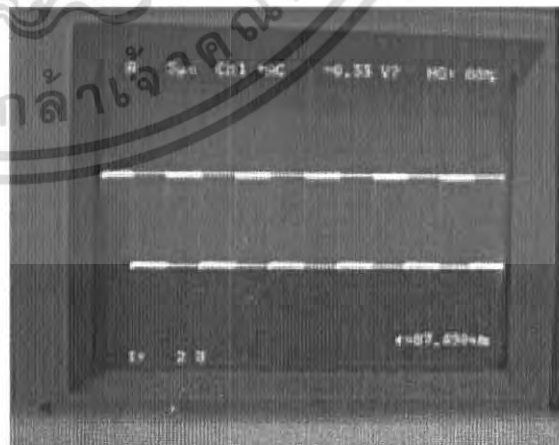
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ภาคผลิตความถี่คงที่หลังจากผ่านไอซีเนนด์เกต พร้อมทั้งหาร 2 ความถี่

5. สัญญาณเอาต์พุต เมื่อความถี่จากหัวตรวจเป็นไฮ มาเจอกับความถี่จากหน่วยผลิตความถี่คงที่ซึ่งเป็นโลว์ เอาต์พุตทางออกจึงเป็นโลว์ตลอดเวลา ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อภาคผลิตความถี่ทั้ง 2 เกิดการอินเฟสกัน

6. สัญญาณเอาต์พุต เมื่อมีโลหะเข้ามาใกล้กับหัวตรวจ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของภาคหัวตรวจ เปลี่ยนเป็นความถี่สูงขึ้น ย่อมไม่เกิดการอินเฟสกับภาคผลิตความถี่คงที่ ดังนั้นเอาต์พุตจึงต้องเปลี่ยนแปลงเป็นไฮ และ โลว์ ตามเฟสของความถี่ที่มาทางอินพุต ดังรูปที่ 4.12

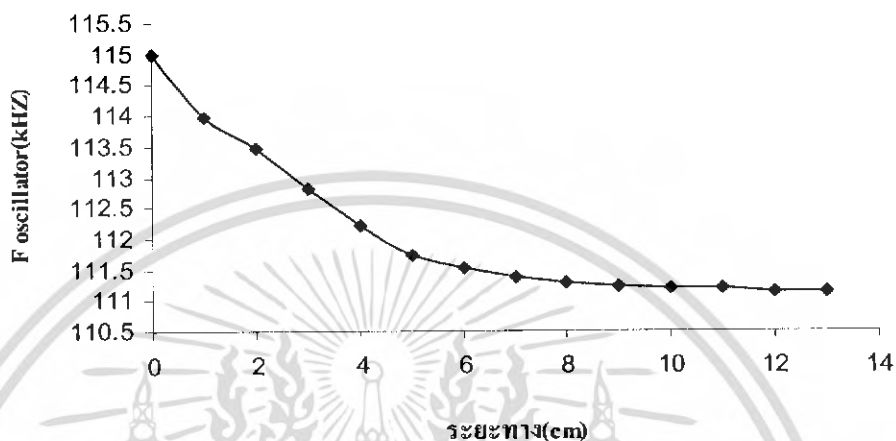


รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อหัวตรวจเข้าใกล้กับโลหะ

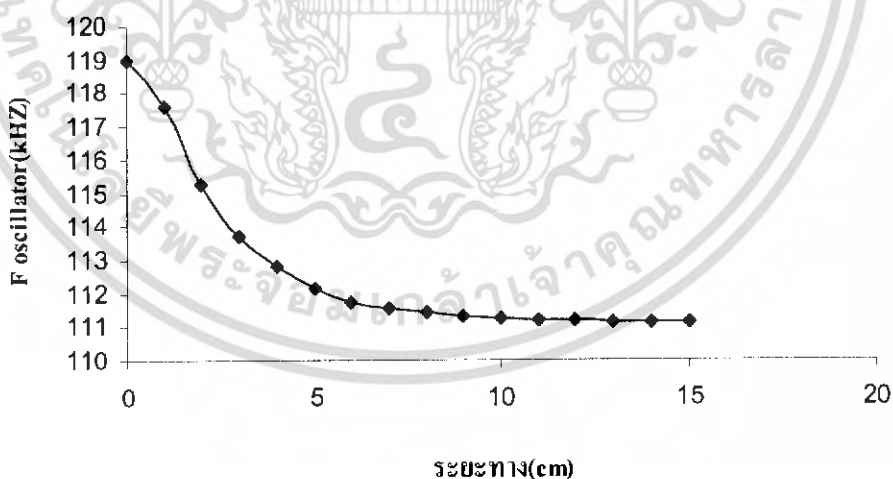
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดลองวัดสัญญาณความถี่ภาคหัวตรวจของวงจร Oscillator เมื่อวัตถุมีขนาดแตกต่างกัน

เมื่อมีวัตถุโลหะเข้าใกล้หัวตรวจจะทำให้ความถี่ของวงจร Oscillator เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้มีการทดลองวัดความถี่ของวงจร Oscillator ที่วัตถุมีขนาดที่แตกต่างกัน เพื่อดูความสัมพันธ์ของสัญญาณในช่วงของความถี่ที่เกิดขึ้น

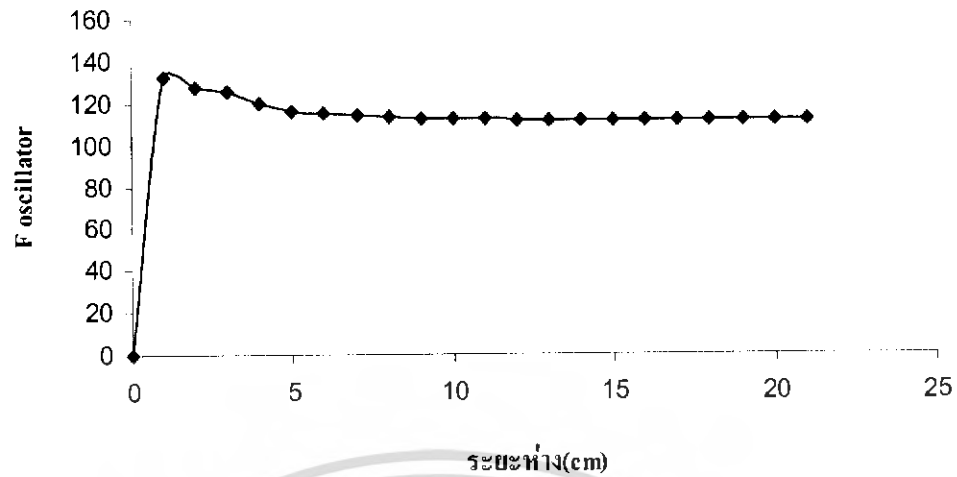


กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของเครื่องตรวจจับโลหะ กับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 7cmx7cmx6mm (กว้าง x ยาว x หนา)



กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของเครื่องตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 9cmx9cmx6mm (กว้าง x ยาว x หนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

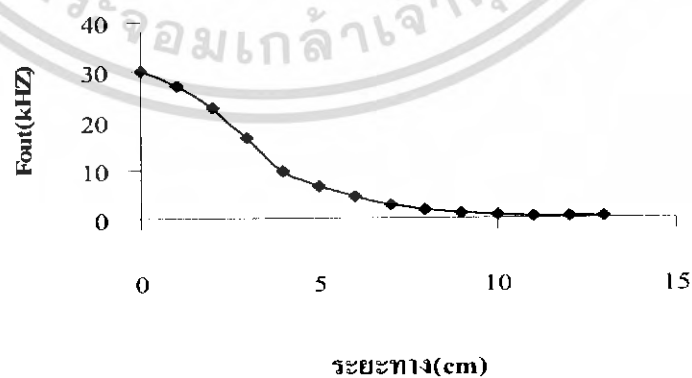


กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจร Oscillator ของเครื่องตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 6\text{mm}$ (กว้าง x ยาว xหนา)

เมื่อได้ดูกราฟรูปที่ 4.3 เราจะพบว่าวัตถุโลหะที่มีขนาด $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 6\text{mm}$ เมื่อเข้าใกล้หัวตรวจมากขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งจะทำให้วงจร Oscillator ผลิตความถี่ออกมาไม่ได้

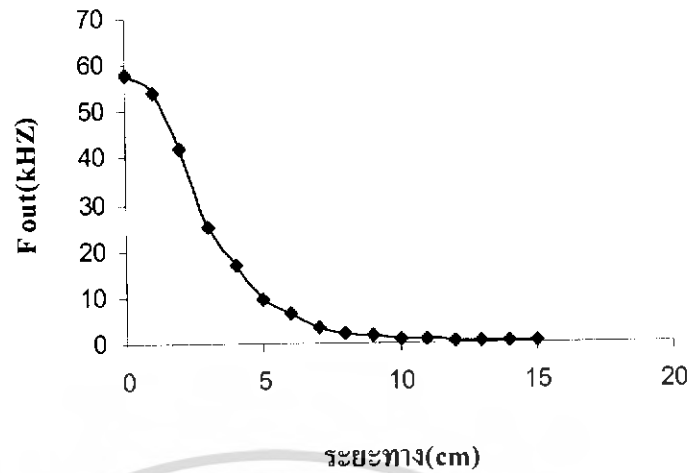
- การทดลองวัดสัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่ เมื่อวัตถุมีขนาดแตกต่างกัน

สำหรับสัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะจากการทดลองจะพบว่าสัญญาณความถี่ที่ได้นั้นจะมีความสัมพันธ์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับระยะทาง โดยเมื่อวัตถุโลหะเข้าใกล้มากขึ้นความถี่ก็จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสามารถดูความสัมพันธ์ได้จากกราฟ

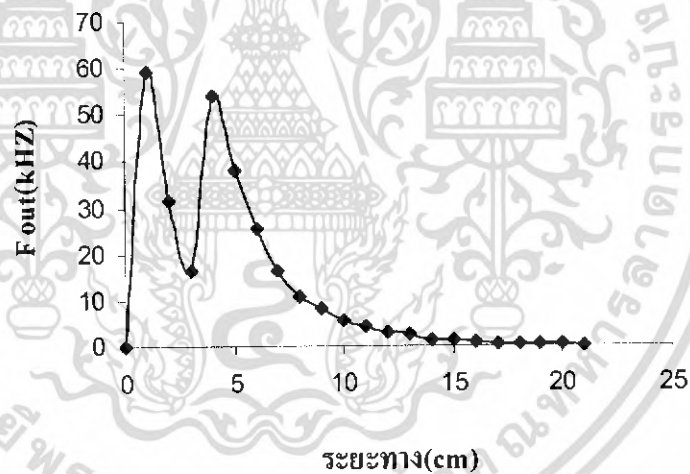


กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่

ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด $7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 6\text{mm}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 9cmx9cmx6mm



กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่ของวงจรตรวจจับโลหะกับระยะห่างของวัตถุโลหะที่มีขนาด 20cmx20cmx6mm

จากกราฟที่ได้นั้นจะพบว่าสัญญาณความถี่ที่ได้นั้น จะมีความสัมพันธ์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับระยะทางโดยของวัตถุโลหะ ซึ่งจะพบว่าซึ่งจะพบว่ายิ่งวัตถุโลหะเข้าใกล้มากขึ้นความถี่ก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะห่าง แต่จากการทดลอง กราฟของวัตถุโลหะที่มีขนาด 20cmx20cmx6mm เมื่อเข้าใกล้หัวตรวจ มากขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่วงจร Oscillator เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่จนเป็น 118kHz จะทำให้สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่มีค่ามากที่สุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ประมาณ 58kHz และเมื่อวัตถุโลหะเข้าใกล้หัวตรวจมากขึ้นกว่าเดิมจะทำให้ความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์อีกครั้งเมื่อวงจร Oscillator ผลิตความถี่ออกมาที่ระดับ 125 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดการอินเฟสอีกครั้งและสัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อวัตถุเข้าใกล้หัวตรวจมากขึ้น จนถึงระยะใกล้มากระยะหนึ่งวงจร Oscillator จะไม่สามารถผลิตความถี่ออกมาได้ และจะทำให้สัญญาณความถี่ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบและผสมความถี่มีค่าเป็นศูนย์ด้วย

- ก่อนการนำวงจร F/V CONVERTER นั้นจะต้องทำการสอบเทียบก่อนโดยทำการเปลี่ยนความถี่อินพุต f_{in} ด้วยฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ให้มีค่าเป็น 50kHz แล้ววัดแรงดันเอาต์พุตว่ามีค่าเป็น 5V หรือไม่ ถ้าไม่ได้ให้ปรับค่า VR 20k Ω จนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตเป็น 5V

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองวงจร F/V CONVERTER

f_{in} (kHz)	V_{out} (V) จากการทดลอง	V_{out} (V) จากทฤษฎี
0	0	0
5	0.51	0.5
10	1.03	1.0
15	1.53	1.5
20	2.04	2.0
25	2.54	2.5
30	3.04	3.0
35	3.53	3.5
40	4.02	4.0
45	4.51	4.5
50	5.00	5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อนำเครื่องตรวจจับโลหะนี้ ไปทดลองกับโลหะชนิดเดียวกันที่มีขนาดที่แตกต่างกัน แล้ววัดระยะที่สามารถตรวจจับโลหะนั้นได้ จะได้ผลดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงระยะทางการตรวจจับของเครื่องตรวจจับโลหะเมื่อโลหะมีความหนา 6 mm ที่มีขนาดแตกต่างกัน

ขนาดวัตถุ (cm)	ระยะการตรวจจับ (cm)
20x20	21
15x15	19
10x10	16
9x9	15
8x8	14
7x7	13
5x5	10.5
4x4	9
3x3	8
2.5x2.5	7
2x2	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับโลหะ

- ขนาดของวัตถุมีผลต่อระยะทางในการตรวจจับคือถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่ ระยะที่สามารถตรวจจับได้ก็จะมีระยะที่ไกลขึ้น

- ลักษณะการพันหัวตรวจและจำนวนขดลวดที่ใช้พันหัวตรวจ มีผลต่อความถี่ที่เกิดขึ้นถ้าหากพันจำนวนขดลวดน้อยหรือมากเกินไป จะทำให้ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ได้ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถนำเอาความถี่นี้ไปใช้งานได้

- เมื่อเครื่องนี้ตรวจจับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ในระยะที่ใกล้เกินไป อาจจะทำให้วงจรออสซิลเลเตอร์ไม่มีความถี่ออกมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ต้องมีการปกป้องหัวตรวจเป็นอย่างดีโดยโดยใช้กาวร้อน เพื่อห่อหุ้มและติดเข้าไปกับเข้าหัวตรวจที่เป็นไม้อัด เพราะถ้าไม่มีการปกป้องแล้วจะทำให้หัวตรวจเกิดการกระทบกระเทือนซึ่งจะทำให้ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะเป็นการกระทบกระเทือนเพียงเล็กน้อยก็อาจจะทำให้ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงได้

- ในการพันขดลวดต้องพันให้มีลักษณะแบนราบ เพราะจะทำให้สามารถตรวจจับวัตถุได้ตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้นและสามารถตรวจจับระยะความถี่ที่ไกลขึ้น

- ในการใช้งานนั้นไม่ควรนำเครื่องเข้าไปใกล้ที่มีสนามแม่เหล็กบริเวณรอบๆ เช่น คอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์ที่กำลังเปิดอยู่ เพราะจะไปทำให้ความถี่ในเครื่องตรวจจับโลหะเกิดการเพี้ยนทำให้ไม่สามารถใช้ตรวจจับโลหะได้

- เวลาใช้งานควรระมัดระวังไม่ให้เครื่องเกิดการกระทบกระเทือน เพราะอาจจะทำให้ความถี่ของเครื่องเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถใช้ตรวจจับโลหะได้ วิธีแก้ก็คือต้องมีการปรับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์จน 7-segment โชน์ค่าศูนย์ออกมาอีกครั้งจึงจะนำไปใช้งานได้

บรรณานุกรม

1. “หนังสือการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์” โดย รศ.สมยศ จุณณะปิยะ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. The Prof. “METAL DETECTOR” Practical Electical.July,1998.Page 17-21
3. ‘Power Electronics’ โดย ผศ.ไสว พงศ์สวัสดิ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. ‘Electronics Engineering’ โดยอาจารย์สักรียา ชิดวงส์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำด้ามจับ

เพื่อให้ด้ามจับสามารถแบกได้แบบเดียวกับเครื่องตัดหญ้า ซึ่งท่านสามารถแบกเหวี่ยงสายไปมาได้อย่างสะดวกเวลาที่ต้องการสายค้นหาโลหะหรือสมบัติเหนือพื้นดิน พื้นทราย จึงได้ออกแบบก้านส่ง และจะเพื่อให้มีน้ำหนักเบา จึงเลือกใช้ PVC เพียงแต่ก้านจับทำโค้งคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าในส่วนที่จะยึดเข้ากับกล่องบรรจุจงจรเอาไว้ในส่วนปลายขอบด้ามจับ วิธีการของการทำด้ามจับไม่เคร่งครัดนัก

ส่วนยึดติดหัวตรวจใช้ไม้อัดบางเป็นแป้นวงกลม ติดอะลูมิเนียมฉากเอาไว้เพื่อล็อคเข้ากับก้านด้ามจับ เพื่อให้อะลูมิเนียมฉากมีความทนทาน จึงตัดพลาสติกเป็นวงกลมมาปะเข้าไปอีกชั้น โดยต้องเจาะร่องให้เฉพาะตัวจากอะลูมิเนียมแนวตั้งโผล่ได้ ต้องทากาวที่เป็นกาวติดไม้เข้าไว้ก่อน แล้วจึงขันน็อตล็อคทั้ง 2 ส่วนนี้เข้าด้วยกัน

การเสียบตัวก้านด้ามจับเข้ากับอะลูมิเนียมฉาก ควรใช้สลักที่เป็นสลักไม้ เพื่อจะได้ไม่กินเข้าไปในเนื้อก้านจับเวลาใช้งานไปนานๆ

ตัวคลวดหัวตรวจจะติดเข้ากับแป้น ไม้อัด โดยใช้กาวซิลิโคนทำเป็นซีล

การทำหัวตรวจ

ขั้นตอนที่ 1 พันลวดหุ้มฉนวน ขนาด 0.4 มม. จำนวน 70 รอบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มม. พยายามกลิ้งออกเพื่อเรียงเส้น

ขั้นตอนที่ 2 ตัดฟอยล่ออะลูมิเนียม เป็นแผ่นกว้าง 20 มม. พันรอบลวดโดยพันให้เหลื่อมกัน โดยเริ่มจากการเอาเทปฉนวนติดเข้ากับฟอยล์ก่อนพัน พันต่อเนื่องจนมาบรรจบกันและอย่าให้หัวลวดทั้ง 2 ด้านแตะถึงกัน

ขั้นตอนที่ 3 ใช้ลวดทองแดงผสมตะกั่วขนาด 0.8 มม. พันห่างๆ ทับเข้าไปพันให้ได้ 15 รอบ บัดกรีปลายด้านหนึ่งเข้ากับซีลด์ ในขณะที่อีกด้านหนึ่งปล่อยให้ (เทปปิดปลายไว้ไม่ให้รุคไหล) ในขณะที่สายซีลด์ที่เป็นสายนำสัญญาณจากหัวตรวจ ต้องมีบัดกรีสายทองแดงที่พันเอาไว้ ตั้งแต่ตอนแรกเข้ากับสายนำสัญญาณและเส้นที่เหลือบัดกรีเข้ากับสายซีลด์

ขั้นตอนที่ 4 ปกป้องขดลวดหัวตรวจด้วยซีลด์ที่เป็นซิลิโคนชนิดไม่เป็นกรด เพื่อให้มีน้ำหนักเบาและทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. พยายามหาเบ้าทำให้เป็นแป้นหัวตรวจ ทาสีหรือน้ำมันเพื่อกันน้ำหากเป็นไปได้

การทำหัวตรวจโดยการเอาลวดทองแดง(อาบฉนวน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร มาพันเป็นวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร โดยวางลวดลงบนแป้นไม้อัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้การทำงานทำได้ง่าย และจะได้คลี่ออกมาเรียงเส้นลวดได้ง่าย ได้แล้วให้อาเทปจนวนพัน แยกเส้นลวดหัวท้ายออกจากกัน

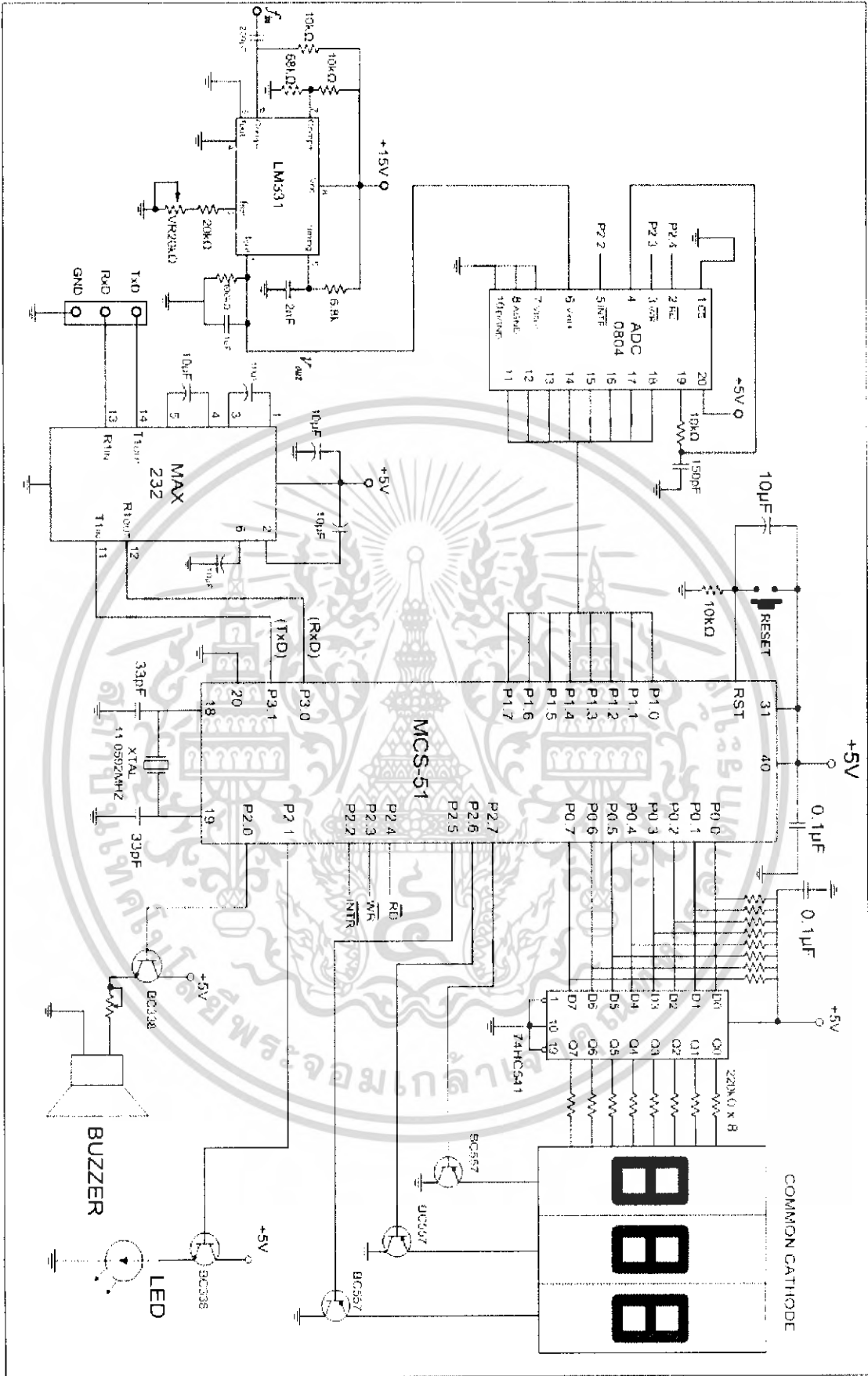
จากนั้นเอาอะลูมิเนียมฟอยล์ มาตัดเป็นแผ่นความกว้างประมาณ 20 มิลลิเมตร พันทับ ขดลวดให้ทับซ้อนกัน 10 มิลลิเมตร พันจนบรรจบกัน แต่ละวังอย่าให้ฟอยล์ทำให้ลวดหัวท้าย ชอร์ตถึงกัน ตอนนี้จะได้หัวตรวจเป็นวัตถุวงกลมแบนราบแล้ว

ต่อมาเอาลวดทองแดงผสมตะกั่วขนาด 0.8 มิลลิเมตร พันห่างๆทับไปอีกชั้นพัน 15 รอบ ตอนนี้เท่ากับลวดเส้นนี้ชอร์ตกับอะลูมิเนียมฟอยล์เรื่องของเรื่องคือเอาบัดกรีสายเข้ากับฟอยล์ไม่ได้ จึงเอาลวดเส้นนี้พันเข้าไปให้แนบสนิทกับฟอยล์ ด้านหนึ่งของลวดปล่อยไว้ อีกด้านหนึ่งบัดกรีเข้ากับสายสัญญาณที่เป็นสายชีลด์

บัดกรีสายนำสัญญาณที่เป็นสายชีลด์เข้ากับขดลวดหัวตรวจที่พันไว้ 70 รอบในตอนแรก สายเส้นหนึ่งเป็นสายสัญญาณ อีกเส้นที่เหลือเป็นสายต่อกันสายชีลด์

ติดหัวตรวจที่ทำไว้แล้วเข้ากับแป้นไม้ โดยใช้กาวแบบ MDF ซึ่งกันน้ำได้ดียึด แต่ก่อน ติดนั้นให้เจาะรูสอดสายสัญญาณเสียก่อน เพื่อให้สายสัญญาณลอดออกทางด้านบนของแป้นหัว ตรวจ

ถ้าเป็นไปได้ให้นำเอากล่องข้าวห่อหรือกะละมังพลาสติกแบบเดียวกับที่บิเปอร์แวร์ ตัดร่อง ตรงกลางมาครอบเข้าไป เพื่อให้ดูดี



รูปส่วนของวงจรประมวลผลและแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการทำงาน

```

ORG 0000H
    CLR P2.0
    CLR P2.1

BO: MOV A,#0FFH
    MOV P1,A
    SETB P2.4
    SETB P2.3
    CLR P2.3
    SETB P2.3

LOOP: JB P2.2,LOOP
    CLR P2.4
    MOV A,P1
    SETB P2.4
    MOV R5,A
    MOV R7,#255
    CJNE A,#1,NEXT_0
    SJMP SHOW_15cm

NEXT_0: JNC NEXT_14cm
    MOV R2,#0
    MOV R3,#0
    AJMP SEGMENT

SHOW_15cm: MOV R2,#1
    MOV R3,#5
    AJMP SEGMENT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NEXT_14cm: CJNE A,#2,NEXT_13cm
            MOV R2,#1
            MOV R3,#4
            AJMP SEGMENT

```

```

NEXT_13cm: CJNE A,#3,NEXT_12cm
            MOV R2,#1
            MOV R3,#3
            AJMP SEGMENT

```

```

NEXT_12cm :CJNE A,#4,NEXT_11cm
            MOV R2,#1
            MOV R3,#2
            AJMP SEGMENT

```

```

NEXT_11cm :CJNE A,#5,NEXT_10cm
SHOW_11cm: MOV R2,#1
            MOV R3,#1
            AJMP SEGMENT

```

```

NEXT_10cm : CJNE A,#7,NOT_10cm
SHOW_10cm: MOV R2,#1
            MOV R3,#0
            AJMP SEGMENT

```

```

NOT_10cm : JNC NEXT_9cm
            AJMP SHOW_11cm

```

```

NEXT_9cm : CJNE A,#9,NOT_9
SHOW_9cm : MOV R3,#9
            MOV R2,#0
            SJMP SEGMENT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NOT_9 : JNC NEXT_8cm
SJMP SHOW_10cm
NEXT_8cm : CJNE A,#15,NOT_8cm
SHOW_8cm :MOV R3,#8
           MOV R2,#0
           SJMP SEGMENT
NOT_8cm : JNC NEXT_7cm
           SJMP SHOW_9cm

NEXT_7cm : CJNE A,#20,NOT_7cm
SHOW_7cm: MOV R3,#7
           MOV R2,#0
           SJMP SEGMENT
NOT_7cm : JNC NEXT_6cm
           SJMP SHOW_8cm

NEXT_6cm : CJNE A,#32,NOT_6cm
SHOW_6cm: MOV R3,#6
           MOV R2,#0
           SJMP SEGMENT
NOT_6cm : JNC NEXT_5cm
           SJMP SHOW_7cm

NEXT_5cm : CJNE A,#50,NOT_5cm
SHOW_5cm: MOV R3,#5
           MOV R2,#0
           AJMP SEGMENT
NOT_5cm: JNC NEXT_4cm
           AJMP SHOW_6c

NEXT_4cm : CJNE A.80,NOT_4cm
SHOW_4cm :MOV R3.#4
           MOV R2.#0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AJMP SEGMENT
NOT_4cm : JNC NEXT_3cm
AJMP SHOW_5cm

NEXT_3cm : CJNE A,#130,NOT_3cm
SHOW_3cm: MOV R3,#3
MOV R2,#0
SJMP SEGMENT
NOT_3cm: JNC NEXT_2cm
SJMP SHOW_4cm

NEXT_2cm: CJNE A,#200,NOT_2cm
SHOW_2cm: MOV R3,#2
MOV R2,#0
SJMP SEGMENT
NOT_2cm: JNC NEXT_1cm
SJMP SHOW_3cm

NEXT_1cm : CJNE A,#230,NOT_1cm
SHOW_1cm: MOV R3,#1
MOV R2,#0
SJMP SEGMENT
NOT_1cm: JNC NEXT_0cm
SJMP SHOW_2cm

NEXT_0cm: CJNE A,#255,NOT_0cm
SHOW_0cm: MOV R3,#10
MOV R2,#0
SJMP SEGMENT
NOT_0cm: JNC SHOW_0cm
SJMP SHOW_1cm

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SEGMENT: MOV A,R2
          MOV DPTR,#SHOW
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV P0,A
          CLR P2.7
          LCALL DELAY_1ms
          SETB P2.7

```

```

SEGMENT_1: MOV A,R3
           MOV DPTR,#SHOW
           MOVC A,@A+DPTR
           MOV P0,A
           CLR P2.6
           LCALL DELAY_1ms
           SETB P2.6

MOV A,R5
CJNE A,#1,BO_1
SJMP BO_2
BO_1: JNC BO_2
      CLR P2.0
      CLR P2.1
      SJMP BO_3
BO_2: SETB P2.0
      SETB P2.1
BO_3: DJNZ R7,SEGMENT
      AJMP BO

```

```

DELAY_1ms: MOV R6,#0E6H
DELAY_1ms_1: NOP
            NOP
            DJNZ R6,DELAY_1ms_1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RET

SHOW: DB 3FH,06H,5BH,4FH,66H,6DH,7DH,07H,7FH,6FH,10111111B

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง

- 2 ตัว 74HC00 แนนเกต 4 ตัว
- 1 ตัว 74HC74 แนนเกต 4 ตัว
- 1 ตัว BC558 ทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี
- 1 ตัว 2N5484 เจฟท์เอ็นแซนแนล
- 1 ตัว BC338 ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น
- 1 ตัว LM2940T-5 ไอซีเรกูเลเตอร์กระแสตกคร่อมต่ำจ่ายแรงดันไฟทางออก 5 โวลต์
คาปาซิเตอร์
- 4 ตัว $47\ \mu\text{F}/16\text{V}$ อิเล็กโทรไลติก
- 1 ตัว $10\ \mu\text{F}/16\text{V}$ อิเล็กโทรไลติก
- 1 ตัว $0.22\ \mu\text{F}$ ชนิดโพลี อสเตอร์ MKT หรือเซรามิก
- 4 ตัว $0.1\ \mu\text{F}$ ชนิดโพลี อสเตอร์ MKT หรือเซรามิก
- 5 ตัว $0.001\ \mu\text{F}$ (1000 pF) โพลิสไตรีน
- 1 ตัว 100pF เซรามิก
- 2 ตัว 68pF เซรามิก
- 1 ตัว LM 331
- 1 ตัว ADC 0804
- 1 ตัว MAX 232
- 1 ตัว P89V51RD2BN
- 1 ตัว 74HC541 1 ตัว
- 1 ตัว Rnetwork 9pin 10k
- 1 ตัว 7-SEGMENT Commoncathode 3 หลัก
- 4 ตัว BC 557
- 4 ตัว LED
- 1 ตัว Regulator 15V
- 2 ตัว แบตเตอรี่ 12V

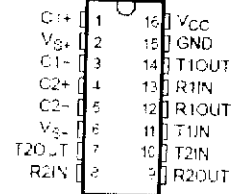
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

SILICON - FEBRUARY 1988 - REVISED MARCH 2004

- Meets or Exceeds TIA/EIA-232-F and ITU Recommendation V.28
- Operates From a Single 5-V Power Supply With 1.0- μ F Charge-Pump Capacitors
- Operates Up To 120 kbit/s
- Two Drivers and Two Receivers
- ± 30 -V Input Levels
- Low Supply Current . . . 8 mA Typical
- ESD Protection Exceeds JESD 22 - 2000-V Human-Body Model (A114-A)
- Upgrade With Improved ESD (15-kV HBM) and 0.1- μ F Charge-Pump Capacitors is Available With the MAX202
- Applications
 - TIA/EIA-232-F, Battery-Powered Systems, Terminals, Modems, and Computers

MAX232 . . . D, DW, N, OR NS PACKAGE
MAX232I . . . D, DW, OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



description/ordering information

The MAX232 is a dual driver/receiver that includes a capacitive voltage generator to supply TIA/EIA-232-F voltage levels from a single 5-V supply. Each receiver converts TIA/EIA-232-F inputs to 5-V TTL/CMOS levels. These receivers have a typical threshold of 1.3 V, a typical hysteresis of 0.5 V, and can accept ± 30 -V inputs. Each driver converts TTL/CMOS input levels into TIA/EIA-232-F levels. The driver, receiver, and voltage-generator functions are available as cells in the Texas Instruments LinASIC™ library.

ORDERING INFORMATION

TA	PACKAGE†	ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	PDIP (N)	Tube of 25 MAX232N	MAX232N
	SOIC (D)	Tube of 40 MAX232D	MAX232
		Reel of 2500 MAX232DR	
	SOIC (DW)	Tube of 40 MAX232DW	MAX232
		Reel of 2000 MAX232DWR	
SOP (NS)	Reel of 2000 MAX232NSR	MAX232	
-40°C to 85°C	PDIP (N)	Tube of 25 MAX232IN	MAX232IN
	SOIC (D)	Tube of 40 MAX232D	MAX232I
		Reel of 2500 MAX232DR	
	SOIC (DW)	Tube of 40 MAX232DW	MAX232I
		Reel of 2000 MAX232DWR	

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package



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

LinASIC is a trademark of Texas Instruments.

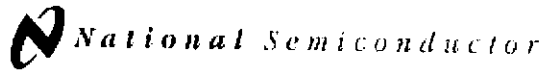
PRODUCTION DATA Information in this data sheet is subject to change without notice. It is not intended for use in life-critical applications. For more information on the terms of Texas Instruments' standard warranty, please refer to the Terms and Conditions of Sale in the latest issue of the Texas Instruments Product Line. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

POST OFF BOX 655307 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



December 1984

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805 8-Bit μ P Compatible A/D Converters

General Description

The ADC0801, ADC0802, ADC0803, ADC0804 and ADC0805 are CMOS 8-bit successive approximation A/D converters that use a differential potentiometric ladder—similar to the 250R products. These converters are designed to allow operation with the NSC800 and INS800A derivative control bus with TRI-STATE™ output latches directly driving the data bus. These A/Ds appear like memory locations or I/O ports to the microprocessor and no interfacing logic is needed.

Differential analog voltage inputs allow increasing the common-mode rejection and offsetting the analog zero input voltage value. In addition, the voltage reference input can be adjusted to allow encoding any smaller analog voltage span to the full 8 bits of resolution.

Features

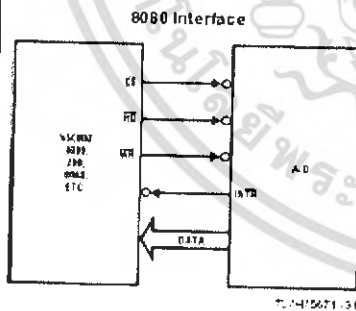
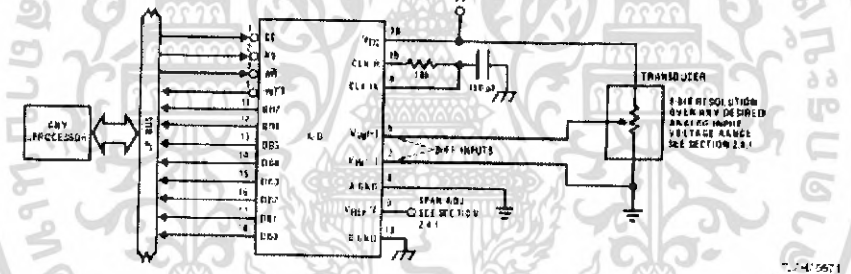
- Compatible with 8080 μ P derivatives—no interfacing logic needed - access time - 135 ns
- Easy interface to all microprocessors, or operates "stand alone"

- Differential analog voltage inputs
- Logic inputs and outputs meet both MOS and TTL voltage level specifications
- Works with 2.5V (LM339) voltage reference
- On-chip clock generator
- 0V to 5V analog input voltage range with single 5V supply
- No zero adjust required
- 0.3" standard width 20-pin DIP package
- 20-pin molded chip carrier or small outline package
- Operates automatically or with 5 V_{DC}, 2.5 V_{DC}, or analog span adjusted voltage reference

Key Specifications

- Resolution: 8 bits
- Total error: $\pm 1/2$ LSB, $\pm 1/2$ LSB and ± 1 LSB
- Conversion time: 100 μ s

Typical Applications



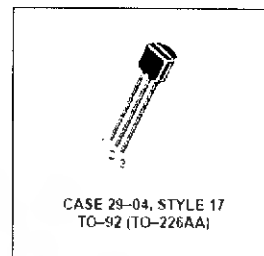
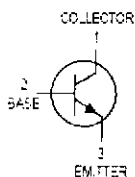
Error Specification (Includes Full-Scale, Zero Error, and Non-Linearity)			
Part Number	Full-Scale Adjusted	V _{REF} /2 - 2.500 V _{DC} (No Adjustments)	V _{REF} /2 - No Connection (No Adjustments)
ADC0801	$\pm 1/2$ LSB		
ADC0802		$\pm 1/2$ LSB	
ADC0803	$\pm 1/2$ LSB		
ADC0804		± 1 LSB	
ADC0805			± 1 LSB

™-STATE is a registered trademark of National Semiconductor Corp. TRI-STATE is a registered trademark of Intel Corp.

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805
8-Bit μ P Compatible A/D Converters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amplifier Transistors
 NPN Silicon

BC337,-16,-25,-40
BC338,-16,-25,-40

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC337	BC338	Unit
Collector-Emitter Voltage	V _{CEO}	45	25	Vdc
Collector-Base Voltage	V _{CBO}	50	20	Vdc
Emitter-Base Voltage	V _{EB0}	5.0		Vdc
Collector Current — Continuous	I _C	800		mAdc
Total Device Dissipation @ T _A = 25°C Derate above 25°C	P _D	625	5.0	mW/m ² WC
Total Device Dissipation @ T _C = 25°C Derate above 25°C	P _D	1.5	12	Watt m ² WC
Operating and Storage Junction Temperature Range	T _{J, stg}	-55 to +150		°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	R _{θJC}	23.3	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector-Emitter Breakdown Voltage I _C = 10 mA, I _B = 0;	BC337 BC338	V _{BR(CEO)}	45 25	—	Vdc
Collector-Emitter Breakdown Voltage I _C = 100 μA, I _E = 0;	BC337 BC338	V _{BR(CEB)}	50 20	—	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage I _E = 10 μA, I _C = 0;		V _{BR(EB0)}	5.0	—	Vdc
Collector Cutoff Current: V _{CE} = 30 V, I _E = 0; V _{CE} = 20 V, I _E = 0;	BC337 BC338	I _{CEO}	—	100 100	nAac
Collector Cutoff Current: V _{CE} = 45 V, I _{BE} = 0; V _{CE} = 25 V, I _{BE} = 0;	BC337 BC338	I _{CES}	—	100 100	nAac
Emitter Cutoff Current: V _{EB} = 4.0 V, I _C = 0;		I _{EB0}	—	100	nAac

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dual D-type flip-flop with set and reset; positive-edge trigger

74HC74; 74HCT74

FEATURES

- Wide supply voltage range from 2.0 to 6.0 V
- Symmetrical output impedance
- High noise immunity
- Low power dissipation
- Balanced propagation delays
- ESD protection:
HBM EIA/JESD22-A114-A exceeds 2000 V
MM EIA/JESD22-A115-A exceeds 200 V.

GENERAL DESCRIPTION

The 74HC/HCT74 is a high-speed Si-gate CMOS device and is pin compatible with low power Schottky TTL (LSTTL). They are specified in compliance with JEDEC standard no. 7A.

The 74HC/HCT74 are dual positive-edge triggered, D-type flip-flops with individual data (D) inputs, clock (CP) inputs, set (\overline{SD}) and reset (\overline{RD}) inputs, also complementary Q and \overline{Q} outputs.

The set and reset are asynchronous active LOW inputs and operate independently of the clock input. Information on the data input is transferred to the Q output on the LOW-to-HIGH transition of the clock pulse. The D inputs must be stable one set-up time prior to the LOW-to-HIGH clock transition for predictable operation.

Schmitt-trigger action in the clock input makes the circuit highly tolerant to slower clock rise and fall times.

QUICK REFERENCE DATA

GND = 0 V, $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_r = t_f = 6\text{ ns}$

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL		UNIT
			HC	HCT	
$t_{p-L\rightarrow FLH}$	propagation delay	$C_L = 15\text{ pF}$; $V_{CC} = 5\text{ V}$			
	nCP to nQ, n \overline{Q}		14	15	ns
	n \overline{SD} to nQ, n \overline{Q}		15	18	ns
	n \overline{RD} to nQ, n \overline{Q}		16	18	ns
f_{max}	maximum clock frequency		75	59	MHz
C_i	input capacitance		3.5	3.5	pF
C_{PD}	power dissipation capacitance per flip-flop	notes 1 and 2	24	29	pF

Notes

1. C_{PD} is used to determine the dynamic power dissipation (P_D in μW):

$$P_D = C_{PD} \times V_{CC}^2 \times f_i \times N + \sum (C_L \times V_{CC}^2 \times f_o)$$
where:
 f_i = input frequency in MHz;
 f_o = output frequency in MHz;
 C_L = output load capacitance in pF;
 V_{CC} = supply voltage in Volts;
 N = total load switching outputs;
 $\sum (C_L \times V_{CC}^2 \times f_o)$ = sum of the outputs.
2. For 74HC74 the condition is $V_i = \text{GND to } V_{CC}$
For 74HCT74 the condition is $V_i = \text{GND to } V_{CC} - 1.5\text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quad 2-input NAND gate

74HC00; 74HCT00

FEATURES

- Complies with JEDEC standard no. 8-1A
- ESD protection:
HBM EIA/JESD22-A114-A exceeds 2000 V
MM EIA/JESD22-A115-A exceeds 200 V
- Specified from -40 to $+85$ °C and -40 to $+125$ °C.

DESCRIPTION

The 74HC00/74HCT00 are high-speed Si-gate CMOS devices and are pin compatible with low power Schottky TTL (LSTTL). They are specified in compliance with JEDEC standard no. 7A.

The 74HC00/74HCT00 provide the 2-input NAND function.

QUICK REFERENCE DATA

GND = 0 V; T_{amb} = 25 °C; t_r = t_f = 6 ns.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL		UNIT
			74HC00	74HCT00	
t_{pHL}/t_{pLH}	propagation delay nA, nB to nY	$C_L = 15$ pF; $V_{CC} = 5$ V	7	10	ns
C_i	input capacitance		3.5	3.5	pF
C_{FD}	power dissipation capacitance per gate	notes 1 and 2	22	22	pF

Notes

1. C_{FD} is used to determine the dynamic power dissipation (P_D in μ W).

$$P_D = C_{FD} \cdot V_{CC}^2 \cdot f_i + N \cdot \Sigma(C_L \cdot V_{CC}^2 \cdot f_o) \text{ where}$$

f_i = input frequency in MHz;

f_o = output frequency in MHz;

C_L = output load capacitance in pF;

V_{CC} = supply voltage in Volts;

N = total load switching outputs;

$\Sigma(C_L \cdot V_{CC}^2 \cdot f_o)$ = sum of the outputs.

2. For 74HC00 the condition is $V_i =$ GND to V_{CC} .
For 74HCT00 the condition is $V_i =$ GND to $V_{CC} - 1.5$ V.

FUNCTION TABLE

See note 1.

INPUT		OUTPUT
nA	nB	nY
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Note

1. H = HIGH voltage level.
L = LOW voltage level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



71962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้