สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก
THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR

ชื่อนักศึกษา	1. นายนลิตร	ศรีสนาม	รหัสประจำตัว 39031312
	2. นายสมบัติ	พิทักษ์ชัยวัฒนา	รหัสประจำตัว 39031332
	3. นายสรศักดิ์	คุณเจตน์	รหัสประจำตัว 39031333
	4. นายอำนาจ	เกษศรีไพร	รหัสประจำตัว 39031342

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

1. อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี
2. อาจารย์วรวิทย์ สมหา
3. อาจารย์กิติพงศ์ มะโน

T030116

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์		ลายมือชื่อ
อาจารย์วรวิทย์	สมหา	....
อาจารย์ปิยะ	จิตธรรมมาภิรมย์	....
อาจารย์อำพล	ทองระอา	....
อาจารย์สุรพงษ์	สิริพงศ์ดี	....

วันเดือนที่สอบ วันที่ 14 ธันวาคม 2540 เวลา 13.00 น. ถึง 14.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

ภาควิชารับรอง

....

(ผศ.ศุภชัย เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่ ... เดือน ๑๑ พ.ศ. ๔๑

เลขหมู่......................
เลขทะเบียน......30116
วัน, เดือน, ปี 8 มี.ย. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก
THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR

นายนลิตร ศรีสนาม

นายสมบัติ พิทักษ์ชัยวัฒนา

นายสรศักดิ์ คุณเจตน์

นายอำนาจ เกษศรีไพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก

THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR

ผู้จัดทำ

1. นายนลิตร ศรีสนาม
2. นายสมบัติ พิทักษ์ชัยวัฒนา
3. นายสรศักดิ์ คุณเจตน์
4. นายอำนาจ เกษศรีไพร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม ....

(อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี)

ลงนาม ....

(อาจารย์วรวิทย์ สมหา)

ลงนาม ....

(อาจารย์กิตติพงค์ มะโน)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

ลงนาม ....

(ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก

THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
2. เพื่อศึกษาการใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบให้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น
3. เพื่อศึกษาการใช้วิธีการกระแสไหลวนในการทดสอบโลหะเหล็ก
4. เพื่อสร้างชุดต้นแบบเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก
5. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องต้นแบบให้มีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจวิธีการตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กโดยใช้วิธีการกระแสไหลวนได้
2. สามารถออกแบบเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กโดยใช้วิธีการกระแสไหลวนได้
3. สามารถสร้างเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กโดยใช้วิธีการกระแสไหลวนได้
4. สามารถใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบที่ลึกซึ้งได้
5. สามารถนำเครื่องต้นแบบไปประยุกต์ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก

นายนลิตร ศรีสนาม
นายสมบัติ พิทักษ์ชัยวัฒนา
นายสรศักดิ์ คุณเจตน์
นายอำนาจ เกษศรีไพร

อาจารย์ที่ปรึกษา
นายสุรพงษ์ สิริพงศ์ดี
นายวรวิทย์ สมหา
นายกิติพงค์ มะโน

ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการพัฒนาเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กโดยใช้หลักการกระแสไหลวน ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบหนึ่งที่อาศัยการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนให้เกิดขึ้นในเนื้องานของวัสดุที่ถูกตรวจสอบ ซึ่งกระแสไหลวนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น โดยสนามแม่เหล็กจากขดลวดภายในโพรบตรวจสอบ จากการตรวจสอบพบว่าหากชิ้นงานที่ถูกนำมาตรวจสอบมีรอยบกพร่องเกิดขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดภายในโพรบตรวจสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเป็นผลให้ขนาดและเฟสของสัญญาณที่โพรบตรวจสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นด้วย ซึ่งวิธีการดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นนี้ได้อ้างอิงมาจาก NASA LANGLEY RESEARCH CENTER และในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้ทฤษฎีดังกล่าวเพื่อสร้างโพรบตรวจสอบและเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก โดยนำผลของสัญญาณที่ได้จากโพรบตรวจสอบมาทำการประมวลผล เพื่อทำการแสดงผลทางจอเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR

MR.NALITR SRISANAM
MR.SOMBAT PITAKCHAIWATTANA
MR.SORRASAK KHUNJED
MR.AMNART KEDSRIPRAI

ADVISORS
MR.SURAPHONG SIRIPHONGDEE
MR.WORAWIT SOMHA
MR.KITIPONG MANO

1997

ABSTRACT

This thesis presents the developement of the ferro metal object crack and thickness detector.This project is non-destructive testing. An eddy current will be induced on the ferro metal object by the electromagnetic field from a coil in the testing probe. When the detector found any crack on the ferro metal , the impedance of coil in the testing probe will be changed. Consequently , amplitude and phase of signal will be changed too.The method refers to the research paper in THE NASA LANGLEY RESEARCH CENTER.This project applys this method to make the testing probe and the dectector.The result of the process will be display on a computer monitor and printer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น คณะผู้จัดทำขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสามท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงานทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และด้านซอฟต์แวร์ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สุดท้ายขอขอบคุณบุพการีที่ได้เลี้ยงดูให้ได้รับการศึกษาจนมีความสำเร็จในวันนี้คือ บิดาและ มารดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ขีดความสามารถของโครงงาน	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	3
2.2 พื้นฐานของการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	3
2.2.1 เครื่องมือพื้นฐาน	3
2.3 การเหนี่ยวนำกระแสไหลวน	6
2.4 คุณสมบัติของการไหลของกระแสไหลวน	8
2.5 อิมพีแดนซ์โพรบ	10
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของขดลวด โพรบกับคุณสมบัติของชิ้นงานที่ตรวจสอบ	13
2.7 เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	15
2.8 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว	17
2.9 การวิเคราะห์สัญญาณการตรวจสอบ	20
2.9.1 ผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตรวจสอบ	20
2.9.2 ลักษณะของสัญญาณเมื่อมีรอยบกพร่อง	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.9.3 ลักษณะของสัญญาณการเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนา	24
2.9.4 รอยบกพร่องสอบเทียบ	25
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	27
3.1 ฮาร์ดแวร์	27
3.1.1 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์	28
3.1.2 การออกแบบวงจรขับกระแส	29
3.1.3 การออกแบบโพรบตรวจสอบ	30
3.1.4 การออกแบบวงจรเฟสดีเทคเตอร์	32
3.1.5 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแรงดัน	33
3.1.6 การออกแบบวงจร RMS TO DC	34
3.1.7 การออกแบบวงจรขยายแรงดันผลต่าง	34
3.1.8 วงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	35
3.1.9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	37
3.2 ซอฟต์แวร์	38
3.2.1 ส่วนรับข้อมูลจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	38
3.2.2 ส่วนแสดงผล	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	40
4.1 การทดลองและทดสอบโพรบ	40
4.1.1 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง	40
4.2 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์	43
4.3 การทดลองทั้งระบบ	45
4.3.1 การทดลองใช้งานโปรแกรม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา	51
5.1 บทสรุป	51
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	52
5.3 แนวทางในการพัฒนา	52
ภาคผนวก ก ผังการทำงาน	54
ภาคผนวก ข โปรแกรม	65
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของอุปกรณ์	101
ภาคผนวก ง คู่มือการใช้งาน	134
บรรณานุกรม	144
ประวัติผู้แต่ง	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องมือพื้นฐาน	5
รูปที่ 2.2 ระบบการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	6
รูปที่ 2.3 การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่าง ๆ ในการไหลของกระแสไหลวน	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวของโพรบ	10
รูปที่ 2.6 โมเดลของขดลวดโพรบที่สัมพันธ์กับชิ้นงาน	11
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของขดลวดโพรบกับชิ้นงานตรวจสอบ	12
รูปที่ 2.8 กราฟอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ	13
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับคุณสมบัติชิ้นงาน	15
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบและหน้าที่หลักของเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	16
รูปที่ 2.11 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดา	17
รูปที่ 2.12 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ	18
รูปที่ 2.13 ผลของทิศทางต่อการตรวจจับของโพรบพื้นผิว	19
รูปที่ 2.14 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่ออิมพีแดนซ์	21
รูปที่ 2.15 ลักษณะของการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง	22
รูปที่ 2.16 ลักษณะของการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง	22
รูปที่ 2.17 ลักษณะสัญญาณจากการตรวจสอบรอยบกพร่องแบบต่างๆ	23
รูปที่ 2.18 สัญญาณจากรอยบกพร่องจริงและรอยบกพร่องสอบเทียบ	24
รูปที่ 2.19 ลักษณะของสัญญาณจากการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนาที่ความถี่ต่างกัน	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.20 มาตราการสอบเทียบ	26
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก	27
รูปที่ 3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์	28
รูปที่ 3.3 วงจรขับกระแส	30
รูปที่ 3.4 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง	31
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของโพรบแบบเซลนูลลิ่ง	31
รูปที่ 3.6 วงจรเฟสดีเทคเตอร์	32
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ	33
รูปที่ 3.8 วงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดี ซี	34
รูปที่ 3.9 วงจรขยายผลต่าง	35
รูปที่ 3.10 การทำงานของการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล	36
รูปที่ 3.11 การต่อสัญญาณจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล	37
รูปที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	38
รูปที่ 4.1 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง	40
รูปที่ 4.2 แผ่นโลหะเหล็กที่เป็นชิ้นงานทดสอบ	41
รูปที่ 4.3 การตรวจวัดหารอยบกพร่องของชิ้นงาน	42
รูปที่ 4.4 การทดลองลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ	43
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 1	44
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 2	44
รูปที่ 4.7 ผังการทำงานการทดลองทั้งระบบ	45
รูปที่ 4.8 ลักษณะหน้าจอหลังจากเรียกโปรแกรม	46
รูปที่ 4.9 การใช้งานเมนูเปิด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปภาพ หน้า

รูปที่ 4.10 การใช้เมนูย่อยของเมนูเปิด 47

รูปที่ 4.11 การใช้เมนูบันทึก 48

รูปที่ 4.12 การใช้งานฟังก์ชั่น ABOUT 49

รูปที่ 4.13 การใช้งานเมนูชนิดของโลหะ 49

รูปที่ 4.14 การตรวจวัดรอยบกพร่อง 50

รูปที่ 4.15 การตรวจวัดความหนา 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบที่ 1	42
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบที่ 2	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจำเป็นต้องมีการทดสอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อหาคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์และขบวนการผลิต ใช้ในการตรวจซ่อมบำรุงพัสดุหรือเครื่องมือต่างๆได้ สำหรับการทดสอบดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ การทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบแบบไม่ทำลาย เพราะข้อดีของวิธีนี้คือ จะไม่ทำให้วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเสียหาย และวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงอีกด้วย การทดสอบแบบไม่ทำลายมักจะใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบเช่น แสง ความร้อน ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามโครงสร้างที่ผิดปรกติของชิ้นงานทดสอบ การทดสอบแบบไม่ทำลายมีหลายวิธีเช่น การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing) การตรวจสอบโดยใช้วิธีวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก(Flux Leakage) การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current) ซึ่งการทดสอบทั้ง 3 วิธี มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การทดสอบด้วยสายตานั้นสะดวกไม่ต้องมีอุปกรณ์ประกอบแต่มีข้อด้อยอยู่ที่มีความล่าช้าและไม่สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องภายใต้ผิวได้ การตรวจสอบโดยวิธีวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็กนั้น เหมาะสำหรับการตรวจสอบโลหะชนิดที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับโลหะที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก ส่วนวิธีการทดสอบโดยใช้วิธีกระแสไหลวนเป็นวิธีที่สามารถใช้สำหรับตรวจรอยบกพร่องและความหนาของโลหะได้เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก เป็นต้น วิธีการดังกล่าวสามารถตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะได้ ดังนั้นกลุ่มผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญของประเด็นนี้ จึงทำโครงงานเรื่องเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก (THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR) ขึ้นมา ซึ่งเป็นการพัฒนาเครื่องตรวจหารอยบกพร่องของอลูมิเนียมโดยใช้วิธีกระแสไหลวน (THE ALUMINIUM OBJECT CRACK DETECTOR USING EDDY CURRENT) ที่มีอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ขีดความสามารถของโครงงาน

ในการตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กโดยใช้กระแสไหลวน ได้ออกแบบโดยใช้ส่วนของฮาร์ดแวร์ร่วมกับส่วนของซอฟต์แวร์เพื่อจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์และอำนวยความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องมีดังนี้

1. สามารถวัดรอยบกพร่องของโลหะเหล็กและอลูมิเนียมได้
2. สามารถบอกความแตกต่างของความหนาของโลหะเหล็กและอลูมิเนียมได้
3. สามารถตรวจหาโลหะเหล็กและอลูมิเนียมที่อยู่ภายในวัสดุที่ไม่เป็นโลหะได้
4. สามารถแสดงผลบนจอภาพของคอมพิวเตอร์และทางเครื่องพิมพ์ได้
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานวัดความหนาของโลหะเหล็กที่ซับซ้อนขึ้นไปได้

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้มีการรวบรวมข้อมูลรายละเอียดทั้งทฤษฎี หลักการทำงาน การออกแบบ การสร้างวงจรที่ใช้งาน และการจัดทำคู่มือการใช้งาน ซึ่งมีเนื้อหาโดยสังเขปของแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์ ขีดความสามารถของโครงงาน เนื้อหาโดยสังเขปของแต่ละบทและภาคผนวก

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ เป็นทฤษฎีพื้นฐานของการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน การเหนี่ยงนำของกระแสไหลวน คุณสมบัติของการไหลของกระแสไหลวน เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว การวิเคราะห์สัญญาณตรวจสอบและลักษณะของสัญญาณการเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนา

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง การทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์ดังนี้ วงจรกำเนิดความถี่หรือวงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขับกระแส โพรบตรวจสอบ วงจรเฟสดีเทคเตอร์ วงจรขยายแรงดัน วงจรอาร์เอมเอสทูดีซี วงจรขยายแรงดันผลต่าง วงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล และวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง การทำงานในส่วนของซอฟต์แวร์ดังนี้ โปรแกรมสำหรับการวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก และโปรแกรมสำหรับแสดงผลทางเครื่องพิมพ์และโปรแกรมสำหรับบันทึกข้อมูลที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง การทดลองและทดสอบโพรบ ผลการทดลองฮาร์ดแวร์และโปรแกรม

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและการพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงานและได้เสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

ในภาคผนวกแสดงรายละเอียดของโปรแกรม คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงงานและคู่มือการใช้งานดังนี้

ภาคผนวก ก ผังการทำงาน

ภาคผนวก ข โปรแกรม

ภาคผนวก ค คุณสมบัติของอุปกรณ์

ภาคผนวก ง คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Testing)

การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (ET) ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่อาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในเนื้อวัสดุที่ถูกตรวจสอบและการเฝ้าสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลวนกับลักษณะของเนื้อวัสดุกระแสไหลวนถูกเหนี่ยวนำ โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากขดลวดภายในโพรบตรวจสอบ (Testing Probe) และในขณะเดียวกันจะถูกตรวจวัดด้วยการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของขดลวดในโพรบตรวจสอบเนื่องจากการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนเกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสัมผัสระหว่างโพรบกับชิ้นงานโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบได้ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้า การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนเป็นเทคนิคที่ใช้ได้กว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับวัสดุบาง สำหรับวัสดุหนาการตรวจสอบมักกระทำเพื่อตรวจสอบชั้นพื้นผิวเท่านั้น นอกเหนือจากการตรวจสอบเพื่อหารอยบกพร่อง การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนสามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะทางกลและทางโลหะการ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กได้โดยทางอ้อม นอกจากนี้ผลกระทบทางรูปทรงเช่น ความหนา ความโค้งช่องว่างระหว่างโพรบกับชิ้นงาน ก็จะมีผลต่อการไหลหรือเหนี่ยวนำของกระแสไหลวนและสามารถตรวจวัดได้

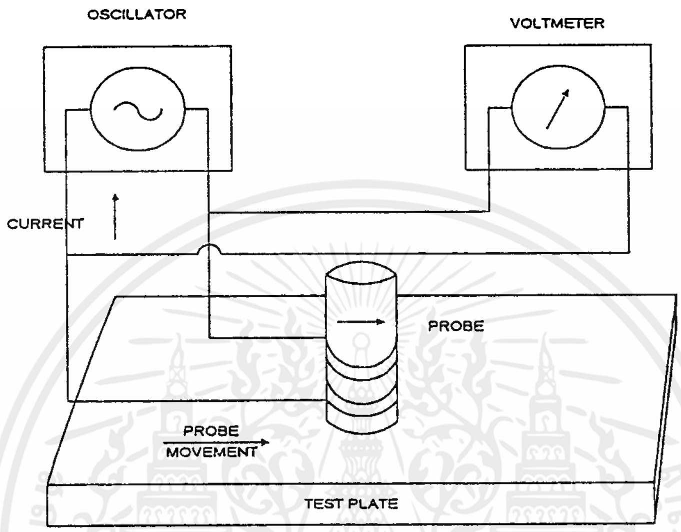
เนื่องจากมีตัวแปรสำคัญมากมายที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ซึ่งก็เป็นทั้งข้อดีและข้อเสียของเทคนิคนี้ เพราะพารามิเตอร์ที่ไม่สำคัญอาจจะรบกวนหรือบดบังข้อมูลที่สำคัญทำให้แปลผลการตรวจสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นตัวแปรทุกตัวที่มีผลกระทบต่อการไหลของกระแสไหลวนหรืออิมพีแดนซ์ของโพรบจะต้องนำมาพิจารณาเสมอ จึงทำให้การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนค่อนข้างซับซ้อนและต้องการการฝึกฝนและความชำนาญ

2.2 พื้นฐานของการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

2.2.1 เครื่องมือพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหรือออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) โพรบซึ่งมีขดลวดเชื่อมต่อกับออสซิลเลเตอร์และมีโวลท์มิเตอร์เพื่อใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2.1



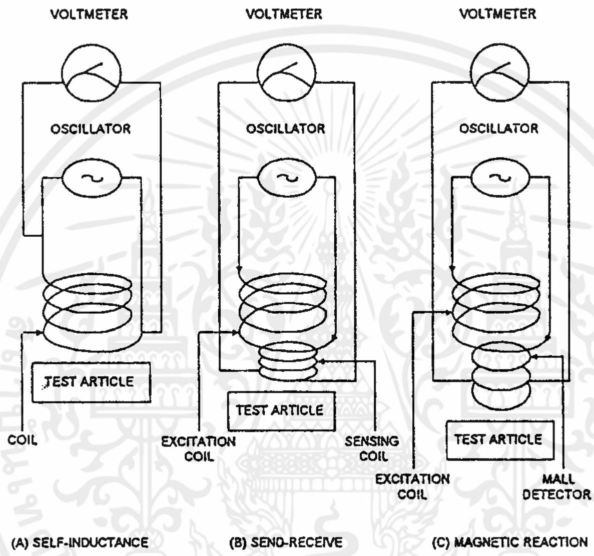
รูปที่ 2.1 เครื่องมือพื้นฐาน

ออสซิลเลเตอร์ควรจะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีความถี่ในช่วงจาก 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง2 กิโลเฮิรตซ์ และขดลวดของโพรบตรวจสอบเป็นเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนพันในรูปแบบที่เหมาะสมซึ่งทั้งขนาดเส้นลวด จำนวนรอบและเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดต่างก็เป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาเพื่อให้สามารถใช้ในภาวะตรวจสอบอย่างได้ผล ทั้งนี้ลักษณะการตรวจสอบทำให้โพรบอาจจะประกอบด้วยขดลวดเพียงขดเดียวหรือขดลวดกระตุ้น แยกกับขดลวดรับหรือมีขดลวดกระตุ้นกับตัวตรวจจับแบบ HALL ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่โวลต์มิเตอร์จะใช้วัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวด ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขคุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกตรวจสอบ หรือการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างขดลวดกับวัสดุที่ถูกตรวจสอบ โดยที่การเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้านี้จะประกอบด้วยการเปลี่ยนแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) เทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด

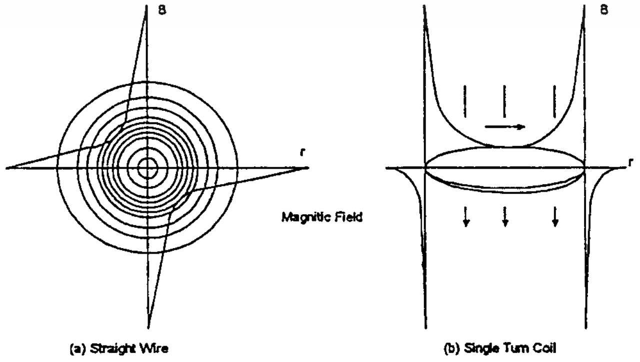
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเหนี่ยวนำกระแสไหลวน

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) รอบๆ ตัวนำ ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (Magnetic Flux Density) ภายในสนามแม่เหล็กจะขึ้นกับตำแหน่งและกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla :T) หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber/m^2 :Wb/m^2) ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ระบบการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนแบบต่างๆ



รูปที่ 2.3 การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรไฟฟ้าใดๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรปฐมภูมิสามารถเขียนได้ในเทอมของแรงดันไฟฟ้า Vp และอิมพีแดนซ์ Zp ของวงจรปฐมภูมิ

$$Ip = Vp/Zp \tag{2.1}$$

ซึ่ง Zp ประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Resistance) R และรีแอกแตนซ์ (Reactance) จากการเหนี่ยวนำของขดลวด $X_L = 2\pi fL$ เมื่อ f คือความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ Hz และ L คือค่าความเหนี่ยวนำหน่วยเฮนรี H ซึ่งอิมพีแดนซ์จะเป็นปริมาณเชิงซ้อน

$$Z_P = R+iX_L \tag{2.2}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนภายในโพรบ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรปฐมภูมิ จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์

$$I_P = I_o\sin(\omega t) \tag{2.3}$$

โดยที่ I_o คือค่ากระแสสูงสุดหน่วยแอมแปร์ A และ

$$\omega = 2\pi f \tag{2.4}$$

เป็นความถี่หน่วยเรเดียนต่อวินาที Rad/s

เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็ก ϕp เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดเป็นสัดส่วนกับกระแส Ip และจำนวนรอบของขดลวด Np

$$\phi \alpha NpIp \tag{2.5}$$

เนื่องจากกระแส Ip เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาก็ทำให้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ Vs ตามกฎของฟาราเดย์คือ

$$Vs = -Np\frac{d\varnothing p}{dt} \tag{2.6}$$

เมื่อ $\frac{d\varnothing p}{dt}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลง ∅p เทียบกับเวลา

เนื่องจากกระแส Ip เปลี่ยนแปลงแบบคลื่นซายน์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นซายน์ด้วย

$$\varnothing = \varnothing_0 \text{Sin}(\omega t) \tag{2.7}$$

เมื่อ $\varnothing_0$ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่คู่กับกระแส I_0 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำมีค่าเป็น

$$Vs = -Np\, \omega \varnothing_0 \text{Cos}(\omega t) \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำขดลวดของโพรบเข้าใกล้ชิ้นงานที่จะตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ Is ไหลในชิ้นงาน

$$Is = Vs/Zs \quad (2.9)$$

เมื่อ Zs คือ อิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ Is นี้ถูกเรียกว่า กระแสไหลวน(Eddy Current) เนื่องจากลักษณะการไหลที่เป็นวงกลมซึ่งกระแสไหลวนนี้จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กทุติยภูมิมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก

$$\varnothing s \ \alpha \ (-Is) \quad (2.10)$$

ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาพสมดุลย์รอบๆขดลวดเมื่อมีชิ้นงานอยู่ใกล้ๆ

$$\varnothing_E = \varnothing_P - \varnothing_S \quad (2.11)$$

ซึ่งการไหลของกระแสไหลวนจะยังผลให้เกิดการสูญเสียความต้านทานและทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ลดลง

$$Z \ \alpha \ \varnothing_E \quad (2.12)$$

$$V = ZIp \quad (2.13)$$

ซึ่งแสดงว่า อิมพีแดนซ์ของขดลวดของโพรบเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกควบคุมโดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงาน ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของโพรบและคุณสมบัติของชิ้นงานจะได้กล่าวถึงในตอนต่อไป

2.4 คุณสมบัติของการไหลของกระแสไหลวน

กระแสไหลวนเป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำให้ไหลเป็นวงกลม ในระนาบตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งตามปกติมักจะไหลขนานกับขดลวดและพื้นผิวภายในของขอบเขตของสนามแม่เหล็กความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบทั้งคุณสมบัติความนำไฟฟ้าและการซึมซาบของแม่เหล็กชิ้นงานจะเป็นตัวกำหนดความลึกของการเหนี่ยวนำกระแสในชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากว่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงตามความลึกจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Skin Effect”

การหาคำตอบของสมการสำหรับควบคุมการไหลของกระแสไหลวน สำหรับตัวนำที่มีความหนาแบบ Semi-Infinite ได้คำตอบอยู่ในรูปแบบ

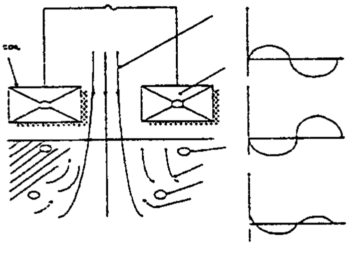
$$Jx/Jo = e^{-\beta}Sin(\omega t - \beta) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Jx/Jo คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ความลึก X ต่อค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงานและมุมเฟส β= X/δ เรเดียน (Radian) โดยที่ความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม (Standard Depth Of Penetration) δ มีค่า

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{p\, fms}} = 50\sqrt{\frac{r}{fm\, r}} \qquad \text{mm} \qquad (2.15)$$

เมื่อ δ คือ ความนำไฟฟ้า (Conductivity) หน่วยโมห์ (mho)μ คือ ความซึมซาบได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) หน่วยเฮนรีต่อเมตร (H/m) ρ คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หน่วยไมโครโอห์ม - เซนติเมตร (μΩ- cm) μr คือ ความซึมซาบได้ของแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability) ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะมีค่าสูงสุดที่ผิวชิ้นงานและลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลขึ้นกับค่าความลึกที่ระยะความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม δ โดยที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงเหลือเพียง 37 % ซึ่งที่ความลึกมากกว่า 3δ จะถือว่าไม่มีกระแสไหลวน ดังนั้นจึงใช้การปรับค่าความถี่เพื่อกำหนดความลึกของการแทรกซึมที่ต้องการค่ากำหนดกันทั่วไป คือความลึกที่หวังผลในการแทรกซึม (Effective Depth Of Penetration) ซึ่งเป็นความลึกที่ความหนาแน่นของกระแสไหลวนมีค่า 5% ของค่าที่ผิว นอกจากความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงตามระยะลึกแล้ว กระแสไหลวนยังมีเฟสช้าลงตามระยะลึกอีกด้วย ซึ่งเฟสจะช้าลงเป็นฟังก์ชั่นเส้นตรงตามระยะลึกดังแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่างๆ ในรูปที่ 2.4 เฟสที่ช้าลงของกระแสไหลวนตามระดับความลึกเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ทำให้การทดสอบด้วยกระแสไหลวนสามารถที่จะตรวจสอบคุณสมบัติได้หลายอย่างทั้งนี้เนื่องจากว่า สัญญาณที่เกิดจากรอยบกพร่องจะมีการเปลี่ยนทั้งแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งมุมเฟสที่ความลึก 1δ มีค่าประมาณ57 องศา



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่างๆ ในการไหลของกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 อิมพีแดนซ์ของโพรบ

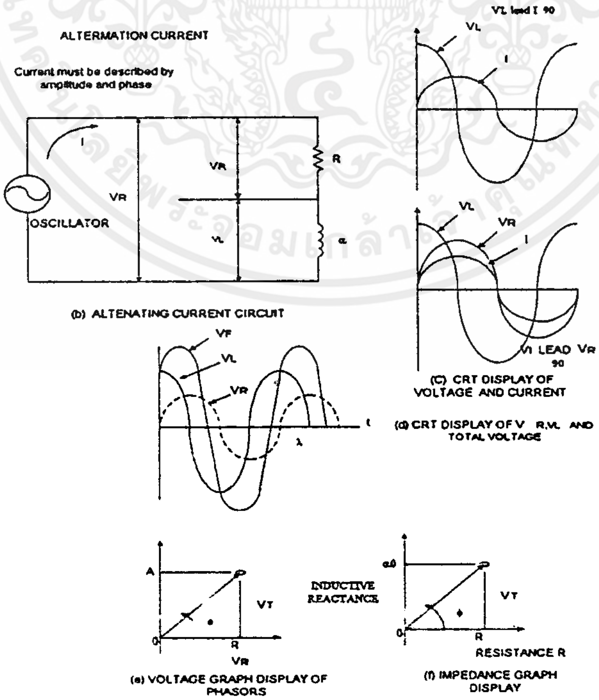
ขดลวดของโพรบมีอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน $Z = R + iX_L$ เมื่อนำไปวิเคราะห์ในวงจรปฐมภูมิที่เป็นวงจรกระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า V_R คร่อมความต้านทาน R จะมีเฟส ตรงกับกระแสที่ไหล แต่แรงดันไฟฟ้า V_L ที่คร่อมอินดักเตอร์ L จะมีเฟสนำกระแสที่ไหลอยู่ 90 องศา โดยใช้กระแสเป็นหลักแรงดันไฟฟ้ารวม V_T จะมีเฟสนำกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าอยู่ 90 องศา

$$V_T = V_R+iV_L = IR+iIX_L = I(R+i\omega L) \quad (2.16)$$

และ

$$\varnothing = \tan^{-1}\frac{V_L}{V_R} = \tan^{-1}\frac{X_L}{R} = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} \quad (2.17)$$

ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 โดยที่รูปที่ 2.5 (e) คือ แผนรูปภาพเฟสเซอร์ (phasor) ของแรงดันไฟฟ้า และรูปที่ 2.5(f) คือแผนภาพเฟสเซอร์ของอิมพีแดนซ์ของโพรบทั้งนี้ความยาวของเวกเตอร์ OP คือขนาดของอิมพีแดนซ์



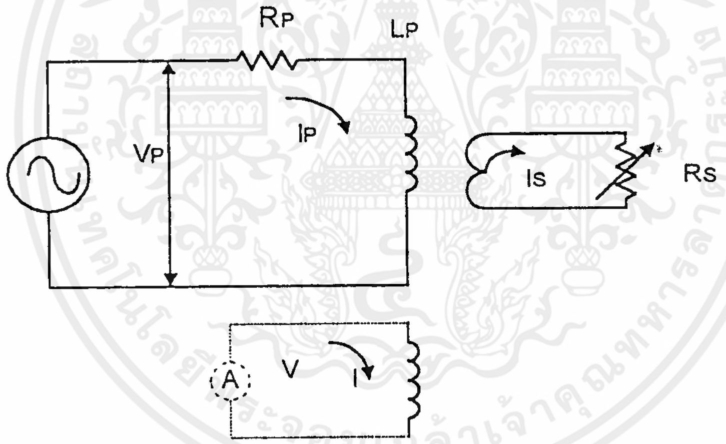
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำของโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \Omega \tag{2.18}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำ ก็จะทำให้ตำแหน่งจุดปลายของเวกเตอร์ OP (จุดทำงาน Operating Point) เปลี่ยนไป

ขดลวดของโพรบตรวจสอบ เมื่อนำมาใกล้ชิ้นงานสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง (Transformer) และจะเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในชิ้นงาน ซึ่งเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิที่มีเพียงหนึ่งรอบกระแสไหลวนจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งต้านกับสนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งมีวิธีการที่ใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดปฐมภูมิและวิธีการรับส่ง ซึ่งใช้ขดลวดสองขดโดยที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำจากขดลวดตัวส่งจะถูกเฝ้าตรวจจากแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดตัวรับขดที่สอง ดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โมเดลของขดลวดโพรบที่สัมพันธ์กับชิ้นงานตรวจสอบ

วงจรหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดของโพรบ) และขดลวดทุติยภูมิ (ชิ้นงานตรวจสอบ) ดังรูปที่ 2.7(a) สามารถทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น โดยการศึกษาจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ซึ่งโหลดของวงจรทุติยภูมิจะแสดงอยู่ในลักษณะของโหลดค่าความต้านทานขนานที่ต่อกับรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำของขดลวดโพรบดังรูปที่ 2.7(b) วงจรนี้เป็นโมเดลโดยประมาณของขดลวดโพรบเมื่ออยู่ใกล้ตัวนำไฟฟ้า โดยสมมุติว่าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจากขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับชิ้นงานที่ตรวจสอบอย่างสมบูรณ์ และยังสมมุติอีกว่า

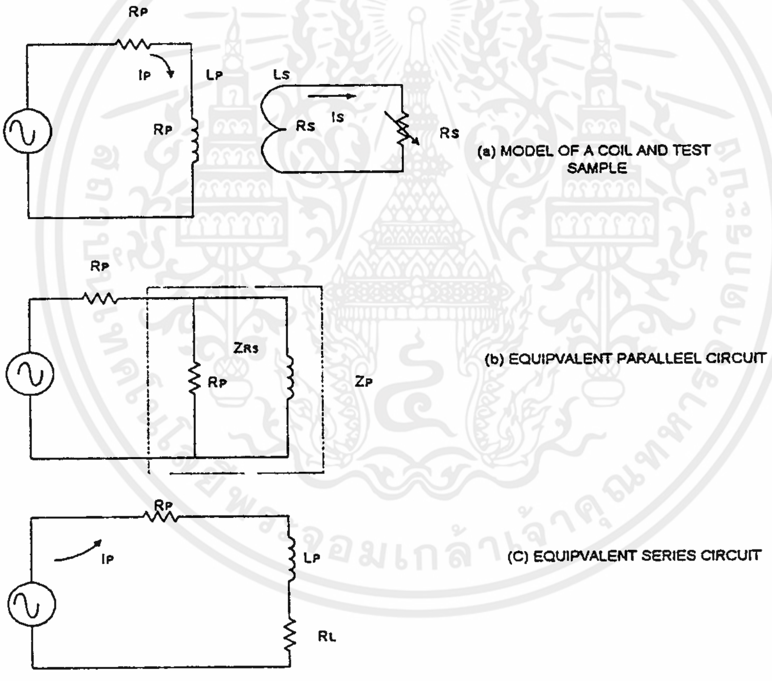
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีการตัดทอนจาก "Skin Effect" หรือไม่มีเฟสแตกต่างกันตลอดความหนาของชิ้นงานซึ่งค่าโหลดความต้านทานทุติยภูมิ Rs ถูกถ่ายโอนไปยังวงจรปฐมภูมิโดยอัตราส่วนของจำนวนขดยกกำลังสอง $(Np/Ns)^2$ และ Ns=1 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแบบขนานมีค่า

$$Z = \frac{(Np^2 Rs)(iXo)}{Np^2 Rs + iXo} \tag{2.19}$$

เมื่อ $Xo = \omega Lo$ คือ รีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำในอากาศ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้ยังสามารถแปลงสภาพต่อไปเป็น

$$Zp = \frac{Np^2 Rs^2 Xo^2}{(Np^2 Rs)^2 + Xo^2} + i\frac{(Np^2 Rs)^2 Xo}{(Np^2 Rs)^2 + Xo} \tag{2.20}$$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของขดลวดโพรบกับชิ้นงานตรวจสอบ

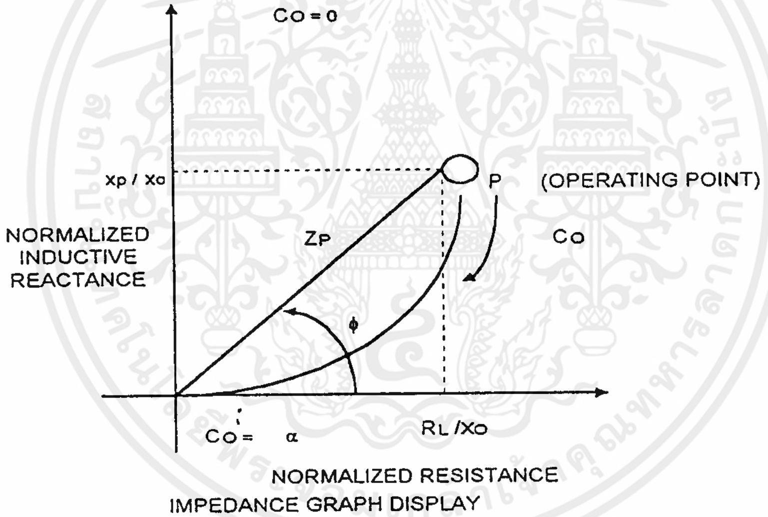
ซึ่งสามารถพิจารณาในลักษณะของวงจรอนุกรม โดยมีความต้านทาน R_L และรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำ X_L นั่นเอง ดังนั้นวงจรอนุกรมในรูปที่ 2.7(c) จึงสมมูลกับวงจรขนานในรูปที่ 2.7(b) ซึ่งใช้แทนอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบได้สำหรับโพรบและเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนที่เงื่อนไขการตรวจสอบแต่ละชุดจะมีค่าคงที่ต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอบในเงื่อนไขต่างๆ สามารถเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นจึงต้องทำให้อิมพีแดนซ์เป็นบรรทัดฐานเทียบกับ Xo นั่นคือ

$$\frac{Zp}{Xo} = \frac{(\frac{Xo}{Np^2 Rs})}{1+(\frac{Xo}{Np^2 Rs})^2} + i\frac{1}{1+(\frac{Xo}{Np^2 Rs})^2} \qquad (2.21)$$

จะพบว่า ทางเดินของนอร์แมลไลซ์อิมพีแดนซ์ (Normalized Impedance) มีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ Xp/Xo = 1/2 และ R_L/Xo = 0 และมีรัศมีเท่ากับ 1/2 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แผนภาพทางเดินของอิมพีแดนซ์จะแสดงให้เห็นถึงค่าความสัมพันธ์ของคุณลักษณะของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.8 กราฟอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบกับคุณสมบัติของชิ้นงานที่ตรวจสอบ

ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการตรวจสอบอิมพีแดนซ์ของโพรบสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ Zp ของวงจรสมมูล ถ้าพารามิเตอร์ใดทำให้เทอมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo/N^2pRs มีค่าเพิ่มขึ้นจุดทำงานหรือตำแหน่งบนแผนภาพอิมพีแดนซ์จะเคลื่อนที่ตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์และถ้าพารามิเตอร์ใดทำให้เทอม Xo/N^2pRs มีค่าลดลงจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งของอิมพีแดนซ์ ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีประโยชน์ในเชิงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งอาจสรุปได้โดยการแปรค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ก) เพิ่มความต้านทานของชิ้นงาน R ทำให้เทอม Xo/N^2pRs ลดลง ดังนั้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.9(a)

ก.1 เนื่องจาก $Rs = \rho l/A$ เมื่อ l คือระยะทางการไหลของกระแสไหลวนและ A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแส ดังนั้น ρ = Constant X Rs นั่นคือ ถ้าค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์และถ้าเป็นความนำไฟฟ้าก็จะเป็นไปในทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.9(a)

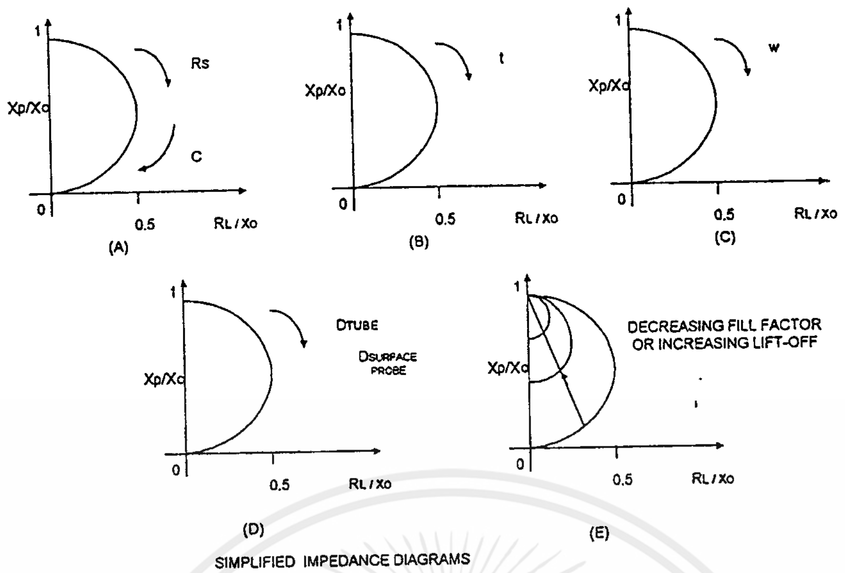
ก.2 สำหรับท่อผนังบางหรือโลหะความหนา t ซึ่ง $Rs = \rho l/A = \rho\pi D/tw$ เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบหรือท่อ และ w คือ ความกว้างของขดลวดจะได้ว่า Rs = Constant/t ดังนั้นถ้าความหนาเพิ่มขึ้นจุดทำงานจะเคลื่อนลงตามเส้นโค้งของอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.9(b)

ข) เพิ่มความถี่ในการตรวจสอบเทอม $Xo/N^2pRs = \omega Lo/N^2pRs$ จะเพิ่มขึ้นดังนั้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ลงตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.9(c)

ค) เพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางลวดโพรบหรือเส้นผ่านศูนย์ท่อเนื่องจาก $Lo = Constant/xD^2$ และ Rs = Constant xD ดังนั้น $\omega Lo/N^2pRs$ = Constant xD จะเพิ่มขึ้นนั่นคือจุดทำงานจะเคลื่อนที่ลงตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.9(d)

ง) ถ้าการเชื่อมต่อทางเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างโพรบกับชิ้นงานที่ตรวจสอบลดลง ซึ่งอาจจะเกิดจากระยะห่างของโพรบกับชิ้นงานมากขึ้น หรืออัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดโพรบ (โพรบอยู่ภายใน) หรืออัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดโพรบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (Fill Factor) ลดลงโดยขนาดของทางเดินอิมพีแดนซ์ครึ่งวงกลมจะมีขนาดเล็กลง เมื่อ Xo/N^2pRs เพิ่มจากศูนย์สู่อนันต์ดังรูปที่ 2.9(e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



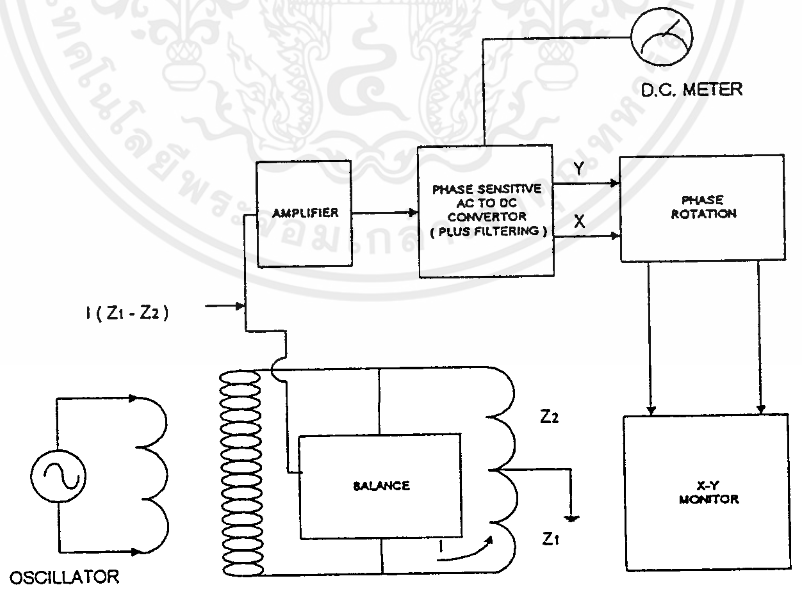
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับคุณสมบัติชิ้นงาน

2.7 เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

ขณะที่ข้อมูลทั้งหมดที่เกี่ยวกับชิ้นงานที่ตรวจสอบถูกส่งผ่านไปยังขดลวดโพรบ โดยการเปลี่ยนของสนามแม่เหล็กรอบๆโพรบ ถ้ารักษาไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิให้คงที่สม่ำเสมอการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบก็สามารถตรวจวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดโพรบได้ ($V_p = I_pZ_p$) ในการตรวจสอบส่วนมากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบหรือแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดโพรบมีค่าน้อยมากในขณะที่โพรบเคลื่อนผ่านรอยบกพร่อง ซึ่งโดยปกติทั่วๆ ไปการเปลี่ยนแปลงจะน้อยกว่า 1% ปริมาณการเปลี่ยนแปลงน้อยนี้จะยากต่อการตรวจจับถ้าวัดขนาดจริงของอิมพีแดนซ์หรือแรงดันไฟฟ้าดังนั้นจึงใช้หลักการของวงจรบริดจ์ (AC Bridge) ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นบริดจ์วงจรกระแสสลับโดยมีแขนของบริดจ์เป็นอิมพีแดนซ์แทนที่จะเป็นความต้านทานอย่างเดียว เมื่อปรับให้บริดจ์สมดุลย์แล้ว นั่นคือแรงดันไฟฟ้าคร่อมโวลท์มิเตอร์เป็นศูนย์ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ หรือแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดโพรบแม้แต่เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้บริดจ์ไม่สมดุลย์และสามารถตรวจจับได้เมื่อเทียบกับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบและหน้าที่หลักของเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) จะจ่ายกระแสไฟฟ้ารูปซายน์ตามความถี่ที่กำหนดไว้ไหลผ่านขดลวดโพรบและขดลวดอ้างอิง เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของขดลวดทั้งสองเป็นศูนย์ เมื่อมีรอยบกพร่องอยู่ใกล้กับขดลวดโพรบก็จะทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบเปลี่ยนไปจะเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุลย์ขนาดเล็กๆ ซึ่งจะถูกขยายสัญญาณโดยวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปซายน์ที่ไม่สมดุลย์จะยุ่งยากต่อการวิเคราะห์จึงต้องเปลี่ยนเป็นกระแสตรงโดยรักษาแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณกระแสสลับไว้ซึ่งทำโดยการแยกเป็นองค์ประกอบตั้งฉาก (Quadrature Components) สองส่วนของกระแสสลับแล้วเรียงกระแสโดยคงสภาพที่เหมาะสมไว้ และเพื่อลดสัญญาณรบกวนของเครื่องมืออาจจะเพิ่มวงจรกรอง (Filter) สำหรับสัญญาณขาออกสัญญาณอาจจะแสดงเฉพาะแอมพลิจูดโดยใช้มิเตอร์หรือโดยทั่วไปสัญญาณทั้งสองส่วนจะแสดงบนจอภาพ x-y ในรูปของอิมพีแดนซ์ของกราฟทั้งนี้โดยผ่านวงจรควบคุมการเลื่อนเฟสเพื่อให้รีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำเป็นแกนแนวดิ่ง (+y) และความต้านทานเป็นแกนแนวราบ (+x)



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบและหน้าที่หลักของเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

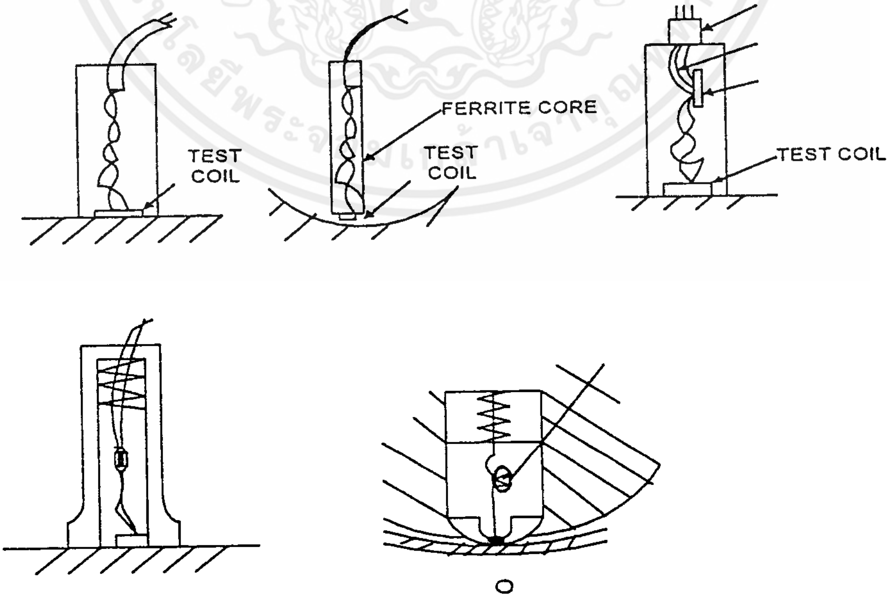
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.8 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว (Surface Probes)

โพรบที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนมีหน้าที่สำคัญสองประการ ได้แก่ เหนี่ยวนำกระแสไหลวนและตรวจจับการบิดเบี้ยวของการไหลของกระแสไหลวนซึ่งเกิดจากรอยบกพร่องต่างๆ ความไวในการตรวจจับรอยบกพร่องและตัวแปรอื่นๆ อาจจะกระทบกระเทือนโดยการเลือกใช้โพรบ โพรบที่พบเห็นโดยทั่วไปคือโพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว ซึ่งอาจเป็นพื้นผิวแบนหรือพื้นผิวโค้ง โดยที่รอยบกพร่องอาจจะเป็นได้ทั้งรอยบกพร่องที่ผิว หรือรอยบกพร่องที่อยู่ภายใน (ซึ่งลึกจากผิวไม่มากนัก)

โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดาจะมีขดลวดหนึ่งหรือสองขด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โพรบที่มีขดลวดเพียงขดเดียวจะต้องหาขดลวดขดที่สองมาใช้ช่วยทำให้วงจรบริดจ์สมดุลย์ ดังนั้นโพรบโดยส่วนมากจะเป็นแบบขดลวดสองขด ซึ่งแบ่งเป็นสองอย่างคือโพรบสมบูรณ์ (Absolute Probe) ซึ่งขดลวดเพียงขดเดียวถูกใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนของชิ้นงานตรวจสอบ โดยขดลวดขดที่สองถูกวางห่างจากชิ้นงานตรวจสอบอย่างเพียงพอในขณะที่โพรบดิฟเฟอร์เรนเชียล (Differential Probe) จะใช้ขดลวดทั้งสองในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตรวจสอบเช่นรูปที่ 2.11(b) มีการเสริมแกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ให้ขดลวด

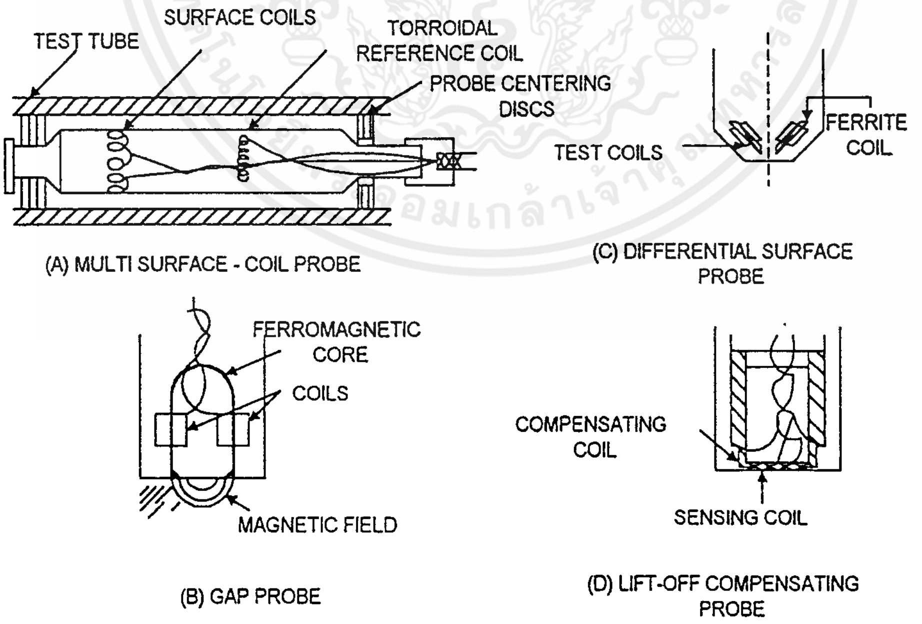


รูปที่ 2.11 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
30116

และมีพื้นที่ในการสัมผัสน้อยลงรูปที่ 2.11(c) และ (e) ซึ่งขดลวดขดที่สองเป็นตัวเปรียบเทียบ จะมีชิ้นโลหะที่เป็นวัสดุชนิดกับชิ้นงานที่จะตรวจสอบเพื่อให้อิมพีแดนซ์สัมพัทธ์ระหว่างขดลวดทั้งสองไม่ขึ้นกับความถี่ที่ใช้ตรวจสอบ และเพื่อให้สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องที่ไม่สามารถใช้ในโพรบแบบธรรมดาตรวจจับได้หรือลดผลกระทบของการแปรเปลี่ยนของเนื้อวัสดุหรือการเชื่อมต่อทางสนามแม่เหล็กระหว่างโพรบกับชิ้นงาน (Life Off) ก็จะต้องใช้โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ เช่นดังรูป2.12

จากลักษณะของโพรบที่มีขดลวดวางขนานกับพื้นผิวที่จะตรวจสอบ ดังนั้นกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีทิศทางการไหลขนานกับขดลวดหรือพื้นผิวนั่นเอง ซึ่งจะทำให้โพรบตรวจสอบพื้นผิวโดยทั่วไปไม่ไวต่อรอยบกพร่องที่ขนานกับพื้นผิวเช่น การเคลือบที่ไม่ดี รอยแยก (Lamination) นอกจากนี้เนื่องจากขดลวดมีลักษณะเป็นวงแหวนทำให้กระแสไหลวนไหลเป็นปริมาณมากบริเวณใต้ขดลวดจึงทำให้ตำแหน่งบางตำแหน่งของรอยบกพร่องเมื่อเทียบกับขดลวดโพรบมีผลต่อการตรวจจับ ดังในรูปที่ 2.13(b) เมื่อรอยร้าวที่อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของขดลวดความไวในการตรวจจับจะน้อยมาก

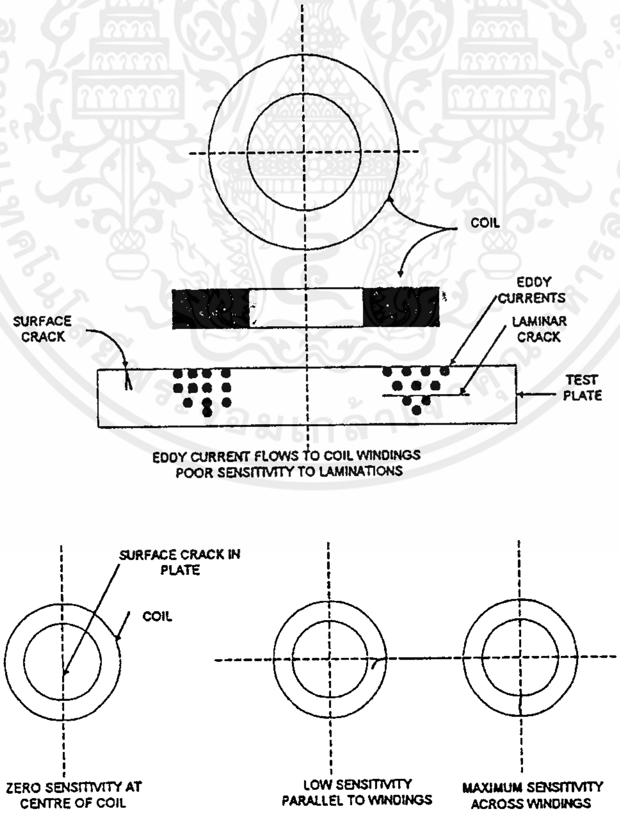


รูปที่ 2.12 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากที่จุดศูนย์กลางจะไม่มีสนามแม่เหล็ก และถ้าแนวของรอยร้าวในอยู่แนวเดียวกับการไหลของกระแสไหลวนก็จะทำให้ความไวในการตรวจจับน้อยกว่าเมื่อรอยร้าวขวางแนวการไหลของกระแสไหลวนเป็นต้น ดังรูปที่ 2.13(c) และ (d)

พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความไวในการตรวจจับความบกพร่องได้แก่ ระยะห่างของโพรบกับชิ้นงาน (Life Off) ถ้าโพรบห่างจากชิ้นงานมากความไวจะลดลง เนื่องจากการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กลดลงและระดับลึกของรอยบกพร่องภายใน (Subsurface Detect) ยิ่งลึกจากผิวมากขึ้นความไวจะลดลง เนื่องจากผลของ Skin Effect ที่ทำให้กระแสไหลวนลดลงตามความลึกตลอดจนค่าความยาวของรอยบกพร่อง ซึ่งโดยๆ ทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหวังผลของโพรบ (Effective Diameter) ควรเท่ากับหรือเล็กกว่าความยาวของรอยบกพร่อง ($D_{eff} = D_{coil}+4\delta$)



รูปที่ 2.13 ผลของทิศทางต่อการตรวจจับของโพรบพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวิเคราะห์สัญญาณการตรวจสอบ

2.9.1 ผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตรวจสอบ

เนื่องจากมีพารามิเตอร์จำนวนมากที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลวน หรืออิมพีแดนซ์ของโพรบ จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะของผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขในการตรวจสอบที่เหมาะสมและการวิเคราะห์สัญญาณ

ความต้านทาน

ดังแสดงในรูปที่ 2.14(a) เมื่อความต้านทานเพิ่มขึ้นจุดระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงานตรวจสอบ (Life Off) ซึ่งจะทำให้ขนาดของรัศมีวงกลมเล็กลง

ความซึมซาบได้ของแม่เหล็ก

ดังแสดงในรูปที่ 2.14(b) พารามิเตอร์นี้มีผลกระทบอย่างมากต่ออิมพีแดนซ์ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ความหนาของชิ้นงาน

ดังแสดงในรูปที่ 2.14(c) เมื่อความหนาของชิ้นงานลดลง ทำให้เกิดความต้านทานต่อการไหลของกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจุดอิมพีแดนซ์จะเลื่อนขึ้นไปด้านบนแต่มีลักษณะที่เบี่ยงเบนไปจากแนวกราฟอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงความต้านทานโดยตรง (เส้นประ) ทั้งนี้เนื่องมาจาก Skin Effect และเฟสที่ช้าลง

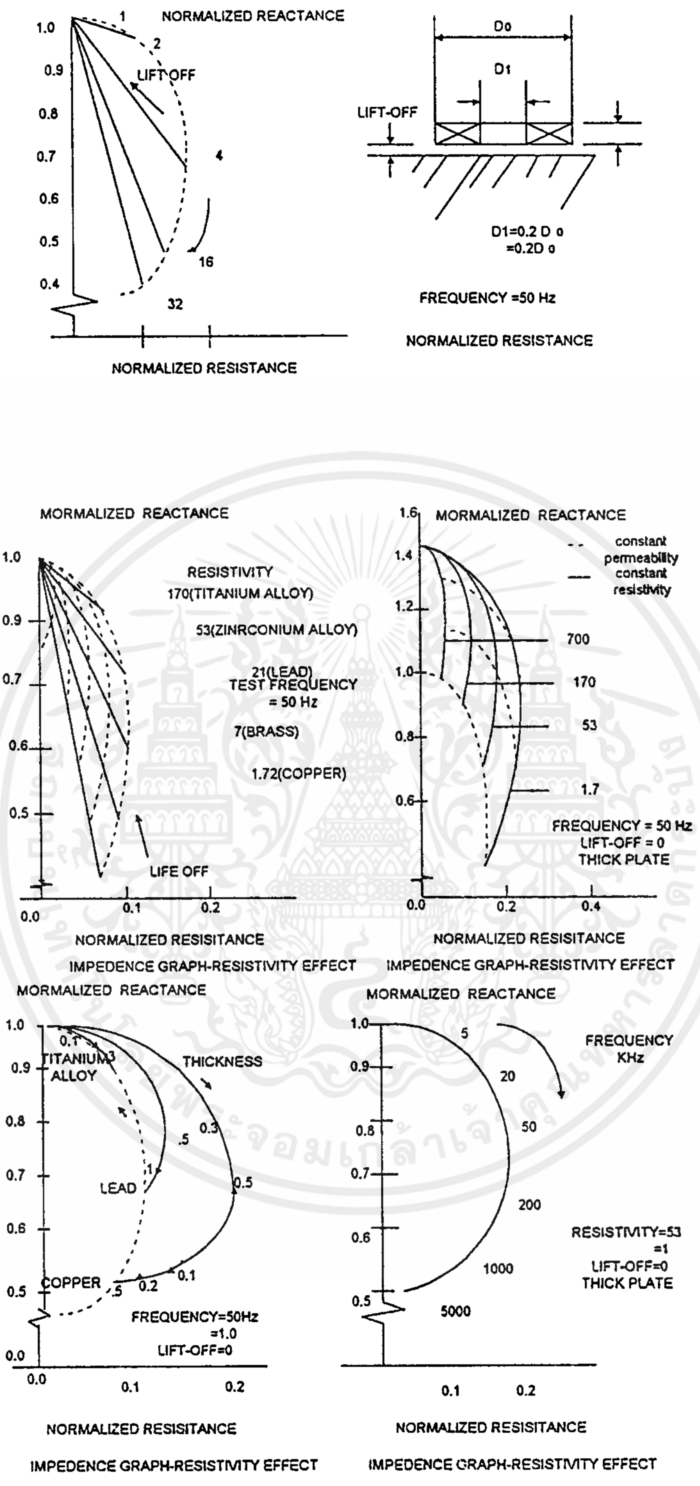
ความถี่ในการตรวจสอบ

ดังแสดงในรูปที่ 2.14(d) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกระแสไหลวนจะถูกเหนี่ยวนำได้เฉพาะที่บริเวณใกล้ๆผิวทำให้เสมือนกับว่าความต้านทานในชิ้นงานลดลงดังนั้นจุดอิมพีแดนซ์จะเลื่อนลงด้านล่าง

เส้นผ่านศูนย์ขดลวดโพรบ

ดังแสดงในรูปที่ 2.14(e) การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดโพรบจะเลื่อนจุดอิมพีแดนซ์ลงด้านล่างทั้งนี้ดังความสัมพันธ์ในหัวข้อ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

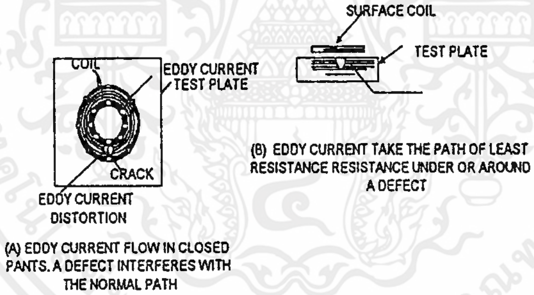


รูปที่ 2.14 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่ออิมพีแดนซ์

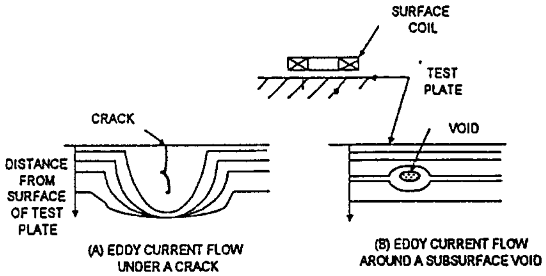
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ลักษณะของสัญญาณเมื่อมีรอยบกพร่อง

รอยบกพร่องซึ่งขัดขวางการไหลของกระแสไหลวน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของโพรบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตรวจโพรบผ่านรอยบกพร่องนั้นๆ ลักษณะเช่นนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งกระแสไหลวนจะต้องไหลอ้อมหรือลดลงลอดใต้รอยบกพร่องนั้นๆ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าของความต้านทานต่อการไหลของกระแสไหลวนนั้นเอง เนื่องจากกระแสไหลวนจะพยายามเลือกทางเดินที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ดังนั้นถ้ารอยบกพร่องที่พื้นผิวมีความลึกระดับเดียวกันกับรอยบกพร่องภายใน รอยบกพร่องที่พื้นผิวจะทำให้กระแสไหลวนต้องเปลี่ยนแปลงทางเดินได้มากกว่ารอยบกพร่องภายใน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะมีค่ามากที่ผิวและลดลงตามระดับความลึกดังรูปที่ 2.16 นั่นคือรอยบกพร่องที่พื้นผิวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้มากกว่า ซึ่งย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโพรบมากกว่าอีกด้วย (แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีขนาดใหญ่โตกว่า)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง

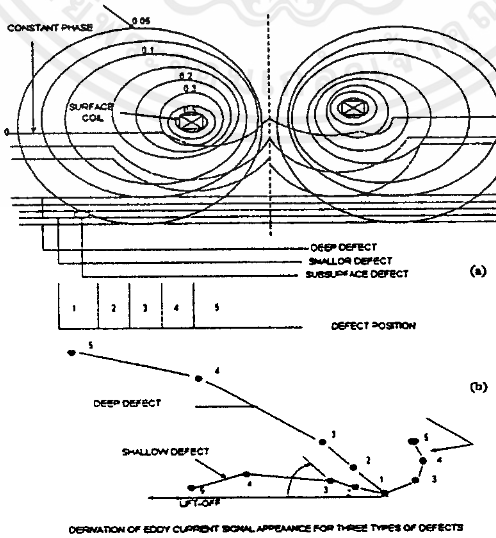


รูปที่ 2.16 ลักษณะการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สัญญาณจะสมบูรณ์มากขึ้นถ้าพิจารณาเฟสด้วยรูปที่ 2.17(a) ซึ่งเป็นภาพภาคตัดขวางของโพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว ซึ่งแสดงการกระจายของสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดโพรบโดยที่เส้นทึบแสดงระดับที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่และเส้นประแสดงระดับของเฟสคงที่ ทั้งนี้เฟสของสนามแม่เหล็กจะใกล้เคียงกันกับค่าเฟสของ กระแสไหลวนจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะทางตามแนวแกนหรือความลึกเพิ่มขึ้นและเฟสจะช้ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเช่นกัน

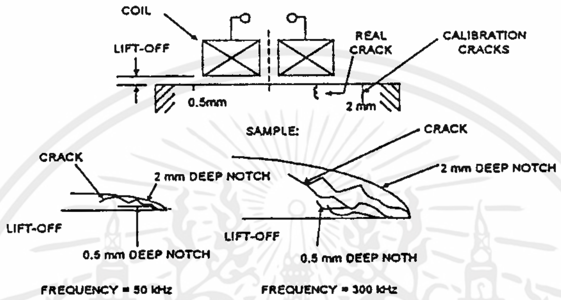
ผลกระทบของรอยบกพร่องทั้งสามแบบในรูปเมื่อเลื่อนจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 5 ของรูปที่ 2.17(a)แสดงด้วยลักษณะของสัญญาณที่ตรวจจับได้บนจอภาพของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ดังรูปที่ 2.17(b) ลักษณะของสัญญาณจากรอยบกพร่องจะเป็นเส้นโค้งแยกออกจากแนว Lift Off 2β กับแนว Lift Off ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่า เกิดจากเฟสที่ช้าลงของสนามแม่เหล็ก เมื่อห่างจากขดลวดบวกกับเฟสที่ช้าลงของกระแสไหลวน เมื่อสะท้อนกลับไปยังขดลวดโพรบ สำหรับรอยบกพร่องที่พื้นผิวแบบตื้นๆ ซึ่งจะมีมุมเฟส β อยู่ในช่วง 20-25 องศาตามรูปที่ 2.17(a) จะมีแนวสัมผัสของ 2β ประมาณ 45 องศา ขณะที่รอยบกพร่องใต้พื้นผิวมีระดับเฟส β ประมาณ 70 องศา มีแนวสัมผัสของสัญญาณ 2β ประมาณ 130 องศา ส่วนรอยบกพร่องพื้นผิวที่มีความลึกมากจะมีช่วงเฟส β กว้างจาก 20-60 องศา ซึ่งอาจใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 35 องศา ดังนั้นแนวสัมผัสของสัญญาณทำมุม 2β ประมาณ 70 องศา



รูปที่ 2.17 ลักษณะของสัญญาณจากการตรวจสอบรอยบกพร่องแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของรอยบกพร่องจริง ซึ่งลักษณะของผนังขรุขระและอาจมีบางส่วนแตะกันอยู่ จะทำให้สัญญาณที่ได้รับไม่ชัดเจนเหมือนเช่นที่แสดงไว้ในการตรวจสอบจริง ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกันดังนั้นการพิจารณาความลึกของรอยบกพร่องที่พื้นผิวต้องอาศัยการเปรียบเทียบกับรอยบกพร่อง (รอยบาก) สอบเทียบ (Calibration Defect) ที่ทำขึ้นทั้งแอมพลิจูดและเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.18

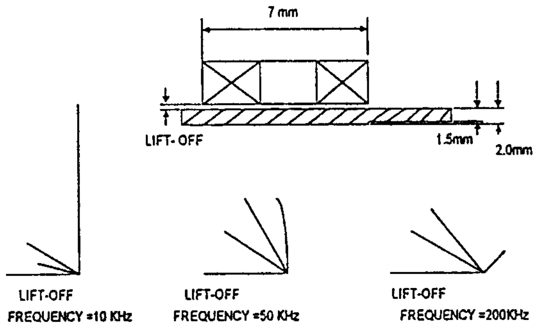


รูปที่ 2.18 สัญญาณจากรอยบกพร่องจริงและรอยบกพร่องสอบเทียบ

2.9.3 ลักษณะของสัญญาณการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนา

รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของสัญญาณจากการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนาที่ความถี่ต่างๆ กัน โดยปรับให้แนว Lift Off อยู่ในแนวราบจะพบว่าการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุและความหนาชิ้นงานตรวจสอบ จะทำให้เกิดสัญญาณแยกตัวออกจากแนว Lift Off ในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยจะมีขนาดและเฟสขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบ เช่นที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณเนื่องจากการเพิ่มความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก ($+\Delta\mu$) จะมีค่าสูงและมีมุมเฟส 2β ประมาณ 90 องศา ขณะที่สัญญาณจากการเพิ่มความต้านทาน ($+\Delta\rho$) และสัญญาณจากการลดความหนา ($-\Delta t$) ให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดและเฟสใกล้เคียงกัน เมื่อค่าความถี่ในการตรวจสอบเพิ่มขึ้น ลักษณะของสัญญาณทั้งสามก็จะเปลี่ยนไปจากเดิม เช่นที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณ $-\Delta t$ ทำมุมเฟส 2β ประมาณ 90 องศา จากแนว Lift Off และขณะเดียวกันสัญญาณ $+\Delta\rho$ และ $+\Delta\mu$ จะเคลื่อนเข้าใกล้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Probe Response to Various Test Parameters at Three Frequencies

รูปที่ 2.19 ลักษณะของสัญญาณจากการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ และความหนาที่ความถี่ต่างกัน

ตามปกติการตรวจสอบแผ่นโลหะบางความถี่ที่ใช้ ในการตรวจสอบจะถูกเลือกให้อยู่แนว Lift Off และแนวสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแยกห่างกันประมาณ 90 องศาบนระนาบอิมพีแดนซ์ซึ่งความถี่นี้ได้ทดลองคำนวณใช้จากความสัมพัทธ์โดยให้อัตราส่วนของความหนาต่อระยะความลึกในการแทรกซึมมาตรฐาน $(t/\delta) = 0.8$ ได้สมการ

$$f = 1.6\ \rho/t^2 \quad \text{กิโลเฮิรตซ์} \qquad (2.22)$$

เมื่อ ρ มีหน่วยเป็นไมโครโอห์ม-เซนติเมตร และ t มีหน่วยมิลลิเมตร ขณะที่สัญญาณจากรอยบกพร่องชนิดอื่นๆจะทำมุมน้อยกว่า 90 องศา

2.9.4 รอยบกพร่องสอบเทียบ (Calibration Defect)

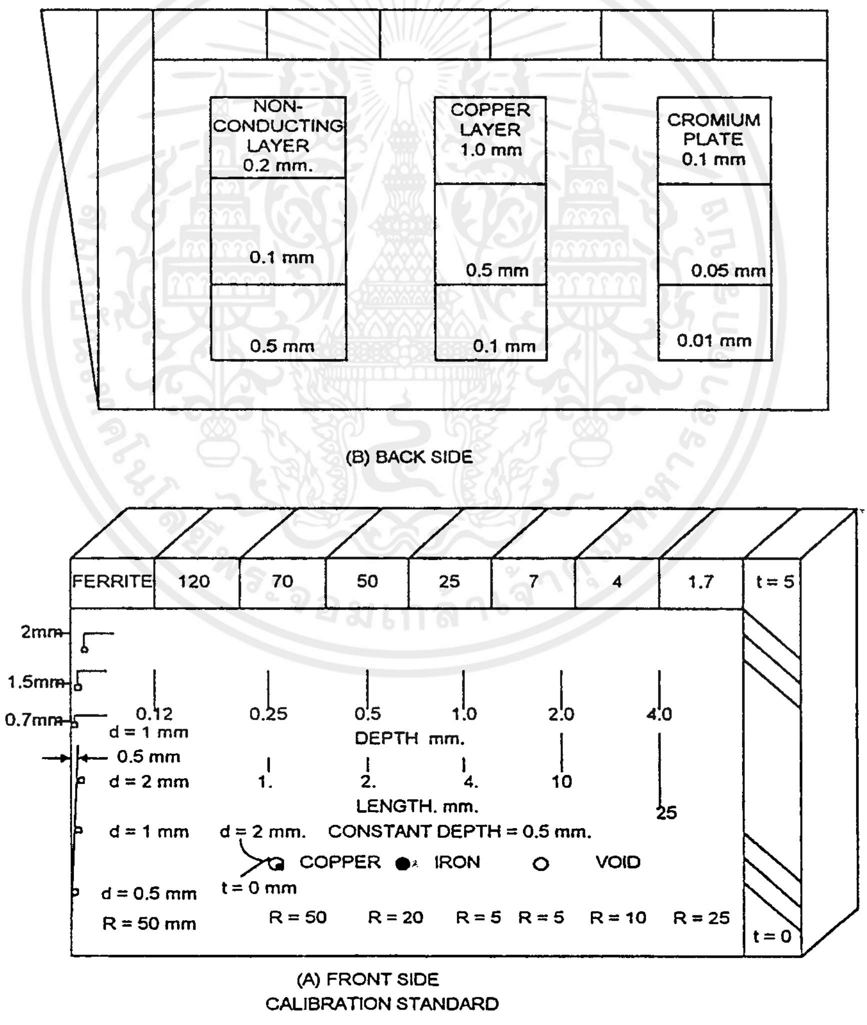
การวิเคราะห์สัญญาณจากการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน เป็นเทคนิคที่อาศัยการเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องมีมาตรฐานการสอบเทียบ เพื่อใช้เปรียบเทียบแอมพลิจูดและเฟสของรอยบกพร่องในชิ้นงานซึ่งไม่ทราบชนิดนอกจากนี้สัญญาณจากมาตรฐานการสอบเทียบยังอาจใช้ในการปรับความไวและมุมของเครื่องมือด้วย

รูปที่ 2.20 แสดงแผ่นทดสอบเทียบชนิดหนึ่งสำหรับการใช้งานทั่วๆ ไปที่ใช้เพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่

- ความต้านทานไฟฟ้า
- ความหนา
- ลักษณะพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยาวของรอยบกพร่องเมื่อความลึกคงที่
- ความลึกของรอยบกพร่องเมื่อความยาวคงที่
- ขนาดของรอยบกพร่องใต้ผิวเมื่อความลึกคงที่
- ความลึกของรอยบกพร่องใต้ผิวเมื่อขนาดคงที่
- ความหนาของชั้นไม่นำไฟฟ้า
- ความหนาของชั้นนำไฟฟ้า
- การปะปนของสารแม่เหล็ก



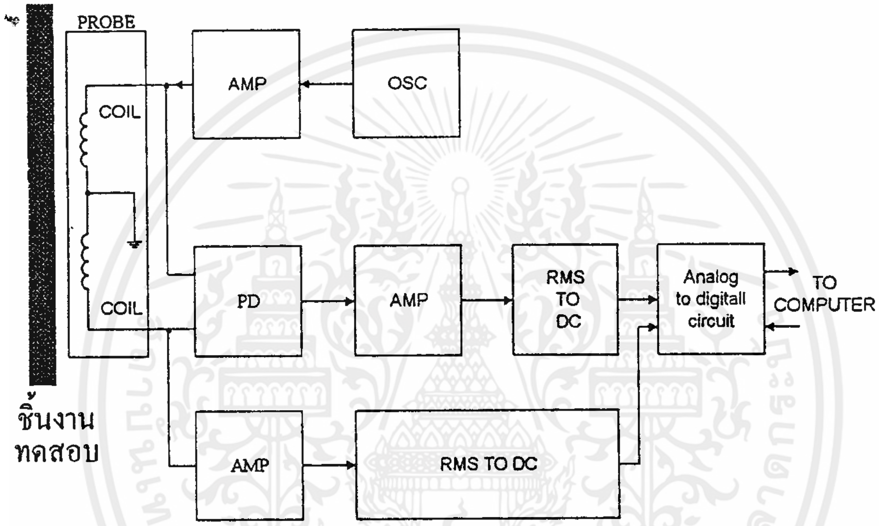
รูปที่ 2.20 มาตราการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

การออกแบบและการสร้างเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์



OSC : Oscillator

AMP : Amplifier

PD : Phase detecter

RMS TO DC : Root mean square to direct current

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่อง และความหนาของโลหะเหล็ก

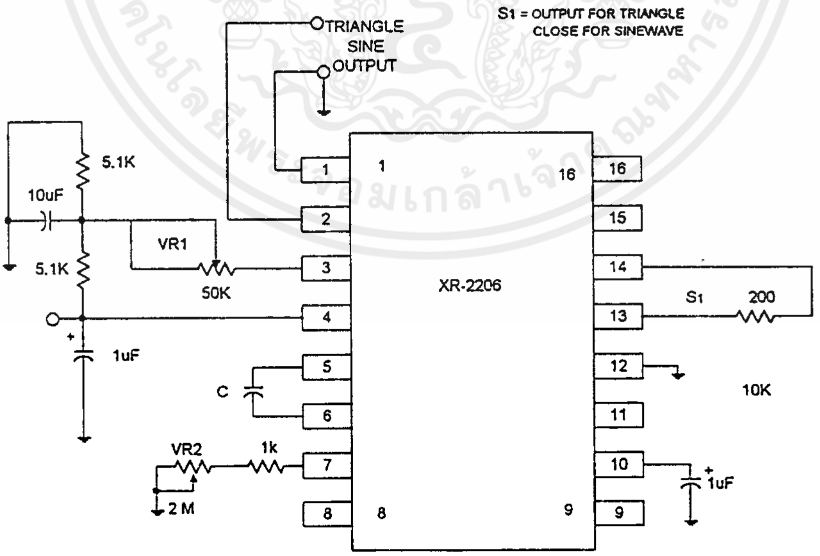
3.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ในส่วนฮาร์ดแวร์มีการทำงานตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะการทำงานดังนี้ วงจรออสซิลเลเตอร์จะกำเนิดสัญญาณรูปซายน์เวฟ (Sine Wave) ที่มีความถี่ 500 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถูกขยายสัญญาณส่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ให้กับวงจรขับกระแสจากนั้นจะส่งให้กับขดลวดปฐมภูมิ ส่วนขดลวดทุติยภูมิจะรับสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของชิ้นงานทดสอบ และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการตรวจหารอยบกพร่องและความหนาชิ้นงานทดสอบถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อส่งต่อไปในส่วนแรกนั้นจะถูกส่งไปยังวงจรเฟสดีเทคเตอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปของขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดปฐมภูมิ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการเปรียบเทียบเฟสจะถูกส่งไปเข้าวงจรขยายเพื่อขยายสัญญาณให้มีค่ามากขึ้น แล้วจึงส่งไปยังวงจร RMS TO DC เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการตรวจวัดรอยบกพร่องในส่วนที่ 2 ถูกส่งให้กับวงจรขยายเพื่อเปรียบเทียบระดับแรงดันของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงของขดลวดทุติยภูมิกับขดลวดปฐมภูมิ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการเปรียบเทียบเฟสจะถูกส่งไปเข้าวงจรขยายเพื่อขยายสัญญาณให้มีค่ามากขึ้น แล้วจึงส่งต่อไปยังวงจร RMS TO DC สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกส่งต่อไปให้กับวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลและส่งต่อไปประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลทางจอภาพหรือพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์

3.1.1 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit)



รูปที่ 3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ ในโครงงานนี้เลือกใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ XR2206 เนื่องจาก IC เบอร์นี้มีจุดเด่นหลายประการคือ

- มีความเที่ยงตรงสูง
- สามารถผลิตสัญญาณได้หลายรูปแบบเช่น สัญญาณซายน์ สัญญาณพัลส์ สัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม
- สามารถผลิตความถี่ได้จาก 0.5 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์
- ราคาถูก

ลักษณะของการต่อวงจรเป็นดังรูปที่ 3.2 และความถี่เอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f = 1 / RC \qquad (3.1)$$

โดยที่

f คือ ค่าความถี่เอาต์พุต

R คือ ค่าความต้านทาน VR2

C คือ ค่าความจุ

วงจรที่ใช้งานจริงเราต้องการความถี่เอาต์พุต 500 เฮิรตซ์

จากสูตร

$$f = 1/RC$$

เราได้กำหนดค่า R = 20 kΩ และ C = 0.1 μF และทำการคำนวณตามสูตรจะได้ดังนี้

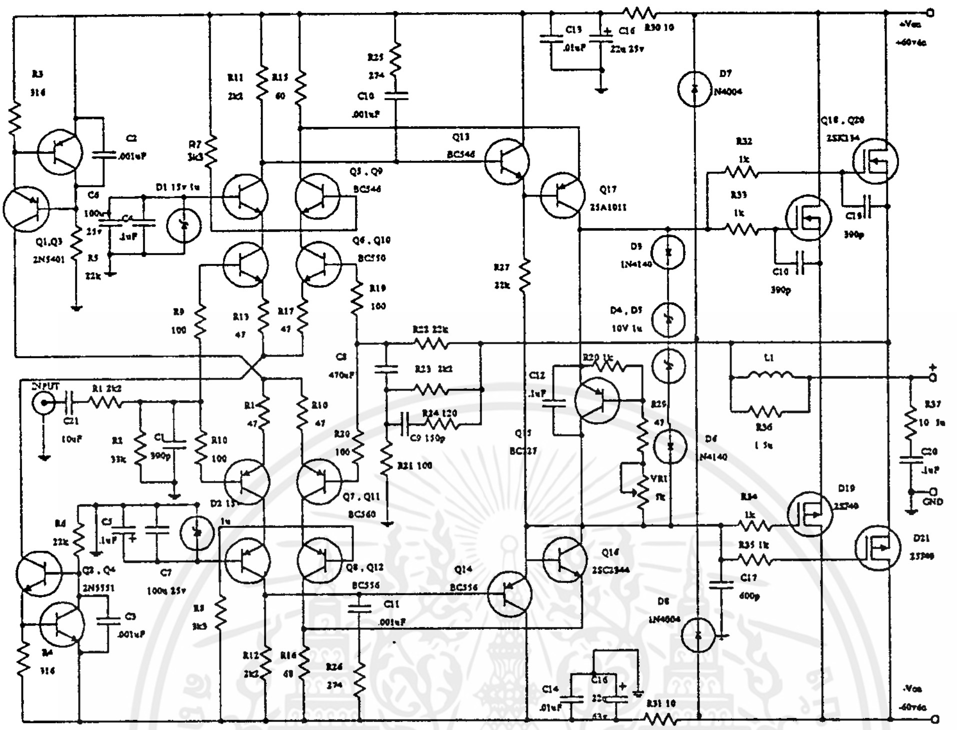
$$f = 1/(20\ k(*\ 0.1\ \mu F))$$

$$f = 500\ Hz$$

3.1.2 การออกแบบวงจรขับกระแส (Current Driver Circuit)

ในการตรวจหารอยบกพร่องโดยใช้หลักการกระแสไหลวนตามหลักการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องจ่ายกระแสให้กับโพรบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหารอยบกพร่องของโพรบตรวจสอบ จึงต้องใช้วงจรขับกระแสเพื่อเพิ่มค่ากระแสของสัญญาณที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งวงจรขับกระแสมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรขับกระแส

รูปที่ 3.3 วงจรที่ออกแบบภาคแรกเป็นวงจรขยายผลต่างประกอบด้วย 2 ชุดคือ ชุดแรก Q5,Q6,Q9,Q10 และชุดที่ 2 Q7,Q8,Q11,Q12 จากนั้นส่งให้กับ Q13,Q17 และ Q14,Q16 ขับกระแสให้เพิ่มขึ้นอีกระดับหนึ่ง จากนั้นจึงส่งให้กับ Q18,Q20 และ Q19,Q21 ซึ่งต่อขนานกันอยู่ โดยจะให้ผลดีสำหรับการขับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำๆ จึงสอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ของโพรบตรวจสอบ ที่มีโครงสร้างเป็นขดลวดอิมพีแดนซ์ต่ำเช่นเดียวกัน

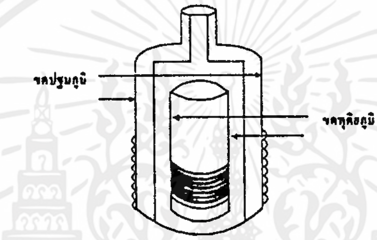
3.1.3 การออกแบบโพรบตรวจสอบ (Probe)

ส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของโครงงาน เนื่องจากเสมือนเป็นตัวส่งสัญญาณที่ได้จากผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวน เนื่องจากรอยบกพร่องของชิ้นงานและนำสัญญาณดังกล่าวไปประมวลผลแอนาล็อก จากนั้นนำผลสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ จากการทำงานในครั้งนี้ได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง มาทำการออกแบบและทดลองสร้างโพรบตรวจสอบแบบเซลนูลลิ่ง (Self Nulling Probe)

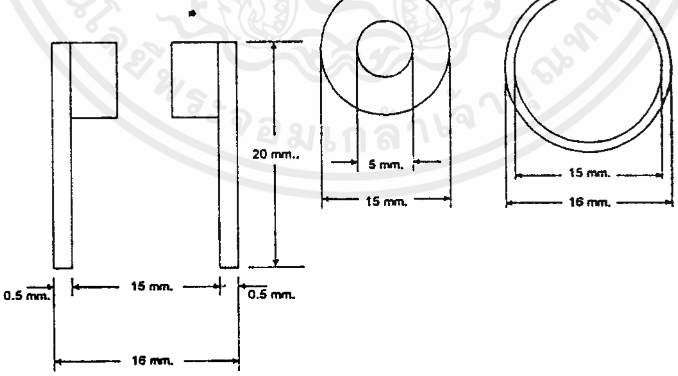
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรบแบบเซลนูลลิ่ง (Self Nulling Probe)

การออกแบบโพรบแบบเซลนูลลิ่ง [1] จะประกอบด้วยขดลวดสองชุด โดยทำการจ่ายสัญญาณซายน์ให้กับขดลวดชุดที่ 1 และขดลวดชุดที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณที่ได้จากการตรวจสอบรอยบกพร่อง การพันขดลวดในชุดที่ 1 ใช้ขดลวดเบอร์ 35 พันรอบๆ แกนเฟอร์โรแมกเนติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 500 รอบ และการพันขดลวดชุดที่ 2 ใช้ขดลวดเบอร์ 44 พันรอบๆ แกนอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 1200 รอบ ดังรูป 3.4 และรูปที่ 3.5



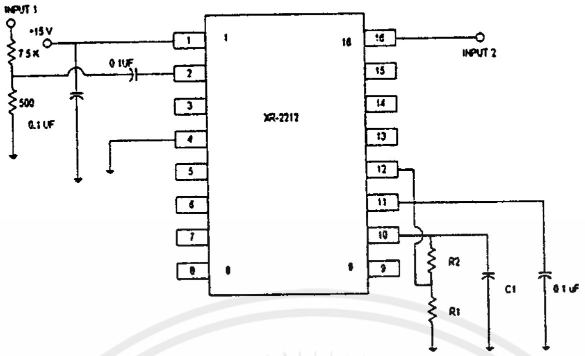
รูปที่ 3.4 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของโพรบแบบเซลนูลลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การออกแบบวงจรเฟสดีเทคเตอร์ (Phase Detector Circuit)



รูปที่ 3.6 วงจรเฟสดีเทคเตอร์

วงจรเฟสดีเทคเตอร์ในโครงงานนี้ ทำหน้าที่หาความแตกต่างเฟสของสัญญาณอินพุตจากขดลวดปฐมภูมิเทียบกับเฟสของขดลวดทุติยภูมิของโพรบตรวจสอบ ถ้าสัญญาณอินพุตมีเฟสที่แตกต่างกันจะให้สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นคลื่นซายน์ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไป สัญญาณเอาต์พุตของวงจรจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการตรวจพบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กซึ่งสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีระดับต่ำ จึงส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่ได้มีค่ามากขึ้น แล้วจึงส่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ไปยัง วงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดีซีต่อไป การออกแบบวงจรเฟสดีเทคเตอร์ ในโครงงานนี้ใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ XR2212 ซึ่งมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 3.6

การเลือกค่า R และค่า C ในวงจรสามารถคำนวณค่าได้จากสูตรดังต่อไปนี้

การคำนวณค่า R_1 จากสูตร

$$R_1 = 1/(C_1 * f) \qquad (3.2)$$

เลือกค่า $C_1 = 0.1\ \mu F$ และความถี่ที่ใช้งาน $f = 500$ Hz

$R_1 = 1/(C_1 * f)$

$R_1 = 1/(0.1\ \mu F * 500\ Hz)$

$R_1 = 20\ K\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่า R_2 จากสูตร

$$N * f = R_1/R_2 \tag{3.3}$$

โดยที่

N คืออัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Bandwidth Ratio)

f คือความถี่

R_1, R_2 คือค่าความต้านทาน

จากตารางในดาต้าชีต เราใช้ค่า N = 1.5 จะได้ค่าของ R_2 คือ

$N * f = R_1/R_2$

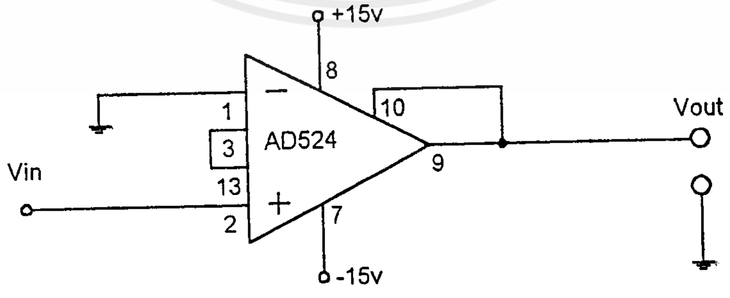
$R_2 = R_1/(N * f)$

$R_2 = 20\ K\Omega/(1.5 * 500\ Hz)$

$R_2 = 13.33\ K\Omega$

3.1.5 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแรงดัน (Amplifier Circuit)

วงจรขยายแรงดันในภาคนี้ เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non- inverting) ใช้ไอซีเบอร์ AD524 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปที่สามารถเลือกอัตราขยายได้ โดยการต่อขาที่ 3 ร่วมกับขาต่างๆ โดยถ้าต่อร่วมกับขา 13 อัตราขยายเท่ากับ 10 เท่า ถ้าต่อร่วมกับขา 12 อัตราขยายจะเท่ากับ 100 เท่า และถ้าต่อขา 3 ร่วมกับขา 11 อัตราขยายจะเท่ากับ 1000 เท่า ดังนั้นในโครงงานนี้เลือกใช้อัตราขยายเท่ากับ 10 เท่า ลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.7

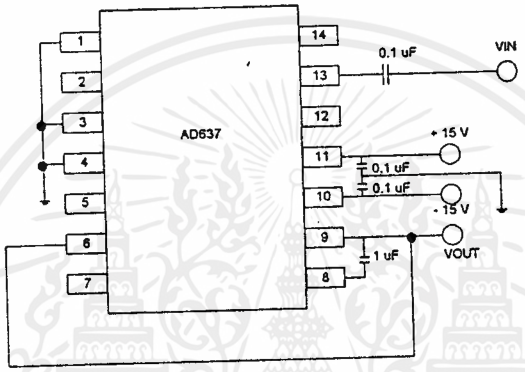


รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 การออกแบบวงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดีซี (RMS TO DC Circuit)

วงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดี ซี ในโครงงานนี้ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นซายน์จากวงจรเฟสดีเทคเตอร์ให้เป็นระดับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงโดยสัญญาณที่เอาต์พุตจะออกมาเป็นระดับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และส่งสัญญาณที่ได้ไปยังวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล การออกแบบวงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดีซี ในโครงงานนี้ใช้ IC เบอร์ AD637 ซึ่งมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรอาร์เอ็มเอส ทู ดีซี

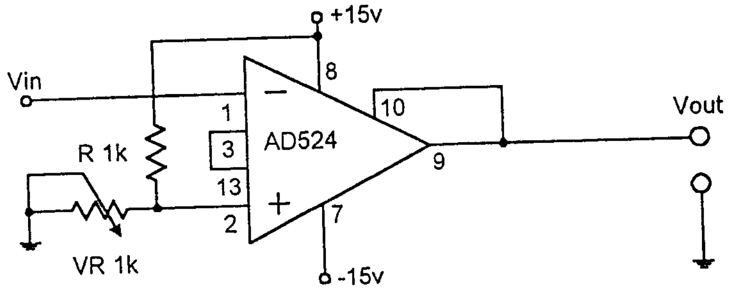
3.1.7 การออกแบบวงจรขยายแรงดันผลต่าง (Differential Amplier Circuit)

วงจรขยายแรงดันผลต่าง ในโครงงานนี้ ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันผลต่างที่ได้จากเอาต์พุตของวงจร RMS TO DC เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตขณะเปิดเครื่องและยังไม่ได้ทดสอบชิ้นงานมีระดับแรงดันเป็นศูนย์ และเมื่อทดสอบชิ้นงานจะได้ระดับแรงดันเอาต์พุต อีกระดับหนึ่งซึ่งจะใช้ขยายระดับแรงดันทางไฟฟ้าให้มีขนาดมากขึ้นนำไปประมวลผลต่อไป

การออกแบบ เลือกตัวต้านทาน R และ VR เท่ากับ 1 กิโลโอห์ม ใช้การคำนวณโดยอาศัยหลักการของวงจรแบ่งแรงดัน คือ เมื่อมีแรงดันอินพุตเข้ามาที่ขา 1 ของไอซี ตัวต้านทาน VR 1k จะทำหน้าที่แบ่งแรงดัน เป็นแรงดันอินพุตป้อนให้กับขา 2 ของไอซี ใช้การปรับตัวต้านทาน VR 1k เพื่อให้ระดับแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์

การออกแบบวงจรขยายแรงดันผลต่างนี้ ใช้วงจรเปรียบเทียบ (Comparator Circuit) โดยใช้ไอซีเบอร์ AD524 ซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรขยายผลต่าง

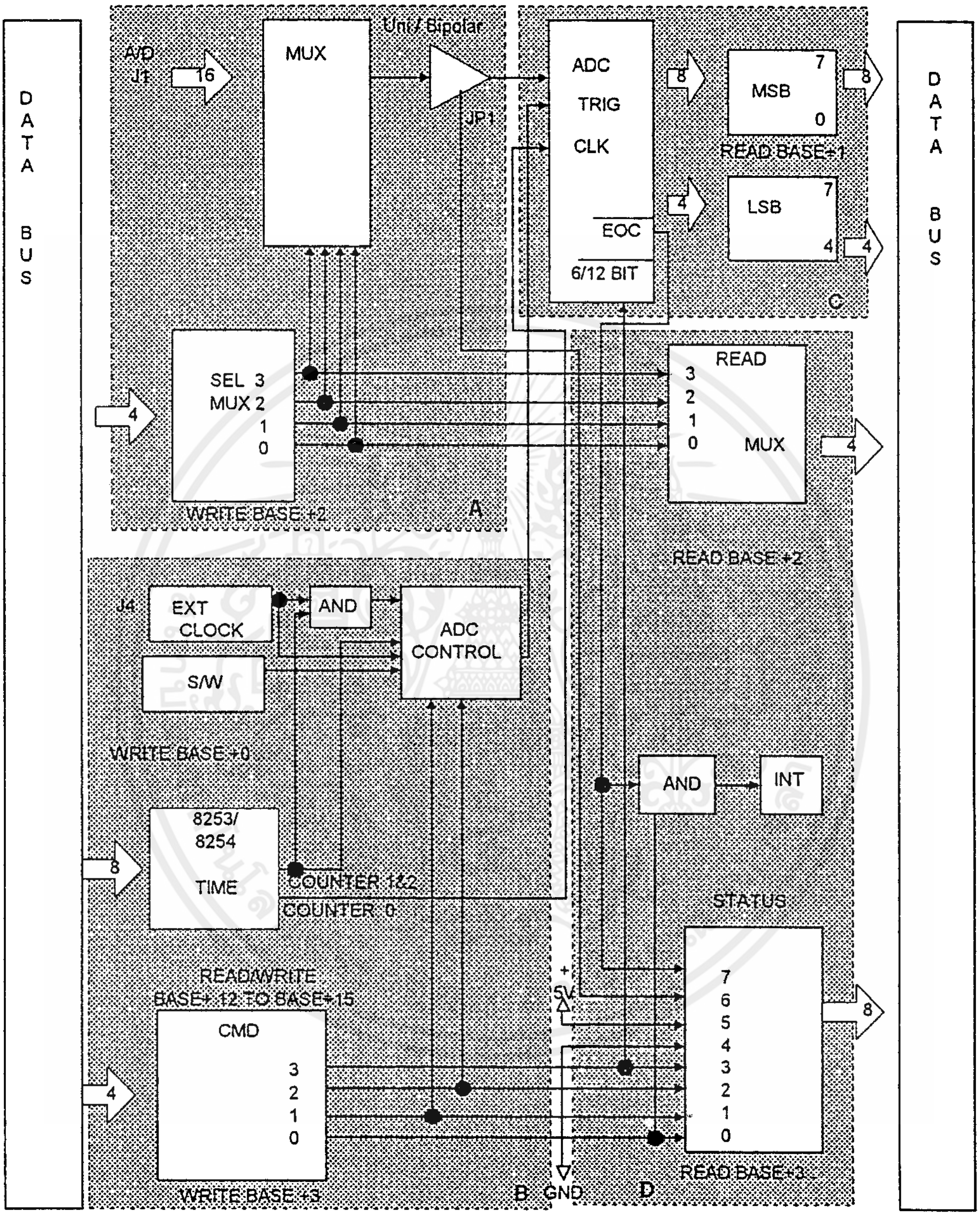
3.1.8 วงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog To Digital Converter Circuit)

ในโครงงานนี้ ได้ใช้การประมวลผลทางแอนาล็อกร่วมกับการประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ เลือกใช้การ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล รุ่น PA-CP12 ซึ่งมีการทำงานในรูปที่ 3.10 และมีคุณสมบัติดังนี้

Resolution	12 Bits
Input Channel	16 Channel (Single-Ended)
Input Voltage Range	-5 V To +5 V, -10 V To +10 V 0 V To +5 V, 0 V To +10 V
Accuracy	2 Bits
Conversion Time	200 µs, 5 KHz
Overvoltage	35 V
Conversion Method	S/W Trig External Clock Trig Interrnal 8253/8254 Timer Trig Internal 8253/8254 Timer Trig
Connector	37 Pin D-Type Male Connector

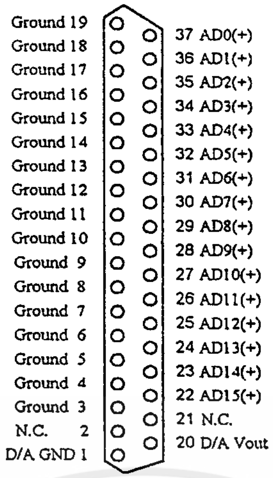
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการต่อ Connector DB-25 มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การทำงานของการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC)

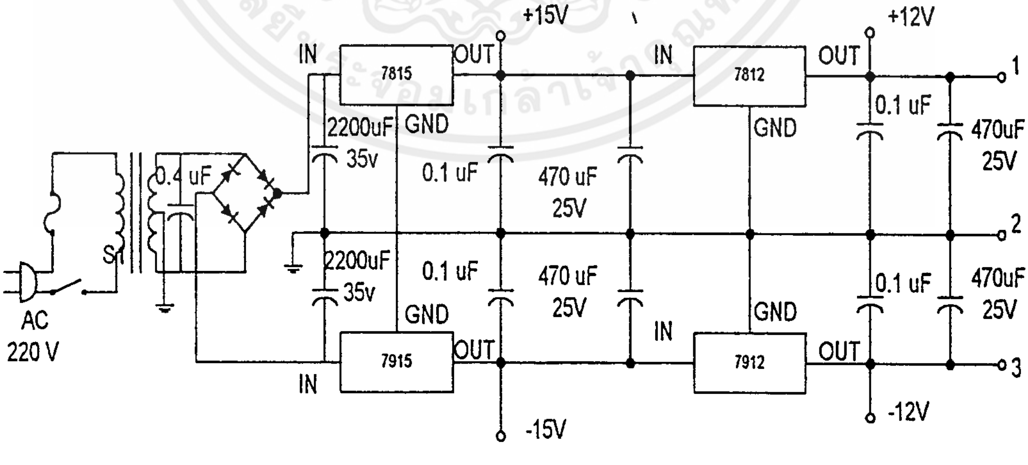
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การต่อสัญญาณจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC)

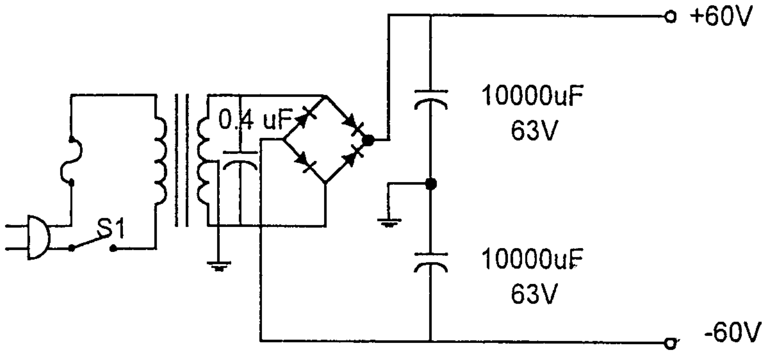
3.1.9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงใช้ IC ตระกูล 78xx และ 79xx ซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน ในโครงงานนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 3 ชุด ชุดแรกใช้ระดับแรงดัน +15 V และ -15 V ใช้ IC เบอร์ 7815 และ 7915 ชุดที่ 2 ใช้ระดับ +12 V และ -12 V ใช้ IC เบอร์ 7812 และ 7912 ชุดที่ 3 ใช้ระดับแรงดัน +60 V และ -60 V มีลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.12



ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.

รูปที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 ซอฟต์แวร์

ในส่วนของซอฟต์แวร์ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนรับข้อมูลจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล และส่วนแสดงผลดังแสดงในภาคผนวก

3.2.1 ส่วนรับข้อมูลจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล ในส่วนนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

ก. ส่วนกำหนดความเร็วในการสุ่ม

ในส่วนนี้ จะทำหน้าที่กำหนดอัตราความเร็วในการสุ่มสัญญาณสัญญาณ ที่เข้ามาทางขา AD0 และ ขา AD1

ข. ส่วนรับข้อมูล

ในนี้ส่วนจะทำหน้าที่เปลี่ยนอินเตอร์รัพต์เวกเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ให้มาชี้ที่โปรแกรมที่เขียนขึ้น เนื่องจากได้ออกแบบให้รับข้อมูลทุกครั้งที่มีสัญญาณเข้ามาที่ขา IRQ5 ซึ่งเป็นขาอินเตอร์รัพต์ฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยข้อมูลที่รับเข้ามาจะถูกนำมาเก็บไว้ในตัวแปรอะเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ส่วนแสดงผล

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ พล็อตค่าจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล แสดงออกทางจอภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจะแยกพล็อตออกเป็นความหนาและรอยบกพร่องที่เปลี่ยนแปลงพร้อมกับตรวจสอบเมาส์ ในส่วนนี้จะแสดงชื่อโครงงานและเมนูการใช้งาน ซึ่งแต่ละเมนูมีหน้าที่การใช้งานดังนี้

เมนู เปิด จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะทำการเปิดแฟ้มข้อมูลหรือไม่ ถ้ามีให้คลิกเมาส์ที่เมนูเปิด หลังจากนั้นจะแสดงเมนูย่อยให้เลือกดังนี้ เมนูแสดงความหนาของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . ATH เมนูแสดงรอยบกพร่องของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . CTH เมนูแสดงความหนาของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MTH เมนูแสดงรอยบกพร่องของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MCK และเมนูยกเลิก ถ้าเลือกแฟ้มข้อมูลแล้ว ชื่อของแฟ้มข้อมูลนั้นจะแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ส่วนของคำว่า ชื่อ

เมนู บันทึก จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะบันทึกหรือไม่ ถ้ามีจะแสดงเมนูย่อยให้เขียนชื่อแฟ้มข้อมูล ด้วยตัวอักษรทั้งหมดไม่เกิน 8 ตัว

เมนู พิมพ์ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะพิมพ์หรือไม่ ถ้ามีจะแสดงเริ่มการพิมพ์ ซึ่งการพิมพ์จะพิมพ์สัญญาณที่อยู่บนจอคอมพิวเตอร์

เมนู ABOUT แสดงรายชื่อของอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้จัดทำโครงงาน

เมนู เริ่ม-หยุด จะใช้ตรวจสอบคีย์เมาส์ว่ามีการคลิกเมาส์หรือไม่ เมนูในขั้นแรกจะแสดงคำว่า เริ่ม เพื่อทำการเริ่มพล็อตค่าที่ได้จากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลแสดงที่จอคอมพิวเตอร์และเมื่อคลิกคำว่าเริ่มแล้ว จะแสดงคำว่า หยุด พร้อมที่จะหยุดจากการพล็อตค่าที่ได้

เมนู ชนิดของโลหะ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่เปลี่ยนชนิดของโลหะที่ต้องการวัดหรือไม่ ถ้ามีโลหะให้เลือก 2 ชนิดคือ อลูมิเนียมและโลหะเหล็ก ซึ่งถ้าคลิกที่โลหะชนิดใดแล้วจะแสดงชนิดของโลหะที่ด้านล่างกึ่งกลางจอคอมพิวเตอร์

เมนู ออก จะคืนค่าอินเตอร์รัพต์เวกเตอร์เดิมให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์และก□ โหมดการแสดงผลของจอภาพให้เป็นโหมด 80X25 ตัวอักษรจากนั้นจึงจบโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากที่ได้สร้างเครื่องต้นแบบเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาตามการออกแบบในบทที่ 3 แล้ว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและทดสอบเครื่องต้นแบบโดยการทดลองและทดสอบเครื่องได้แยกเป็นการทดสอบฮาร์ดแวร์ (Hardware) และทดสอบโดยรวมทั้งระบบผลการทดลองสามารถวัดได้จากออสซิลโลสโคปและจอภาพแสดงผลของคอมพิวเตอร์

4.1 การทดลองและทดสอบโพรบ

4.1.1 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. โพรบแบบเซลนูลลิ่ง ส่วนของโพรบตรวจสอบใช้ขดลวดเบอร์ 35 พันรอบแกนเฟอร์โรแมกเนติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จำนวน 500 รอบ เป็นขดลวดปฐมภูมิใช้ขดลวดเบอร์ 44 พันรอบแกนจำนวน 1200 รอบ เป็นขดลวดทุติยภูมิ มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

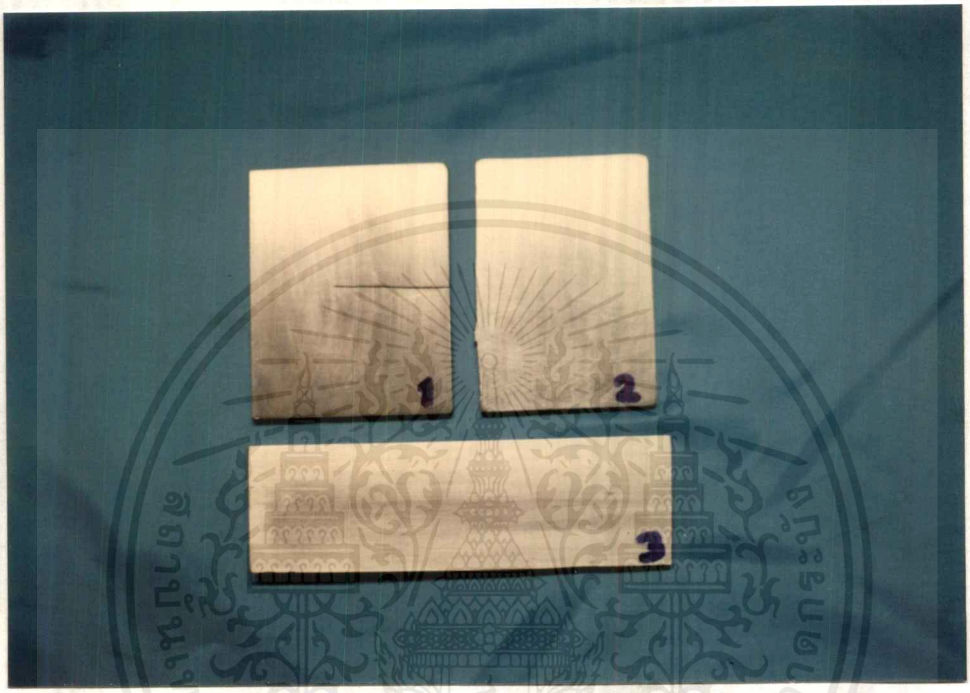
รูปที่ 4.1 โพรบแบบเซลนูลลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรขับกระแส

3. ชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4.2

4. ออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.2 โลหะเหล็กที่เป็นชิ้นงานทดสอบ

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ป้อนสัญญาณคลื่นซายน์ความถี่ 500 เฮิรตซ์ ขนาด 500 มิลลิโวลท์ เข้าที่อินพุตของวงจรขับกระแส

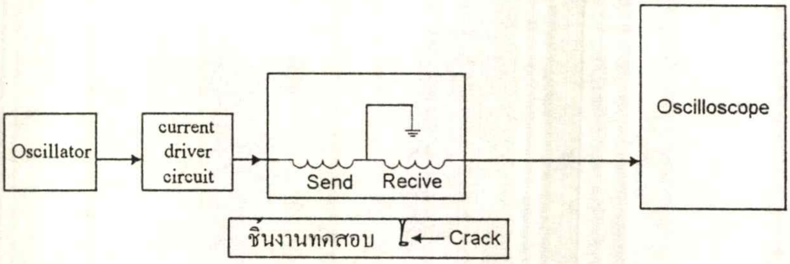
2. นำเอาต์พุตของวงจรขับกระแสมาป้อนเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิของโพรบ

3. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณจากขดลวดทุติยภูมิ

4.นำโพรบไปวางบนชิ้นงานทดสอบ และทำการเลื่อนโพรบไปมาบนชิ้นงานทดสอบ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อโพรบตรวจสอบเคลื่อนที่ผ่านรอยบกพร่องของชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 4.3

5. บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การตรวจวัดรอยบกพร่องของชิ้นงาน

5. ทำการเปลี่ยนความถี่ในข้อที่ 1 เป็น 0.25 กิโลเฮิรตซ์ และ 1 กิโลเฮิรตซ์ แล้วทำการทดลองตามลำดับขั้นจากข้อ 2 ถึง ข้อ 4

ความถี่ (kHz)	แรงดันอินพุตของโพรบ	แรงดันเอาต์พุตของโพรบ(V) (ขณะวางบนชิ้นงานทดสอบ)	แรงดันเอาต์พุตของโพรบ(V) (ขณะที่ผ่านรอยบกพร่อง)
0.25	30 Vp-p	5.560	5.056
0.5	30 Vp-p	5.967	5.503
1.0	30 Vp-p	6.209	5.833

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบที่ 1

ความถี่ (kHz)	แรงดันอินพุตของโพรบ(V)	แรงดันเอาต์พุตของโพรบ(V) (ขณะวางบนชิ้นงานทดสอบ)	แรงดันเอาต์พุตของโพรบ(V) (ขณะที่ผ่านรอยบกพร่อง)
0.25	30 Vp-p	5.828	5.778
0.5	30 Vp-p	6.166	6.327
1.0	30 Vp-p	4.346	4.445

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

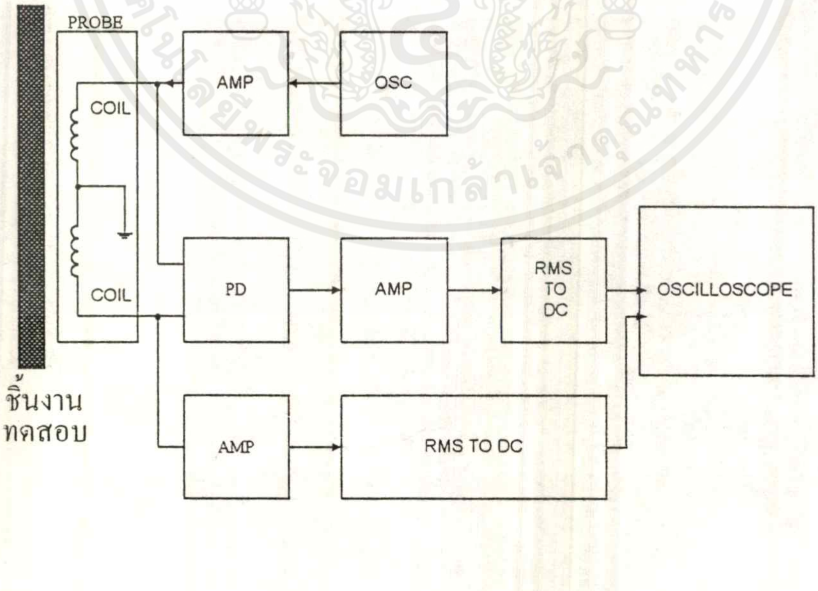
4.2 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. โพรบแบบเซลนูลลิ่ง
2. วงจรขับกระแส , วงจรเฟสดีเทคเตอร์ , วงจร RMS TO DC
3. ชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะเหล็กดังรูปที่ 4.2
4. ออสซิลโลสโคป

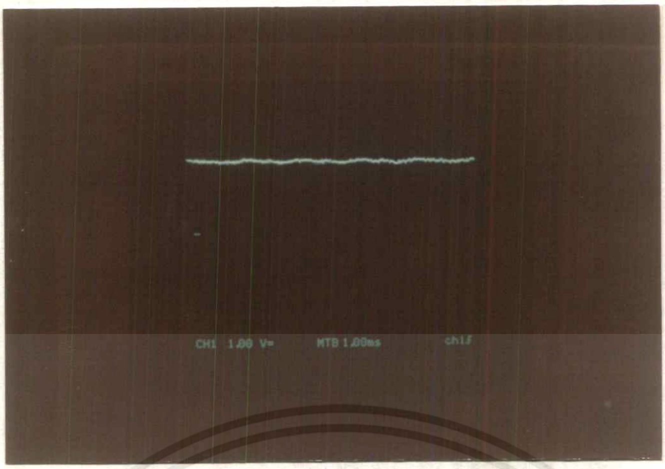
ลำดับขั้นการทดลอง

1. ป้อนสัญญาณคลื่นซายน์ความถี่ 500 เฮิรตซ์ ขนาด 500 มิลลิโวลท์ เข้าที่อินพุตของวงจรขับกระแส
2. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณจากขดลวดทุติยภูมิ
3. นำโพรบไปวางบนชิ้นงานทดสอบ และทำการเลื่อนโพรบไปมาบนชิ้นงานทดสอบ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อโพรบตรวจสอบเคลื่อนที่ผ่านรอยบกพร่องของชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 4.3
4. บันทึกผลการทดลอง



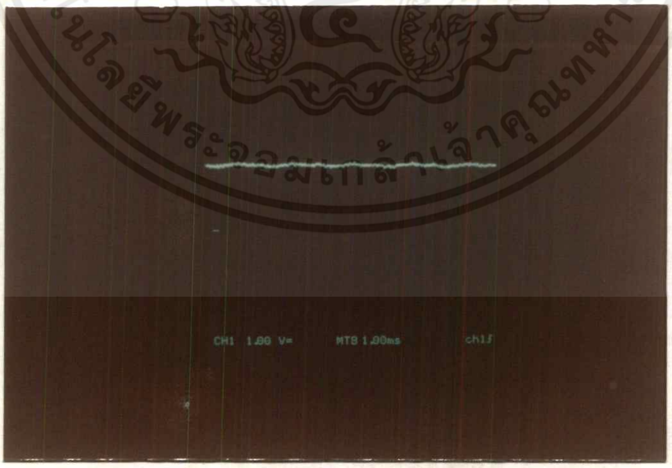
รูปที่ 4.4 การทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V/DIV 500 mV TIME/DIV 1 mS

รูปที่ 4.5 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบหมายเลขที่ 1



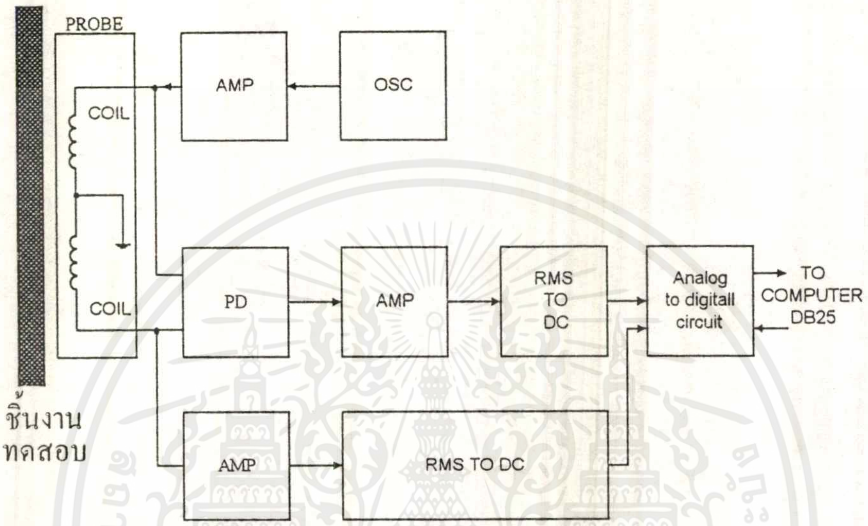
V/DIV 500 mV TIME/DIV 1 mS

รูปที่ 4.6 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองทั้งระบบ

ในส่วนของการทดลองทั้งระบบนี้ เป็นการทดลองฮาร์ดแวร์ร่วมกับซอฟต์แวร์ของเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก โดยมีการทำงานดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ผังการทำงานการทดลองทั้งระบบ

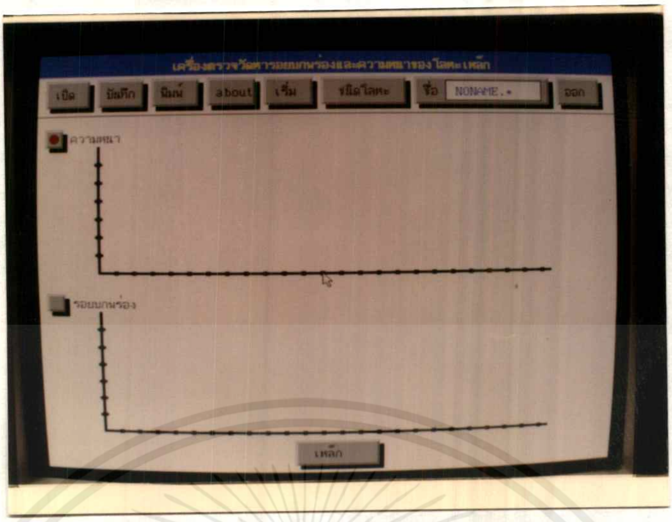
ในส่วนของโปรแกรมนั้นใช้ TURBO C VERTION 2.0 ในการเขียนโปรแกรมเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังนี้ 486 DX4-100 ใช้จอมอนิเตอร์สี พื้นที่เก็บข้อมูลประมาณ 540 เมกกะไบต์

ในการทดลองส่วนซอฟต์แวร์ นั้นจะนำสัญญาณที่วัดได้จากการทดลองฮาร์ดแวร์มาให้กับการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล ซึ่งเป็นการ์ดอินเตอร์เฟสเพื่อนำสัญญาณไปแสดงผลดังรูปที่ 4.8

4.3.1 การทดลองใช้งานโปรแกรม

สามารถเข้าโปรแกรมได้โดยการเรียกไฟล์ PROJECT.EXE เพื่อใช้โปรแกรมและสามารถทำการเลือกฟังก์ชั่นการใช้งานได้โดยง่าย ซึ่งจะมีลักษณะรายละเอียดของเมนูเป็นดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ลักษณะหน้าจอหลังจากเรียกโปรแกรม

เมนู เปิด จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะทำการเปิดแฟ้มข้อมูลหรือไม่ ถ้ามีให้คลิกเมาส์ที่เมนูเปิด หลังจากนั้นจะแสดงเมนูย่อยให้เลือกดังนี้ เมนูแสดงความหนาของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . ATH เมนูแสดงรอยบกพร่องของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . CTH เมนูแสดงความหนาของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MTH เมนูแสดงรอยบกพร่องของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MCK และเมนูยกเลิก ถ้าเลือกแฟ้มข้อมูลแล้ว ชื่อของแฟ้มข้อมูลนั้นจะแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ส่วนของคำว่า ชื่อ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

เมนู บันทึก จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะบันทึกหรือไม่ ถ้ามีจะแสดงเมนูย่อยให้เขียนชื่อแฟ้มข้อมูล ด้วยตัวอักษรทั้งหมดไม่เกิน 8 ตัว ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.11

เมนู พิมพ์ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะพิมพ์หรือไม่ ถ้ามีจะแสดงเริ่มการพิมพ์ ซึ่งการพิมพ์จะพิมพ์สัญญาณที่อยู่บนจอคอมพิวเตอร์

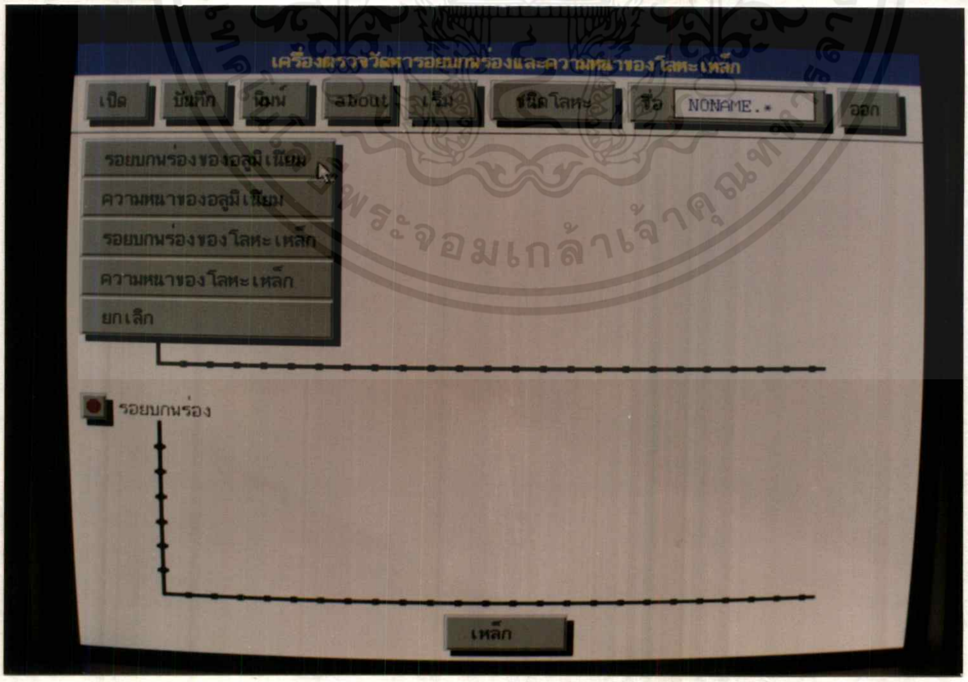
เมนู ABOUT แสดงรายชื่อของอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้จัดทำโครงงาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมนู เริ่ม-หยุด จะใช้ตรวจสอบคีย์เมาส์ว่ามีการคลิกเมาส์หรือไม่ เมนูในขั้นแรกจะแสดงคำว่า เริ่ม เพื่อทำการเริ่มพล็อตค่าที่ได้จากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลแสดงที่จอคอมพิวเตอร์และเมื่อคลิกคำว่าเริ่มแล้ว จะแสดงคำว่า หยุด พร้อมที่จะหยุดจากการพล็อตค่าที่ได้

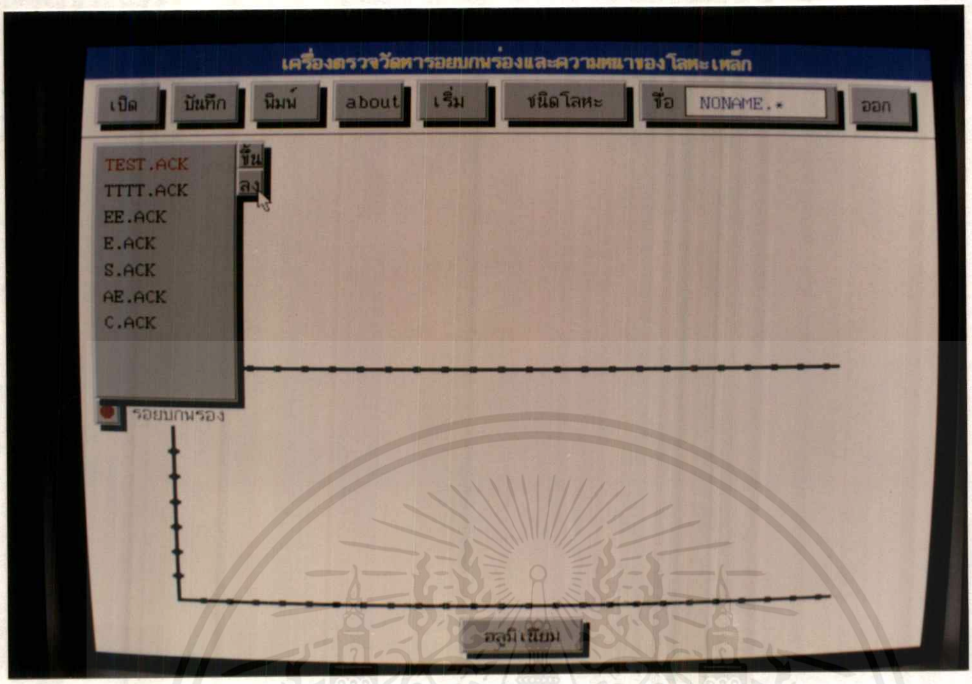
เมนู ชนิดของโลหะ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่เปลี่ยนชนิดของโลหะที่ต้องการวัดหรือไม่ ถ้ามีโลหะให้เลือก 2 ชนิดคือ อลูมิเนียมและโลหะเหล็ก ซึ่งถ้าคลิกที่โลหะชนิดใดแล้วจะแสดงชนิดของโลหะที่ด้านล่างกึ่งกลางจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

การตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะสามารถเลือกการแสดงผลได้ โดยการคลิกเมาส์ที่กรอบสี่เหลี่ยมหน้าคำว่า รอยบกพร่องหรือความหนา ซึ่งเมื่อคลิกเมาส์เลือกการแสดงผลของโลหะใดจะปรากฏจุดกลมสีแดงในกรอบสี่เหลี่ยมนั้น จากนั้นคลิกเมาส์ที่เมนูเริ่ม เพื่อทำการตรวจวัด และคลิกเมาส์ด้านซ้ายเพื่อหยุดการตรวจวัด ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

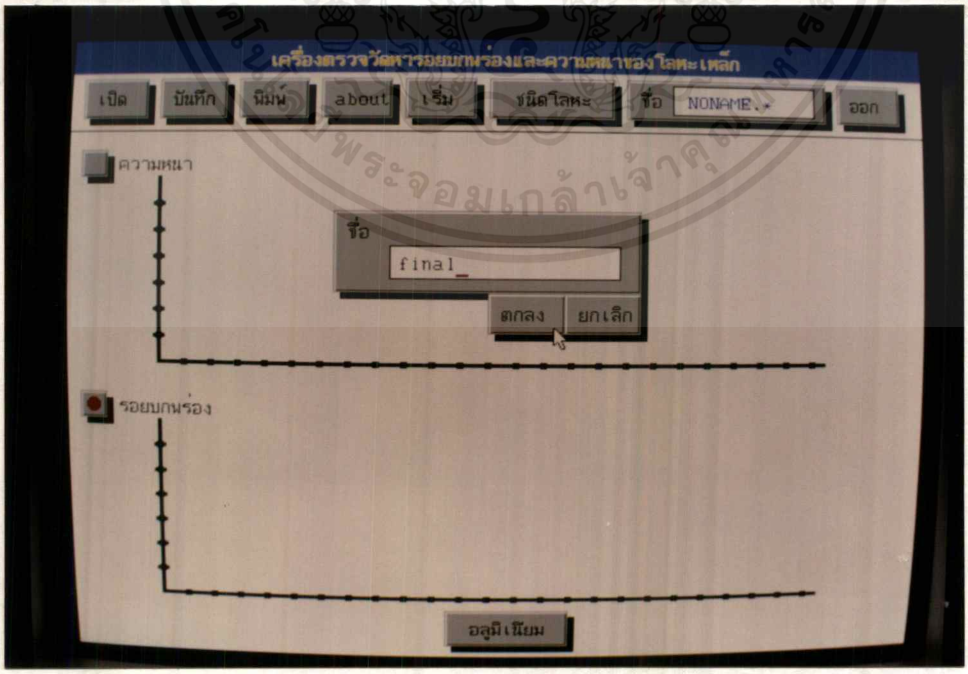


รูปที่ 4.9 การใช้เมนูเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

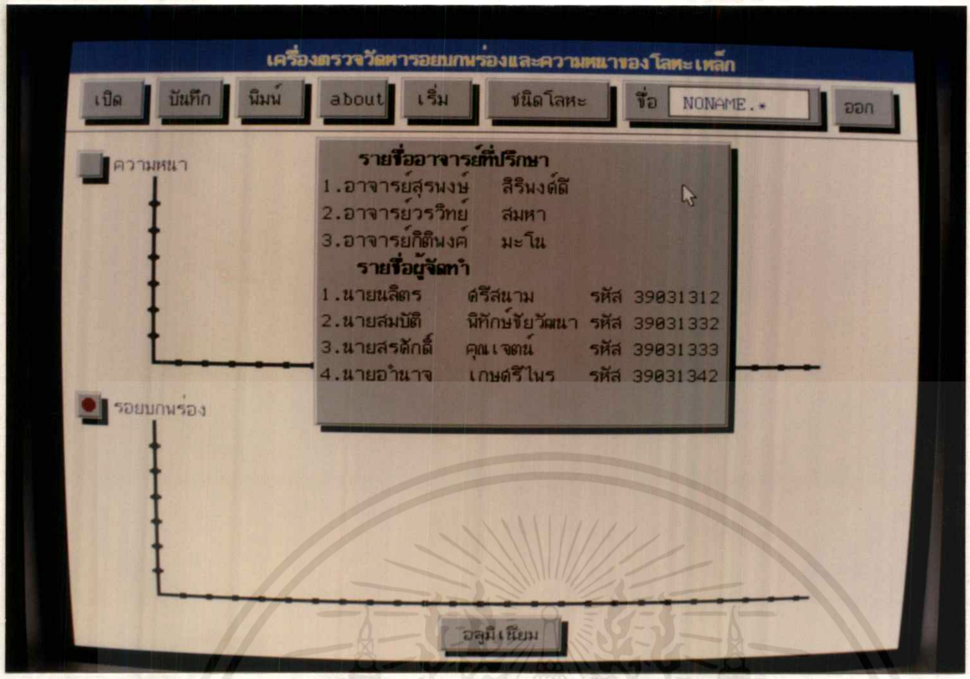


รูปที่ 4.10 การใช้เมนูย่อยของเมนูเปิด

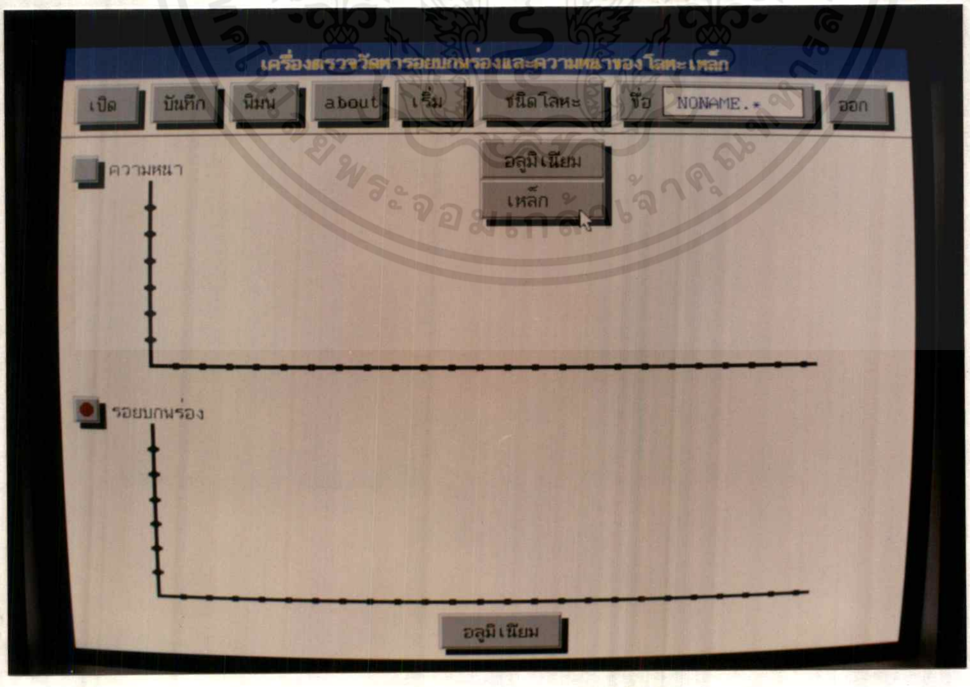


รูปที่ 4.11 การใช้เมนูบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

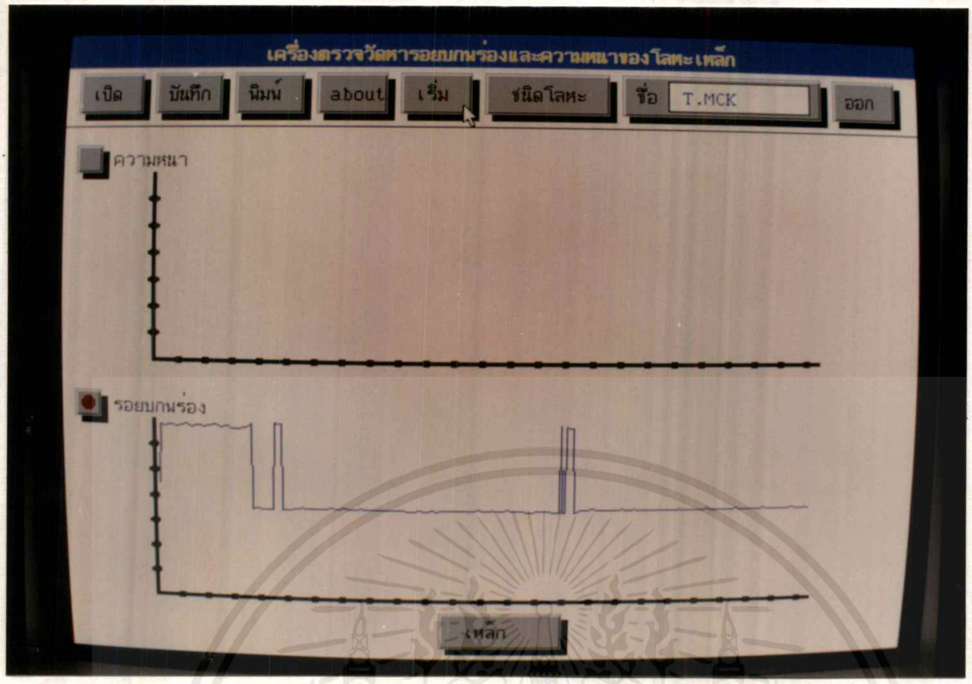


รูปที่ 4.12 การใช้เมนู ABOUT

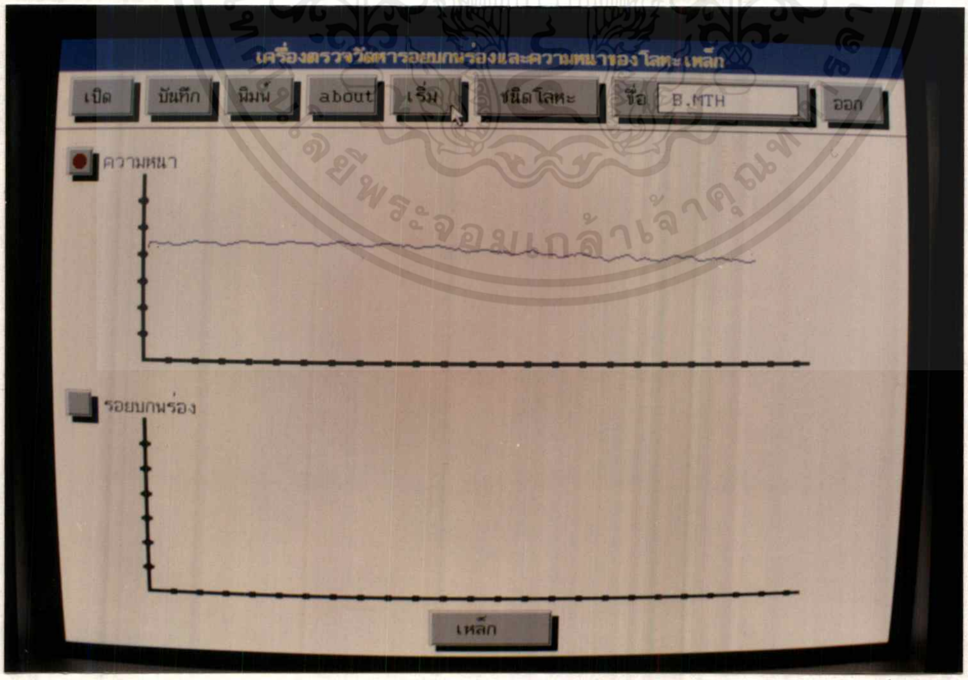


รูปที่ 4.13 การใช้เมนูชนิดของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การตรวจวัดรอยบกพร่อง



รูปที่ 4.15 การตรวจวัดความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5
บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา

5.1 บทสรุป

การจัดทำเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก (THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICKNESS DETECTOR) จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนผิวของโลหะเหล็กเพื่อจะใช้วิธีนี้ตรวจสอบคุณสมบัติของโลหะเหล็ก เช่น ความหนา , รอยบกพร่อง , รอยรั่ว เป็นต้น ในโครงงานนี้เราใช้โลหะเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 2 มิลลิเมตร ถึง 10 มิลลิเมตรสามารถตรวจหารอยบกพร่องของชิ้นงานทดสอบที่เป็นโลหะเหล็กและมีความลึกผิวประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยใช้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์เป็น 500 เฮิรตซ์ ถ้าเราลดความถี่ดังกล่าวจะสามารถวัดรอยบกพร่องภายใต้ผิว (Sub Surface) ของโลหะเหล็กได้เพิ่มขึ้น ถ้าเราเพิ่มความถี่ขึ้นก็จะได้ความลึกของผิวลโลหะเหล็กลดลง ในการทดลองเราได้ใช้โลหะเหล็กที่ได้ทำการตัดให้เป็นรอยแยก เพื่อจำลองให้เป็นลักษณะของรอยแยกผลที่ได้คือ เมื่อโพรบเลื่อนมาตรงตำแหน่งที่มีรอยแตกจะพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและเฟสเกิดขึ้นซึ่งเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ในกรณีของรอยบกพร่องที่มีลักษณะเป็นวงกลมที่ขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ ก็จะทำให้ความไวในการวัดลดลง ส่วนการตรวจสอบความหนาของโลหะเหล็กนั้น ถ้ามีความหนาที่แตกต่างกันระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นมีความแม่นยำและเชื่อถือได้สอดคล้องตามหลักการที่นำเสนอไว้ แต่ยังพบว่าโครงงานที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ และเพื่อให้เห็นคุณลักษณะของเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กดังกล่าวข้างต้น จึงขอสรุปขอบเขตและคุณลักษณะที่สำคัญไว้ดังนี้

1. สามารถหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กและอลูมิเนียมได้
2. สามารถบอกความแตกต่างของความหนาของโลหะเหล็กและอลูมิเนียมได้
3. สามารถตรวจหาโลหะเหล็กและอลูมิเนียมที่อยู่ภายในวัสดุที่ไม่เป็นโลหะได้
4. สามารถแสดงผลบนจอภาพของคอมพิวเตอร์และทางเครื่องพิมพ์ได้
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานวัดความหนาของโลหะเหล็กที่ซับซ้อนขึ้นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ปัญหา

การจัดทำเครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้พบปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

ด้านฮาร์ดแวร์ ไม่สามารถหาข้อมูลที่แน่นอนของการสร้างโพรบตรวจสอบซึ่งเกี่ยวกับขนาดของขดลวด , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเฟอร์ไรท์ , จำนวนรอบของขดลวดที่พันและการวัดความหนา ไม่สามารถระบุความหนาที่แน่นอนได้

ด้านซอร์พแวร์ ต้องศึกษาโปรแกรมภาษาซี ตั้งแต่พื้นฐานทั้งหมดและใช้โปรแกรม Borland C++ ไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องไวรัสได้

ส่วนของการทำปริญญานิพนธ์ การจัดพิมพ์ปริญญานิพนธ์มีความล่าช้าเนื่องจากการพิมพ์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่มีความชำนาญ และโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบเช่นโปรแกรมที่ใช้ในการวาดรูปไม่เคยศึกษามาก่อน ทำให้เสียเวลาในการศึกษาและไม่มีความชำนาญ

5.2.2 แนวทางแก้ไข

ทดลองสร้างโพรบตามทฤษฎีต่างๆ หลาย ๆ แบบโดยเลือกขดลวดขนาดต่างๆ มาพันให้มีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นไปจนกว่าจะได้ตามที่คำนวณ และทดลองเปลี่ยนแกนที่นำมาพันจากแกนเฟอร์ไรท์มาเป็นแกนเฟอร์โรแมกเนติกส่วนด้านซอฟต์แวร์ศึกษาภาษาซีได้ไม่ยากนักเพราะมีพื้นฐานในการเขียนโปรแกรมภาษา Pascal การใช้โปรแกรม Borland C++ ไม่ได้เปลี่ยนมาใช้โปรแกรม Turbo C 2.0 แทน ด้านการเขียนปริญญานิพนธ์ ไม่มีความชำนาญในการใช้โปรแกรม VISIO,MICR0SOFT WORD,POWERPOINT การใช้เครื่องพิมพ์ประเภทหัวเข็ม ทำให้การพิมพ์ปริญญานิพนธ์ใช้เวลามากแก้ไขโดยการศึกษารายละเอียดในคู่มือการใช้และเปลี่ยนเครื่องพิมพ์จากประเภทหัวเข็มเป็นประเภทหัวพ่นหมึก

5.3 แนวทางในการพัฒนา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้พยายามทำให้เครื่องตรวจวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็กมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ แต่ด้วยระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และงบประมาณที่จำกัด ประกอบกับประสบการณ์ของคณะผู้จัดทำในการทำงานยังไม่มากพอ จึงทำให้เครื่องยังมีข้อจำกัดและสมควรที่จะได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นได้อีกดังต่อไปนี้

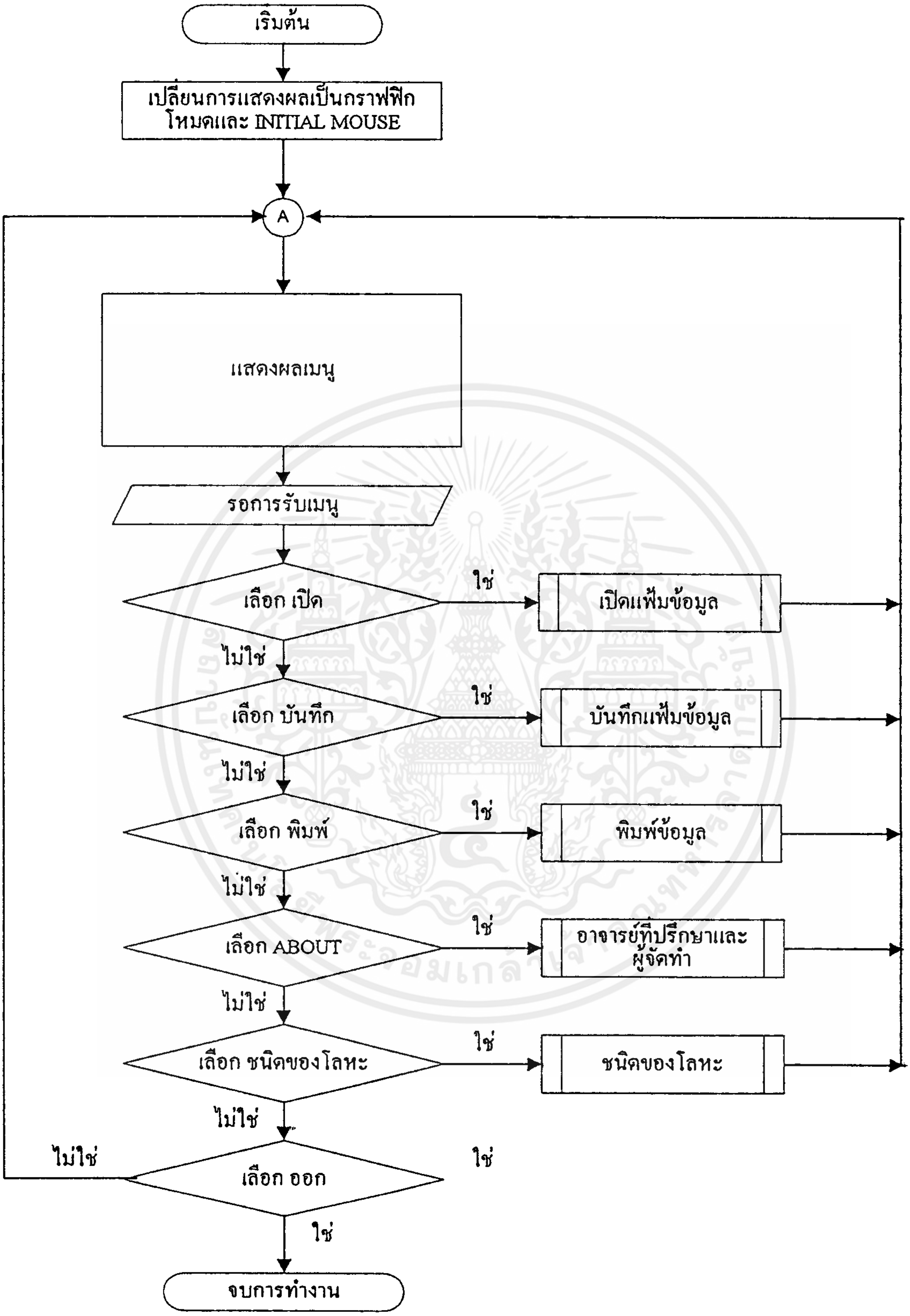
1. ควรทำให้โพรบมีขนาดเล็กลงเพื่อให้มีความไวในการตรวจสอบชิ้นงานมากยิ่งขึ้น
2. ควรทำให้สามารถใช้ร่วมกับ X-Y Ploter ได้เพื่อช่วยในการเลื่อนโพรบตรวจสอบชิ้นงานให้มีความละเอียดและแม่นยำในการตรวจสอบ
3. เพิ่มการ Caribrate ให้มีความละเอียดและมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น
4. ปรับปรุงให้สามารถหารูปร่างของรอยตำหนิได้
5. การวัดความหนาควรกำหนดแรงดันให้สอดคล้องกันความหนา และบันทึกไว้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

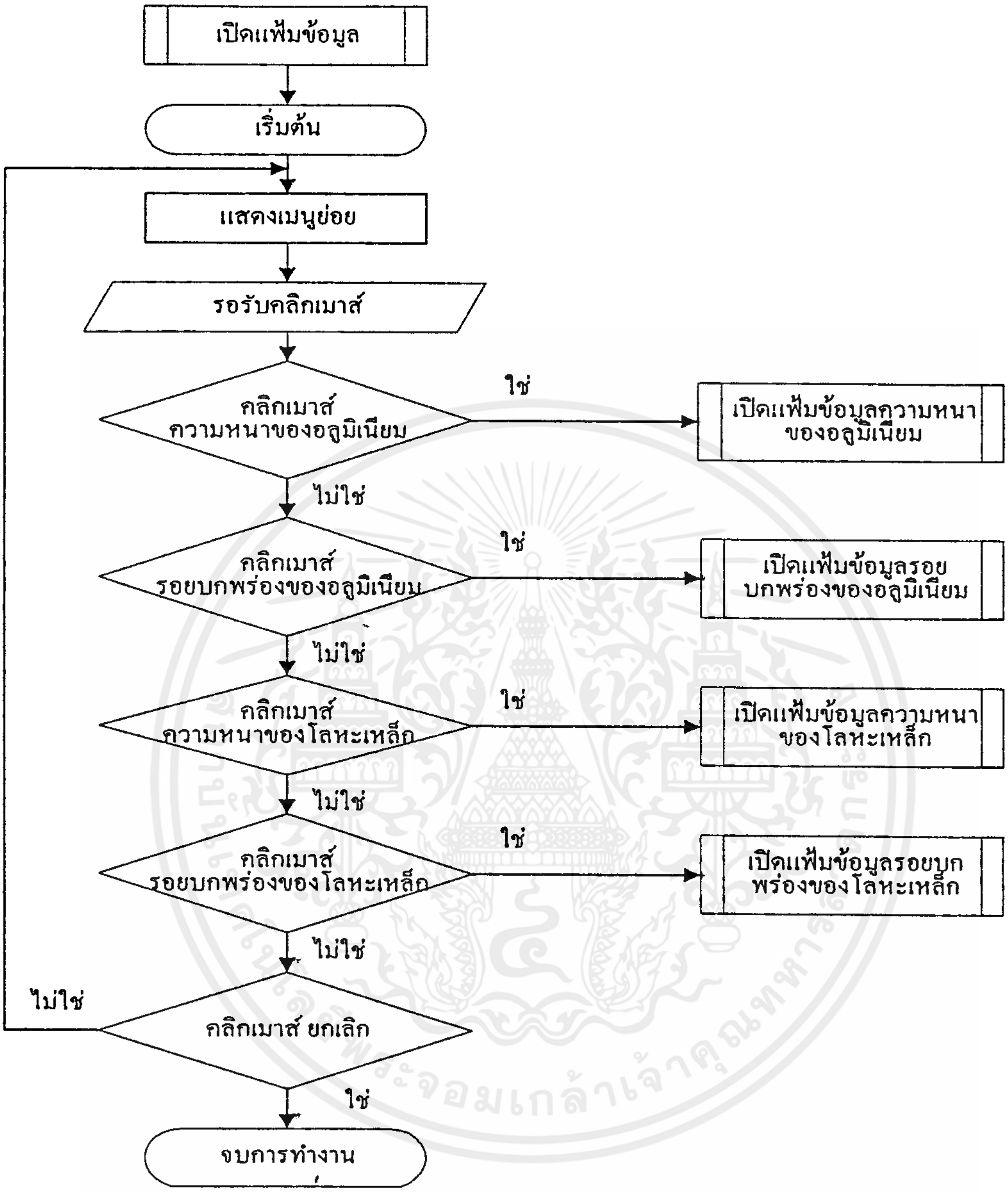
ผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



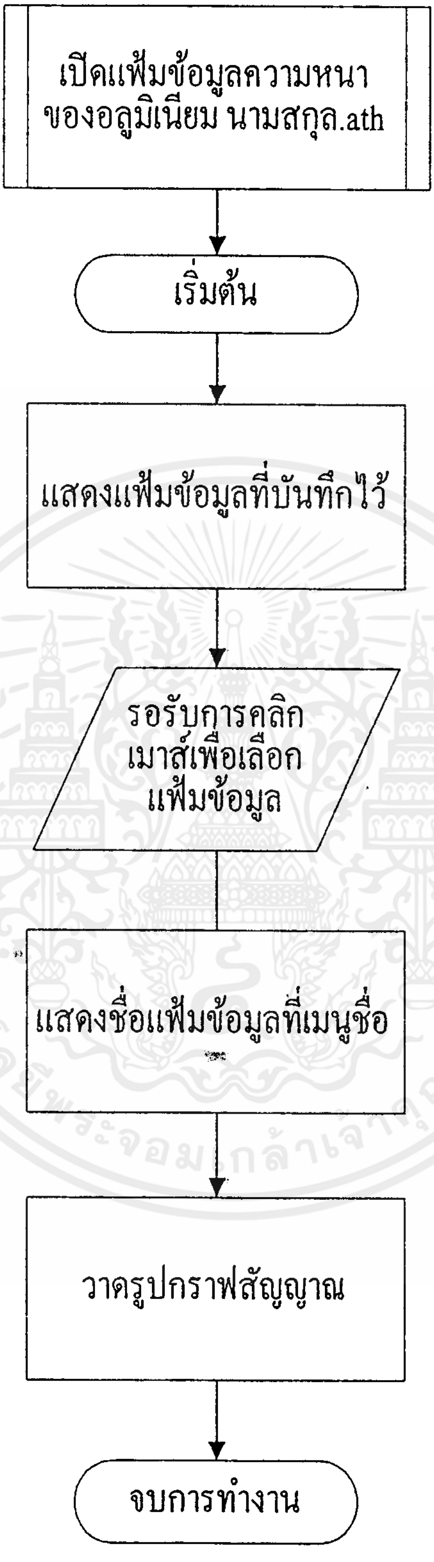
รูปที่ ก.1 ผังงานโปรแกรมเมนูหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



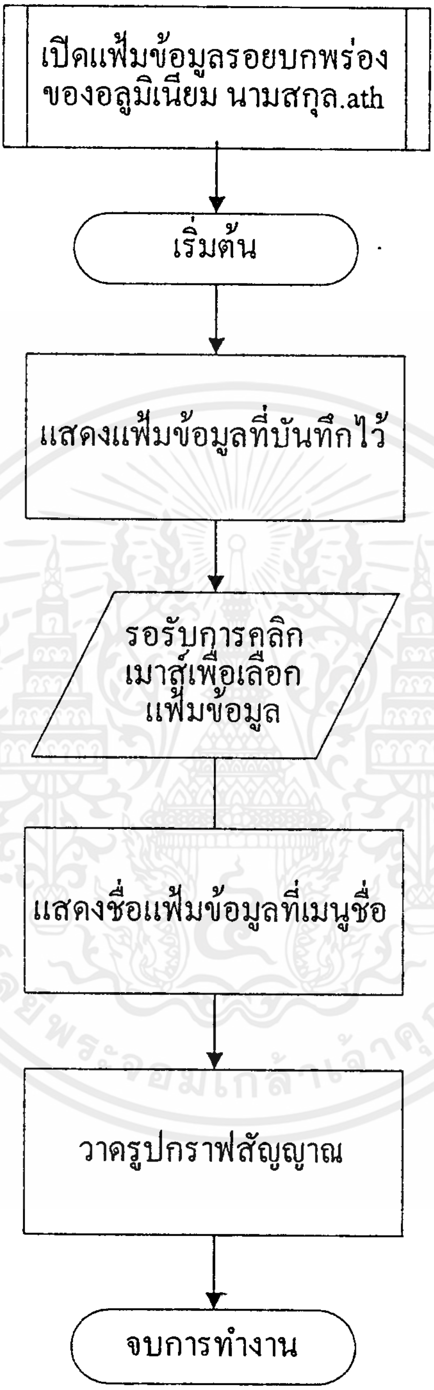
รูปที่ ก.2 ผังงานโปรแกรมเปิดแฟ้มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



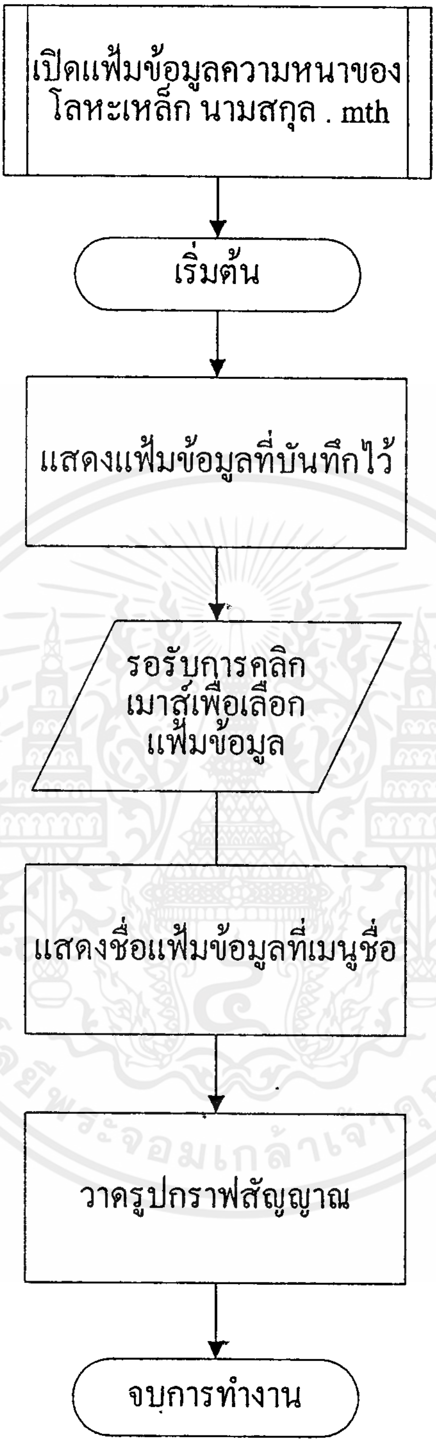
รูปที่ ก.3 ผังงานโปรแกรมเปิดแฟ้มข้อมูลความหนาของอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



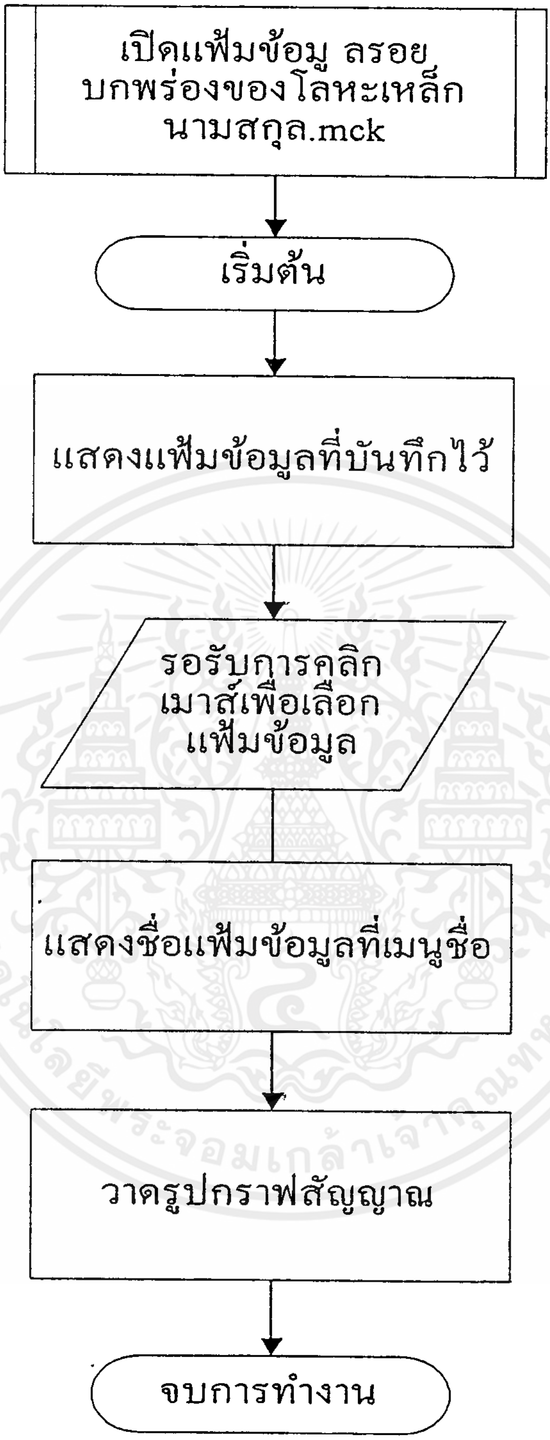
รูปที่ ก.4 ผังงานโปรแกรมเปิดแฟ้มข้อมูลรอยบกพร่องของอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



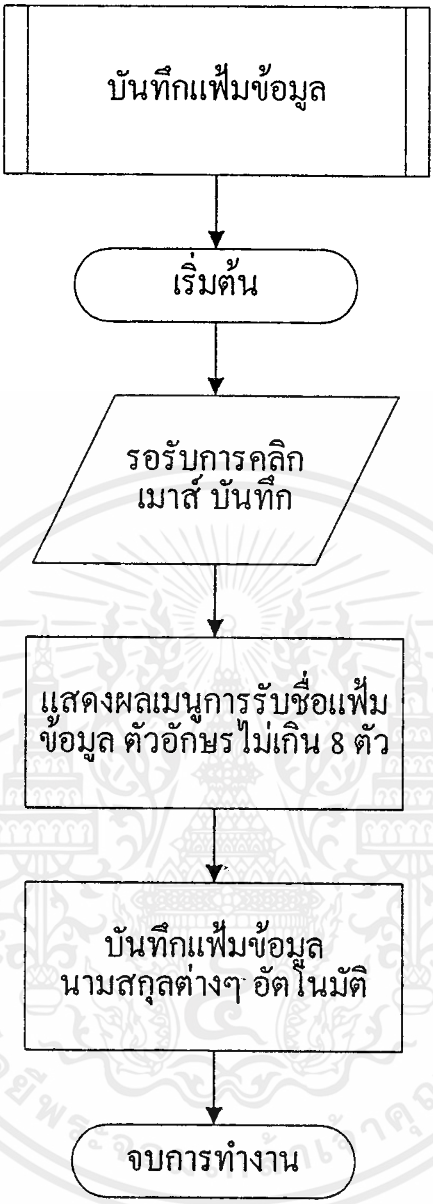
รูปที่ ก.5 ผังงานโปรแกรมเปิดแฟ้มข้อมูลความหนาของโลหะเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



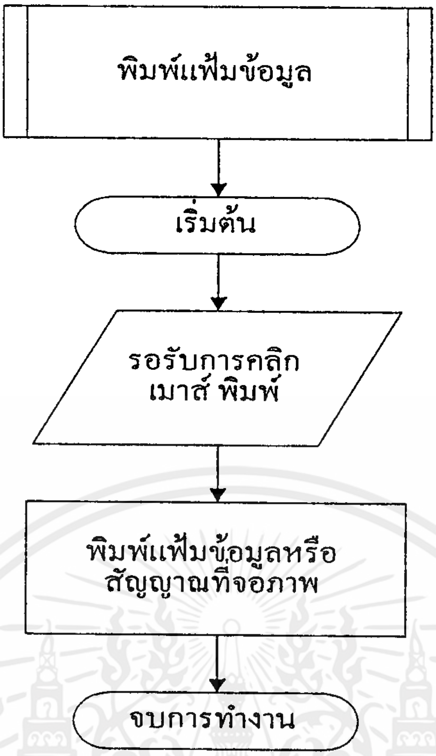
รูปที่ ก.6 ผังงานโปรแกรมเปิดแฟ้มข้อมูลรอยบกพร่องของโลหะเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



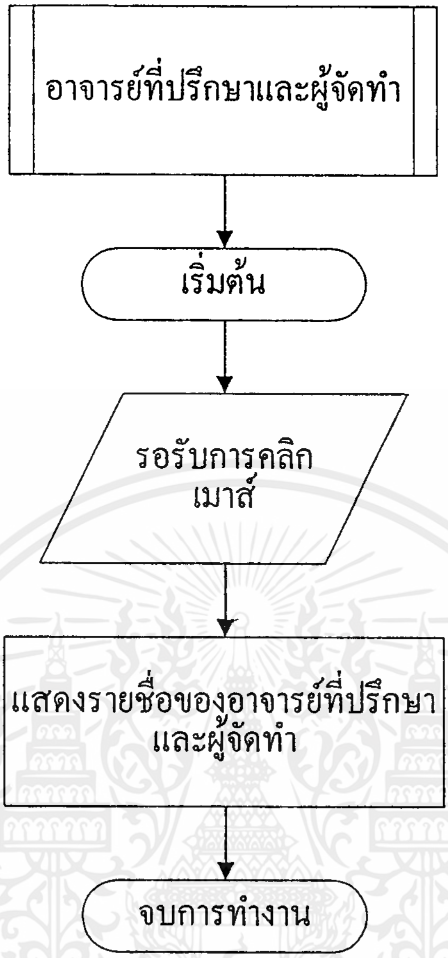
รูปที่ ก.7 ผังงานโปรแกรมบันทึกแฟ้มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



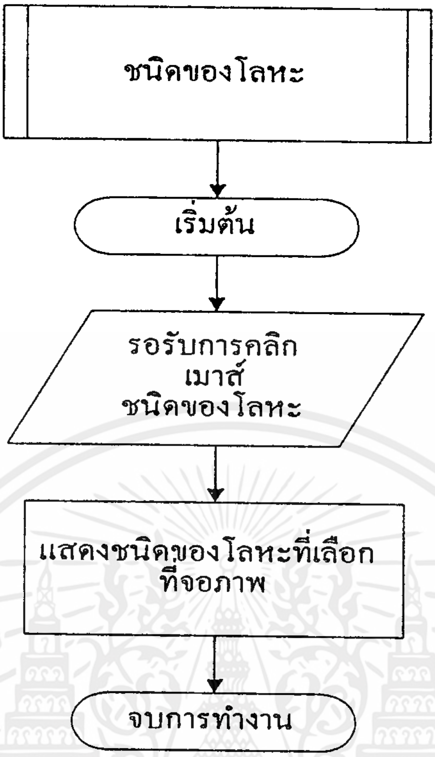
รูปที่ ก.8 ผังงานโปรแกรมพิมพ์แฟ้มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ผังงานโปรแกรมอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 ผังงานโปรแกรมชนิดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include<alloc.h>
#include<dos.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
#include<graphics.h>
#include<process.h>
#include<dir.h>

typedef struct nodetype{
            char data[80];
            struct nodetype *lp;
            struct nodetype *rp;
      }node;

node *hnode,*nnode,*wnode,*lnode;
int irq,idx=0,idx1=0,select=1,select2=1;
int int_num,old_8259_1,old_8259_2,c,number=0;
unsigned d1[5000],d2[5000];
char name[13];
FILE *f1;

void (interrupt far *old_intvect)();

static void set_clock(int rate)
{
 long count;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  unsigned clockrate;
  unsigned char cl1h,cl1l,cl2h,cl2l;

  count = 4000000/rate;
  count = (long)sqrt((float)count);
  clockrate = (unsigned)count;
  cl1l = (unsigned char)clockrate & 0xff;
  clockrate >>= 8;
  cl1h = (unsigned char)clockrate & 0xFF;
  cl2l = cl1l;
  cl2h = cl1h;

  outportb(0x300+ 15,0xB4);
  outportb(0x300+ 14,cl1l);
  outportb(0x300+ 14,cl1h);
  outportb(0x300+ 15,0x74);
  outportb(0x300+ 13,cl2l);
  outportb(0x300+ 13,cl2h);
}

void interrupt far int_routine0()
{
 short dmsb,dlsb;

 dmsb = inportb(0x300+1);
 dlsb = inportb(0x300+0);

 d1[idx]=(dmsb<<4)+(dlsb>>4);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 idx++;

 outportb(0x300+2,0);

 if(irq > 8)
   outportb(0xA0,0x20);
 outportb(0x20,0x20);
}

void interrupt far int_routine1()
{
 short dmsb,dlsb;

 dmsb = inportb(0x300+1);
 dlsb = inportb(0x300+0);

 d1[idx]=(dmsb<<4)+(dlsb>>4);
 idx++;

 outportb(0x300+2,1);

 if(irq > 8)
   outportb(0xA0,0x20);
 outportb(0x20,0x20);
}

struct MOUSETYPE {
        int x;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        int y;
        int status;
    };

void setcard0();
void setcard1();
void closecard();
void getpic(int x1,int y1,int x2,int y2);
void putpic(int x1,int y1);
void background();
void load();
void save();
void printer();
void about();
void start();
void metal();
void bb(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str);
void mouse_reset(void);
void mouse_display(void);
void mouse_hide(void);
void mouse_status(void);
void mouse_position(int x1,int y1,int x2,int y2);
void boxa(int x1,int y1,int x2,int y2);
void boxb(int x1,int y1,int x2,int y2);
void mouse_press(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str);
void mouse_press2(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str);
void drawfont(int x,int y,int color,int inchar);
char Fontpic[256][20];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
int loadfont(char filename[]);
void touttextxy(int x,int y,int color,unsigned char St[40]);
void getfile(char *finame);
void show();
node *newnode(void);
node *firstnode(node *head,char data[80]);
void insertnode(node *start,char data[80]);
void clearnode(void);

char *bkarea;

main()
{
 int gdriver = DETECT,gmode;
 struct MOUSETYPE m;
 int quit=1;

 initgraph(&gdriver,&gmode,"");
 if(!loadfont("normal.fon")) {
  setcolor(LIGHTMAGENTA);
  outtextxy(10,10,"No thaifont NORMAL.FON");
  exit(1);
 }

 mouse_reset(); mouse_position(0,0,630,462);
 background();

 do {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mouse_display();
mouse_status();
if(_BX==1)
 if ((_CX>10)&&(_CX<60)&&(_DX>30)&&(_DX<60))      load();
 else if((_CX>70)&&(_CX<120)&&(_DX>30)&&(_DX<60))        save();
 else if((_CX>130)&&(_CX<180)&&(_DX>30)&&(_DX<60))       printer();
 else if((_CX>190)&&(_CX<240)&&(_DX>30)&&(_DX<60))       about();
 else if((_CX>250)&&(_CX<300)&&(_DX>30)&&(_DX<60))       start();
 else if((_CX>310)&&(_CX<400)&&(_DX>30)&&(_DX<60))       metal();
 else if((_CX>570)&&(_CX<620)&&(_DX>30)&&(_DX<60)) {
     mouse_press(570,30,620,60,"ออก");
     quit=0;
 }
 else if((_CX>10)&&(_CX<30)&&(_DX>85)&&(_DX<105)) {
     mouse_press(10,85,30,105,"");
     mouse_hide();    setcolor(4);
     setfillstyle(1,4); sector(20,95,0,360,5,5);
     mouse_display();
     setfillstyle(1,7); bar(15,275,25,285);
     select2=1;
 }
 else if((_CX>10)&&(_CX<30)&&(_DX>270)&&(_DX<290)) {
     mouse_press(10,270,30,290,"");
  mouse_hide();    setcolor(4);
     setfillstyle(1,4); sector(20,280,0,360,5,5);
     mouse_display();
     setfillstyle(1,7); bar(15,90,25,100);
     select2=0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    }
  }while (quit);
  closegraph();
}

void setcard0()
{
  int clock_rate;

  irq=5;
  clock_rate=50;
  idx=idx1=74;

  outportb(0x300+15,0x34);
  outportb(0x300+12,0x36);
  outportb(0x300+12,0);

  set_clock(clock_rate);
  if(irq < 8)
    int_num = irq+8;
  else
    int_num = irq+0x68;

  old_intvect = getvect(int_num);
  setvect(int_num,int_routine0);

  old_8259_1 = inportb(0x21);
  old_8259_2 = inportb(0xA1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 if(irq < 8)
   outportb(0x21,old_8259_1 & !(1<irq));
 else
 {
   outportb(0x21,old_8259_1 & !(1<2));
   outportb(0xA1,old_8259_2 & !(1<(irq-8)));
 }
 outportb(0x300+2,0);
 outportb(0x300+3,0x05);
}

void setcard1()
{
 int clock_rate;

 irq=5;
 clock_rate=50;
 idx=idx1=74;

 outportb(0x300+15,0x34);
 outportb(0x300+12,0x36);
 outportb(0x300+12,0);

 set_clock(clock_rate);
 if(irq < 8)
   int_num = irq+8;
 else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  int_num = irq+0x68;

 old_intvect = getvect(int_num);
 setvect(int_num,int_routine1);

 old_8259_1 = inportb(0x21);
 old_8259_2 = inportb(0xA1);

 if(irq < 8)
   outportb(0x21,old_8259_1 & !(1<irq));
 else
 {
   outportb(0x21,old_8259_1 & !(1<2));
   outportb(0xA1,old_8259_2 & !(1<(irq-8)));
 }
 outportb(0x300+2,0);
 outportb(0x300+3,0x05);
}

void closecard()
{
 outportb(0x300+3,0x00);
 setvect(int_num,old_intvect);
 outport(0x21,old_8259_1);
 outport(0xA1,old_8259_2);
}

void getpic(int x1,int y1,int x2,int y2)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{
 bkarea=malloc(imagesize(x1,y1,x2,y2));
 getimage(x1,y1,x2,y2,bkarea);
}

void putpic(int x1,int y1)
{
 putimage(x1,y1,bkarea,COPY_PUT);
 free(bkarea);
}

void background()
{ int i;

 setfillstyle(1,15); bar(0,25,getmaxx(),getmaxy());
 setfillstyle(1,9);  bar(0,0,getmaxx(),25);
 setcolor(0);        line(0,70,getmaxx(),70);
 touttextxy(150,5,14,"เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก");
 touttextxy(151,5,14,"เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก");
 bb(10,30,60,60,"เปิด");    bb(70,30,120,60,"บันทึก");
 bb(130,30,180,60,"พิมพ์"); bb(190,30,240,60,"about");
 bb(250,30,300,60,"เริ่ม"); bb(310,30,400,60," ชนิดโลหะ");
 bb(410,30,560,60,"ชื่อ");
 setcolor(0); rectangle(444,34,551,56);
 setfillstyle(1,15); bar(445,35,550,55);
 touttextxy(455,35,1,"NONAME.*");
 bb(570,30,620,60,"ออก");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 setfillstyle(1,0);
 for(i=1;i<7;i++)  fillellipse(71,105+(i*20),5,3);
 for(i=1;i<25;i++) fillellipse(70+(i*20),245,5,3);
 bar(70,105,72,245); bar(70,244,560,246);
 for(i=1;i<7;i++) fillellipse(71,290+(i*20),5,3);
 for(i=1;i<25;i++) fillellipse(70+(i*20),430,5,3);
 bar(70,290,72,430); bar(70,429,560,431);
 bb(10,85,30,105,""); touttextxy(40,85,0,"ความหนา");
 setcolor(4); setfillstyle(1,4); sector(20,95,0,360,5,5);
 bb(10,270,30,290,""); touttextxy(40,270,0,"รอยบกพร่อง");
 bb(280,440,370,470," เหล็ก");
}

void load()
{
 char name[13];
 int q=1,q2=1;

 mouse_press(10,30,60,60,"เปิด");
 mouse_hide();
 getpic(10,75,210,310);
 sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
 bb(10, 75,200,104," รอยบกพร่องของอลูมิเนียม");
 bb(10,105,200,134," ความหนาของอลูมิเนียม");
 bb(10,135,200,164," รอยบกพร่องของโลหะเหล็ก");
 bb(10,165,200,194," ความหนาของโลหะเหล็ก");
 bb(10,195,200,224," ยกเลิก");
 mouse_display(); nosound();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mouse_position(10,75,200,224);
do { mouse_status();
 if(_BX==1)
   if((_DX>75)&&(_DX<104)) {
        mouse_press(10, 75,200,104," วัดความหนาของอลูมิเนียม");
        sprintf(name,"*.ack");
        mouse_hide();
        bb(280,440,370,470," อลูมิเนียม");
        mouse_display();
        select2=0; select=0; q=0;
   }
   else if((_DX>105)&&(_DX<134)) {
        mouse_press(10,105,200,134," รอยบกพร่องของอลูมิเนียม");
        sprintf(name,"*.ath");
        mouse_hide();
        bb(280,440,370,470," อลูมิเนียม");
        mouse_display();
        select2=1; select=0; q=0;
   }
   else if((_DX>135)&&(_DX<164)) {
        mouse_press(10,135,200,164," วัดความหนาของโลหะเหล็ก");
        sprintf(name,"*.mck");
        mouse_hide();
        bb(280,440,370,470," เหล็ก");
        mouse_display();
        select2=0; select=1; q=0;
   }
   else if((_DX>165)&&(_DX<194)) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        mouse_press(10,165,200,194," รอยบกพร่องของโลหะเหล็ก");
        sprintf(name,"*.mth");
        mouse_hide();
        bb(280,440,370,470," เหล็ก");
        mouse_display();
        select2=1; select=1;q=0;
    }
    else if((_DX>195)&&(_DX<224)) {
        mouse_press(10,195,200,224,"cancle");
        q=0; q2=0;
    }
} while(q);
mouse_hide();
putpic(10,75);
mouse_display();
mouse_position(0,0,630,462);
if(q2) {
 getfile(name);
 mouse_hide();

 if(!select2) {
  setcolor(4);
  setfillstyle(1,4); sector(20,280,0,360,5,5);
  setfillstyle(1,7); bar(15,90,25,100);
 } else
 if(select2) {
  setcolor(4);
  setfillstyle(1,4); sector(20,95,0,360,5,5);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    setfillstyle(1,7); bar(15,275,25,285);
   }
  mouse_display();
 }
}

void save()
{
 char getname[9]="",ch;
 int q=1,r=1,count1=0;

 mouse_press(70,30,120,60,"บันทึก");
 setfillstyle(1,1);
 getpic(180,130,430,231);
 mouse_hide();
 sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
 bb(200,130,420,190,"ชื่อ");
 setfillstyle(1,15); bar(240,156,405,180);
 setcolor(0); rectangle(240,156,405,180);
 bb(310,191,365,221,"ตกลง");  bb(365,191,420,221,"ยกเลิก");
 mouse_display(); nosound();
 setcolor(4); line(247+(count1*8),178,255+(count1*8),178);
 line(247+(count1*8),177,255+(count1*8),177);
 do {
  ch=getch();
  if((ch>0x60)&&(ch<0x7b)) {
   if(count1<8) {
      getname[count1]=ch;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      mouse_hide();
      setfillstyle(1,15); bar(241,157,404,179);
      touttextxy(247,158,0,getname);
      mouse_display();
   }
   count1++;
   if(count1>8) count1=8;
   setcolor(4); line(247+(count1*8),178,255+(count1*8),178);
   line(247+(count1*8),177,255+(count1*8),177);
  }
}while(ch!=0x0d);
sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
nosound();
do {
 mouse_status();
 if(_BX==1)
   if((_CX>310)&&(_CX<365)&&(_DX>191)&&(_DX<221)) {
      mouse_press(310,191,365,221,"ตกลง");
      sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
      if(strlen(getname)!=NULL) {
       if((!select)&&(!select2))      strcat(&getname,".ack");
       else if((!select)&&(select2))   strcat(&getname,".ath");
       else if((select)&&(!select2))   strcat(&getname,".mck");
       else if((select)&&(select2))    strcat(&getname,".mth");
       setfillstyle(1,15);  bar(445,35,550,55);
       strupr(&getname);
       touttextxy(453,35,1,getname);
      }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        q=0; nosound(); r=0;
     }
     else if((_CX>365)&&(_CX<420)&&(_DX>191)&&(_DX<221)) {
        mouse_press(365,191,420,221,"ยกเลิก");
        q=0; sprintf(getname,"");
     }
  } while(q);
  if((!r)&&(number)) {
   if((f1=fopen(getname,"w+t"))== NULL)
    fprintf(stderr,"Cannot open the file.\n");

   for(count1=0;count1<(number-1);count1++) {
        fprintf(f1,"%d\n",d2[count1]);
   }

   if(fclose(f1)!=NULL)
    fprintf(stderr,"Cannot close the file.\n");
  }
  mouse_hide();
  putpic(180,130);
  mouse_display();
}

void printer()
{
  int xx,yy;

  mouse_press(130,30,180,60,"พิมพ์");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mouse_hide();
setfillstyle(1,0);  bar(0,0,getmaxx(),25);
touttextxy(150,5,15,"เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก");
touttextxy(151,5,15,"เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก");
for(yy=25;yy<480;yy++)
  for(xx=0;xx<640;xx++)
    if((getpixel(xx,yy)==0)||(getpixel(xx,yy)==1)
          ||(getpixel(xx,yy)==4))
         putpixel(xx,yy,15);
    else putpixel(xx,yy,0);
if(select2)  {
  if(!select)  touttextxy(96,85,15,"ของ อลูมิเนียม");
  else if(select)  touttextxy(96,85,15,"ของ เหล็ก");
  mouse_display();
  do{ mouse_status(); }while(_BX!=1);
  geninterrupt(0x05);
}
else if(!select2)  {
  if(!select)  touttextxy(96,85,15,"ของ อลูมิเนียม");
  else if(select)  touttextxy(96,85,15,"ของ เหล็ก");
  do{ mouse_status(); }while(_BX!=1);
  geninterrupt(0x05);
}
mouse_hide();
background();
if(!select2) {
  setcolor(4);
  setfillstyle(1,4); sector(20,280,0,360,5,5);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  setfillstyle(1,7); bar(15,90,25,100);
 } else
 if(select2) {
  setcolor(4);
  setfillstyle(1,4); sector(20,95,0,360,5,5);
  setfillstyle(1,7); bar(15,275,25,285);
 }
 if(!select)  bb(280,440,370,470," อลูมิเนียม");
 else if(select) bb(280,440,370,470," เหล็ก");
 mouse_display();
}

void about()
{
 mouse_press(190,30,240,60,"about");
 mouse_hide();
 getpic(190,75,500,300);
 mouse_display();
 bb(190,75,490,290,"");
 sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
 touttextxy(220,80,0,"รายชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา");
 touttextxy(221,80,0,"รายชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา");
 touttextxy(195,100,0,"1.อาจารย์สุรพงษ์  สิริพงศ์ดี");
 touttextxy(195,120,0,"2.อาจารย์วรวิทย์  สมหา");
 touttextxy(195,140,0,"3.อาจารย์กิติพงค์  มะโน");
 touttextxy(220,160,0,"รายชื่อผู้จัดทำ");
 touttextxy(221,160,0,"รายชื่อผู้จัดทำ");
 touttextxy(195,180,0,"1.นายนลิตร   ศรีสนาม   รหัส 39031312");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 touttextxy(195,200,0,"2.นายสมบัติ   พิทักษ์ชัยวัฒนา รหัส 39031332");
 touttextxy(195,220,0,"3.นายสรศักดิ์  คุณเจตน์    รหัส 39031333");
 touttextxy(195,240,0,"4.นายอำนาจ  เกษศรีไพร  รหัส 39031342");
 nosound();
 do { mouse_status(); } while(_BX!=1);
 mouse_hide();
 putpic(190,75);
 mouse_display();
}

void start()
{
 mouse_press(250,30,300,60,"หยุด");
 number=0;
 if((!select)&&(!select2))      setcard0();
 else if((!select)&&(select2))  setcard0();
 else if((select)&&(!select2))  setcard1();
 else if((select)&&(select2))   setcard0();
 setcolor(1);  setfillstyle(1,15);
 if(select2) { bar(75,105,560,242); moveto(75,160); }
 else if(!select2) { bar(75,290,560,427); moveto(75,340); }
 do {
  mouse_status();
  if(idx>=558) {
   setfillstyle(1,15);
   if(select2) {
        bar(75,105,560,242);
        if(select) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if((getmaxy()-(d1[c]>>3)+100)<241)
   moveto(75,getmaxy()-(d1[c]>>3)+100);
    else moveto(75,241);
   }
   else if(!select) {
    if((255-(d1[c]/10))>105) moveto(75,255-d1[c]/10);
    else if((255-(d1[c]/10))<=105) moveto(75,241);
   }
 }
 else if(!select2) {
      bar(75,290,560,427);
      if(select)  moveto(75,420-d1[c]/50);
      else if(!select) {
       if(((d1[c]/10+278)>424)) moveto(75,425);
       else moveto(75,d1[c]/10+278);
      }
 }
 idx1=75; idx=75;
}
if(idx1<idx) {
 for(c=idx1;c<idx;c++) {
  if(number>4000)  number=0;
     else number++;
     d2[number]=d1[c];
     if(select) {
      if(select2) {
       if((getmaxy()-(d1[c]>>3)+100)<241)
        lineto(c+2,getmaxy()-(d1[c]>>3)+100);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          else lineto(c+2,241);
         }
         else if(!select2) {
          if((d1[c]>=0)&&(d1[c]<1500))
           lineto(c+2,423-d1[c]/50);
          else if((d1[c]>=1500)&&(d1[c]<3200))
           lineto(c+2,423-d1[c]/24);
          else if(d1[c]>=3200)
           lineto(c+2,423-d1[c]/50);
         }
        }
        else if(!select) {
         if(select2)  {
          if((255-(d1[c]/10))>105) lineto(c+2,255-d1[c]/10);
          else if((255-(d1[c]/10))<=105) lineto(c+2,241);
         }
        else if(!select2) {
            if(((d1[c]/10+278)>424))
                  lineto(c+2,425);
            else lineto(c+2,d1[c]/10+278);
           }
        }
    }
    idx1=idx;
   }
  } while((_BX!=1));
  mouse_press(250,30,300,60,"เริ่ม");
  closecard();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
}

void metal()
{
 int quit=0;

 mouse_press(310,30,400,60," ชนิดโลหะ");
 mouse_hide();
 getpic(310,75,410,310);
 sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
 bb(310,75,400,104," อลูมิเนียม");
 bb(310,105,400,134," เหล็ก");
 mouse_display(); nosound();
 mouse_position(310,75,400,130);
 setfillstyle(1,1);
 do {
  mouse_status();
  if(_BX==1)
   if((_DX>75)&&(_DX<104)) {
      mouse_press(310,75,400,104," อลูมิเนียม");
      bb(280,440,370,470," อลูมิเนียม");
      select=0; quit=1;
   }
   else
   if((_DX>105)&&(_DX<134)) {
      mouse_press(310,105,400,134," เหล็ก");
    bb(280,440,370,470," เหล็ก");
      select=1; quit=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    }
  } while(!quit);
  mouse_hide();
  putpic(310,75);
  mouse_display();
  mouse_position(0,0,630,462);
}

void bb(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str)
{
  setfillstyle(1,0);
  bar(x1+5,y1+5,x2+5,y2+5);
  boxa(x1,y1,x2,y2);
  touttextxy(x1+10,y1+5,0,str);
}

void mouse_position(int x1,int y1,int x2,int y2)
{
  _CX = x1;
  _DX = x2;
  _AX = 0x07;
  geninterrupt(0x33);
  _CX = y1;
  _DX = y2;
  _AX = 0x08;
  geninterrupt(0x33);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void mouse_reset(void)
{
  _AX = 0x0000;
  geninterrupt(0x33);
}

void mouse_display(void)
{
  _AX = 0x0001;
  geninterrupt(0x33);
}

void mouse_hide(void)
{
  _AX = 0x0002;
  geninterrupt(0x33);
}

void mouse_status(void)
{
  _AX = 0x0003;
  geninterrupt(0x33);
}

void boxa(int x1,int y1,int x2,int y2)
{
  setfillstyle(1,7);
  bar(x1,y1,x2,y2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 setcolor(DARKGRAY);
 line(x1+1,y2-1,x2-1,y2-1); line(x2-1,y2-1,x2-1,y1+1);
 setcolor(15);
 line(x1+1,y1+1,x2-1,y1+1);
 line(x1+1,y1+1,x1+1,y2-1);
}

void boxb(int x1,int y1,int x2,int y2)
{
 setfillstyle(1,7);
 bar(x1,y1,x2,y2);
 setcolor(15);
 line(x1+1,y2-1,x2-1,y2-1);
 line(x2-1,y2-1,x2-1,y1+1);
 setcolor(DARKGRAY);
 line(x1+1,y1+1,x2-1,y1+1);
 line(x1+1,y1+1,x1+1,y2-1);
}

void mouse_press(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str)
{
 mouse_hide();
 boxb(x1,y1,x2,y2);
 touttextxy(x1+10,y1+6,0,str);
 mouse_display();
 delay(500);
 mouse_hide();
 boxa(x1,y1,x2,y2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 touttextxy(x1+10,y1+5,0,str);
 mouse_display();
}

void mouse_press2(int x1,int y1,int x2,int y2,unsigned char *str)
{
 mouse_hide();
 boxb(x1,y1,x2,y2);
 touttextxy(x1+4,y1+3,0,str);
 mouse_display();
 delay(500);
 mouse_hide();
 boxa(x1,y1,x2,y2);
 touttextxy(x1+3,y1+2,0,str);
 mouse_display();
}

void drawfont(int x,int y,int color,int inchar)
{
 int i,j;
 for(i=0;i<20;i++)
  for(j=0;j<8;j++)
   if(((Fontpic[inchar][i]>>(7-j))&1))
      putpixel(x+j,y+i,color);
}

int loadfont(char filename[])
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 FILE *tfile;
 if((tfile=fopen(filename,"rb"))==NULL) return 0;
 fread(&Fontpic,5120,1,tfile);
 return 1;
}

void touttextxy(int x,int y,int color,unsigned char St[40])
{
 int count=0,a=0,test;

 while((St[count]!=0)&(count<128)) {
  test=(int)St[count];
  if((test==209)||((test>211)&&(test<220))||
    ((test>230)&&(test<239)))
    drawfont(x+a-8,y,color,test);
  else {
    drawfont(x+a,y,color,test);
    a+=8;
  }
  count++;
 }
}

void getfile(char *finame)
{
 struct ffblk blk;
 int done,not=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
hnode = NULL;
wnode = hnode;

done=findfirst(finame,&blk,0);
if(!done) not=0;
while(!done) {
  if(hnode==NULL)  {
    hnode=firstnode(hnode,blk.ff_name);
    wnode=hnode;
  }
  else {
    insertnode(wnode,blk.ff_name);
    while(wnode->rp!=NULL) wnode=wnode->rp;
  }
  done=findnext(&blk);
}
mouse_hide();
getpic(10,75,150,280);
sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
bb(10,75,120,270,"");
bb(120,75,140,95,"");     bb(120,95,140,115,"");
touttextxy(123,77,0,"ขึ้น"); touttextxy(123,97,0,"ลง");
nosound();
mouse_display();
if(!not) show();
else if(not) {
  mouse_hide();
  touttextxy(15,77,0,"no file!");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    mouse_display();
    do{ mouse_status(); }while(_BX!=1);
    mouse_hide();
    putpic(10,75);
    mouse_display();
  }
}

void show()
{
 int i=20,j=1,y=1,temp=0,up=1,exit=0;
 int tm,count1,e;
 char dat[80],ch;
 node *a;

 a=wnode=hnode;
 do {
  mouse_status();

  j=1;
  while(a!=NULL) {
   mouse_hide();
   if(a==wnode) touttextxy(i,j*20+60,4,a->data);
   else touttextxy(i,j*20+60,0,a->data);
   a=a->rp; j++; mouse_display();
   if(j>9) a=NULL;
  }
  if(_BX==1) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 if((_CX>120)&&(_CX<140)&&(_DX>75)&&(_DX<95)) {
      mouse_press2(120,75,140,95,"ขึ้น");
      if(wnode->lp!=NULL) {
        wnode=wnode->lp;  y--;
        if(y<1)  { y=1; up--; }
      }
 }
 else if((_CX>120)&&(_CX<140)&&(_DX>95)&&(_DX<115)) {
      mouse_press2(120,95,140,115,"ลง");
      if(wnode->rp!=NULL) {
        wnode=wnode->rp; y++;
        if(y>9) { y=9; up++; }
      }
 }
 else { _BX=2; exit=1; }
 setfillstyle(1,7);  bar(12,77,118,268);
 a=hnode; temp=up;
 while(up!=1) { a=a->rp; up--; }
 up = temp;
}
}while((_BX!=2)&&(!exit));
if(!exit) {
  sound(5000);delay(1000);sound(1000);delay(500);sound(500);delay(100);
  strcpy(&name,&wnode->data);
  setfillstyle(1,15);  bar(445,35,550,55);
  touttextxy(455,35,1,name);
  mouse_hide();
  putpic(10,75);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
setcolor(1);  setfillstyle(1,15);
if(select2) { bar(75,105,560,242); moveto(75,160); }
else if(!select2) { bar(75,290,560,427); moveto(75,340); }
nosound(); mouse_display();

if((f1=fopen(name,"r+t"))==  NULL)
  fprintf(stderr,"Cannot open the file.\n");
fseek(f1,0L,0);
count1=0;
while((fscanf(f1,"%d",&tm))!=EOF) {
 ++count1;
      if(select) {
        if(select2) {
          if((getmaxy()-(tm/10))<241)
               lineto(count1+75,getmaxy()-(tm/10));
          else lineto(count1+75,241);
        }
        else if(!select2) {
          if((tm>=0)&&(tm<1500))
               lineto(count1+75,423-tm/50);
          else if((tm>=1500)&&(tm<3100))
               lineto(count1+75,423-tm/24);
          else if(tm>=3100)
               lineto(count1+75,423-tm/50);
        }
      }
      else if(!select) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      if(select2) {
        if((255-(tm/10))>105) lineto(count1+75,255-tm/10);
        else if((255-(tm/10))<=105) lineto(count1+75,231);
      }
      else if(!select2) {
        if((tm/10+278)>424) lineto(count1+75,425);
        else lineto(count1+75,tm/10+278);.
      }
    }
    delay(100);     e=1;
    if(count1==480) {
      do{
        mouse_status();
        if(_BX==1)
            if((_CX>130)&&(_CX<180)&&(_DX>30)&&(_DX<60)) {
              e=0;printer();
            }
        else { e=0; }
      }while(e);
  setfillstyle(1,15);
      if(select2) {
        bar(75,105,560,242);
        if(select) {
            if((getmaxy()-(tm>>3)+100)<241)
              moveto(75,getmaxy()-(tm>>3)+100);
            else moveto(75,241);
        }
        else if(!select) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                if((255-(tm/10))>105) moveto(75,255-tm/10);
                else if((255-(tm/10))<=105) moveto(75,241);
              }
          }
          else if(!select2) {
              bar(75,290,560,427);
              if(select)  moveto(75,420-tm/50);
              else if(!select) {
                if(((tm/10+278)>424)) moveto(75,425);
                else moveto(75,tm/10+278);
              }
          }
          count1=0;
        }
   }
   if(fclose(f1)!=NULL)   fprintf(stderr,"Cannot close the file.\n");
  } else { mouse_hide(); putpic(10,75); mouse_display(); }
  clearnode();
}

node *newnode(void)
{
  return(node *)malloc(sizeof(node));
}

node *firstnode(node *head,char data[80])
{
  head        = newnode();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 sprintf(head->data,data);
 head->lp   = NULL;
 head->rp   = NULL;
 return head;
}

void insertnode(node *start,char data[80])
{
 node *newn;

 newn       = newnode();
 sprintf(newn->data,data);
 if(start->rp==NULL)  newn->rp=NULL;
 else {
   newn->rp=start->rp;
   newn->rp->lp=newn;
 }
 newn->lp  = start;
 start->rp = newn;
}

void clearnode(void)
{
 wnode = hnode;
 nnode = wnode->rp;
 while(wnode!=NULL)  {
   free(wnode);
   wnode = nnode;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  nnode = nnode->rp;
 }
}□
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

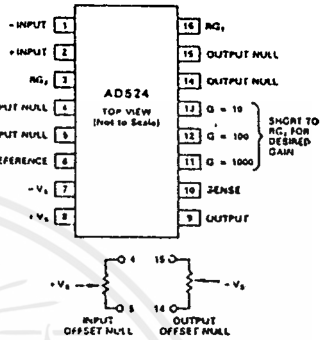
ANALOG DEVICES

Precision Instrumentation Amplifier

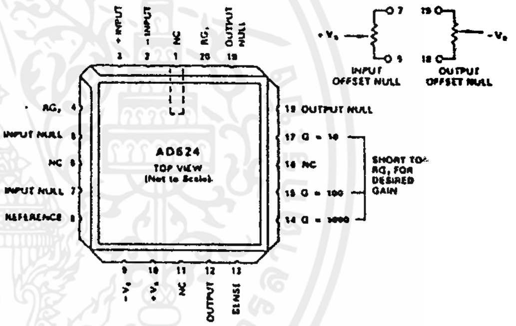
AD524

FEATURES
- Low Noise: 0.3μV p-p 0.1Hz to 10Hz
- Low Nonlinearity: 0.003% (G = 1)
- High CMRR: 120dB (G = 1000)
- Low Offset Voltage: 50μV
- Low Offset Voltage Drift: 0.5μV/°C
- Gain Bandwidth Product: 25MHz
- Pin Programmable Gains of 1, 10, 100, 1000
- Input Protection, Power On – Power Off
- No External Components Required
- Internally Compensated
- MIL-STD-883B, Chips, and Plus Parts Available
- 16-Pin Ceramic DIP and SOIC Packages and 20-Terminal Leadless Chip Carriers Available
- Available in Tape and Reel in Accordance with EIA-481A Standard
- Standard Military Drawing Also Available

CONNECTION DIAGRAMS
Ceramic (D) and
SOIC (R) Packages



Leadless Chip Carrier (E) Package



PRODUCT DESCRIPTION

The AD524 is a precision monolithic instrumentation amplifier designed for data acquisition applications requiring high accuracy under worst-case operating conditions. An outstanding combination of high linearity, high common mode rejection, low offset voltage drift, and low noise makes the AD524 suitable for use in many data acquisition systems.

The AD524 has an output offset voltage drift of less than 25μV/°C, input offset voltage drift of less than 0.5μV/°C, CMR above 90dB at unity gain (120dB at G = 1000) and maximum nonlinearity of 0.003% at G = 1. In addition to the outstanding dc specifications the AD524 also has a 25MHz gain bandwidth product (G = 100). To make it suitable for high speed data acquisition systems the AD524 has an output slew rate of 5V/μs and settles in 15μs to 0.01% for gains of 1 to 100.

As a complete amplifier the AD524 does not require any external components for fixed gains of 1, 10, 100 and 1,000. For other gain settings between 1 and 1000 only a single resistor is required. The AD524 input is fully protected for both power on and power off fault conditions.

The AD524 IC instrumentation amplifier is available in four different versions of accuracy and operating temperature range. The economical "A" grade, the low drift "B" grade and lower drift, higher linearity "C" grade are specified from −25°C to +85°C. The "S" grade guarantees performance to specification over the extended temperature range −55°C to +125°C. Devices are available in 16-pin ceramic DIP and SOIC packages and a 20-terminal leadless chip carrier.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD524 has guaranteed low offset voltage, offset voltage drift and low noise for precision high gain applications.
2. The AD524 is functionally complete with pin programmable gains of 1, 10, 100 and 1000, and single resistor programmable for any gain.
3. Input and output offset nulling terminals are provided for very high precision applications and to minimize offset voltage changes in gain ranging applications.
4. The AD524 is input protected for both power on and power off fault conditions.
5. The AD524 offers superior dynamic performance with a gain bandwidth product of 25MHz, full power response of 75kHz and a settling time of 15μs to 0.01% of a 20V step (G = 100).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524 — SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15V$, $R_L = 2k\Omega$ and $T_A = +25°C$ unless otherwise noted)

Model	AD524A Min	AD524A Typ	AD524A Max	AD524B Min	AD524B Typ	AD524B Max	AD524C Min	AD524C Typ	AD524C Max	AD524S Min	AD524S Typ	AD524S Max	Units
GAIN													
Gain Equation													
(External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1\right] \cdot 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1\right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1\right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1\right] \pm 20\%$			
Gain Range (Pin Programmable)	1 to 1000			1 to 1000			1 to 1000			1 to 1000			
Gain Error													
G = 1			±0.05			±0.03			±0.02			±0.05	%
G = 10			±0.25			±0.15			±0.1%			±0.25	%
G = 100			±0.5			±0.35			±0.25			±0.5	%
G = 1000			±2.0			±1.0			±0.5			±2.0	%
Nonlinearity													
G = 1			±0.01			±0.005			±0.003			±0.01	%
G = 10, 100			±0.01			±0.005			±0.003			±0.01	%
G = 1000			±0.01			±0.01			±0.01			±0.01	%
Gain vs. Temperature													
G = 1			5			5			5			5	ppm/°C
G = 10			15			10			10			10	ppm/°C
G = 100			35			25			25			25	ppm/°C
G = 1000			100			50			50			50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)													
Input Offset Voltage			250			100			50			100	µV
vs. Temperature			2			0.75			0.5			2.0	µV/°C
Output Offset Voltage			5			3			2.0			3.0	mV
vs. Temperature			100			50			25			50	µV/°C
Offset Referred to the Input vs. Supply													
G = 1	70			75			80			75			dB
G = 10	85			95			100			95			dB
G = 100	95			105			110			105			dB
G = 1000	100			110			115			110			dB
INPUT CURRENT													
Input Bias Current			±50			±25			±15			±50	nA
vs. Temperature		±100			±100			±100			±100		pA/°C
Input Offset Current			±35			±15			±10			±35	nA
vs. Temperature		±100			±100			±100			±100		pA/°C
INPUT													
Input Impedance													
Differential Resistance		10^9			10^9			10^9			10^9		Ω
Differential Capacitance		10			10			10			10		pF
Common Mode Resistance		10^9			10^9			10^9			10^9		Ω
Common Mode Capacitance		10			10			10			10		pF
Input Voltage Range													
Max Differ. Input Linear (V_{DL})[1]	±10			±10			±10			±10			V
Max Common Mode Linear (V_{CM})	$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			V
Common Mode Rejection dc to 60Hz with 1kΩ Source Imbalance													
G = 1	70			75			80			70			dB
G = 10	90			95			100			90			dB
G = 100	100			105			110			100			dB
G = 1000	110			115			120			110			dB
OUTPUT RATING													
V_{OUT}, R_L = 2kΩ		±10			±10			±10			±10		V
DYNAMIC RESPONSE													
Small Signal −3dB													
G = 1		1			1			1			1		MHz
G = 10		400			400			400			400		kHz
G = 100		150			150			150			150		kHz
G = 1000		25			25			25			25		kHz
Slew Rate		5.0			5.0			5.0			5.0		V/µs
Settling Time to 0.01%, 20V Step													
G = 1 to 100		15			15			15			15		µs
G = 1000		75			75			75			75		µs
NOISE													
Voltage Noise, 1kHz													
R.T.I.		7			7			7			7		nV/√Hz
R.T.O.		90			90			90			90		nV/√Hz
R.T.I., 0.1 to 10Hz													
G = 1		15			15			15			15		µV p-p
G = 10		2			2			2			2		µV p-p
G = 100, 1000		0.3			0.3			0.3			0.3		µV p-p
Current Noise													
0.1Hz to 10Hz		60			60			60			60		pA p-p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model	AD524A Min	AD524A Typ	AD524A Max	AD524B Min	AD524B Typ	AD524B Max	AD524C Min	AD524C Typ	AD524C Max	AD524S Min	AD524S Typ	AD524S Max	Units
SENSE INPUT													
R_{IN}		20			20			20			20		kΩ ± 20%
I_{IN}		15			15			15			15		μA
Voltage Range	± 10			± 10			± 10			± 10			V
Gain to Output		1			1			1			1		%
REFERENCE INPUT													
R_{IN}		40			40			40			40		kΩ ± 20%
I_{IN}		15			15			15			15		μA
Voltage Range	± 10			± 10			10			10			V
Gain to Output		1			1			1			1		%
TEMPERATURE RANGE													
Specified Performance	25		+ 85	25		+ 85	− 25		+ 85	− 55		+ 125	°C
Storage	65		+ 150	65		+ 150	− 65		+ 150	− 65		+ 150	°C
POWER SUPPLY													
Power Supply Range	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	V
Quiescent Current		3.5	5.0		3.5	5.0		3.5	5.0		3.5	5.0	mA

NOTES
[1] V_{OL} is the maximum differential input voltage at G = 1 for specified nonlinearity.
V_{DL} at other gains = 10V/G.
V_D = Actual differential input voltage
Example: G = 10, V_D = 0.50
V_{OL} = 12V − (10/2 × 0.50V) = 9.5V
Specifications subject to change without notice.
All min and max specifications are guaranteed. Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels.

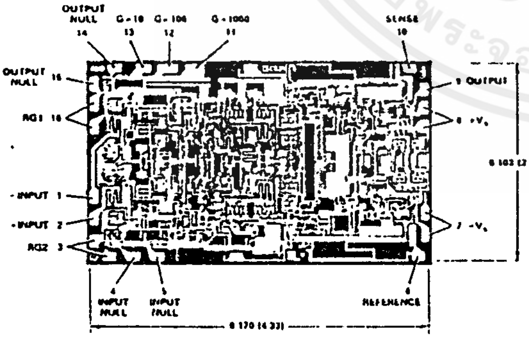
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS[1]

Supply Voltage . . . . ± 18V
Internal Power Dissipation 450mW
Input Voltage,[2]
(Either Input Simultaneously) $|V_{IN}| + |V_S|$ . . . . . . <36V
Output Short Circuit Duration . . . . Indefinite
Storage Temperature Range
(R) . . . . −65°C to +125°C
(D, E) . . . . −65°C to +150°C
Operating Temperature Range
AD524A/B/C . . . . −25°C to +85°C
AD524S . . . . −55°C to +125°C
Lead Temperature Range (Soldering 60 seconds) . . +300°C

NOTES
[1] Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.
[2] Max input voltage specification refers to maximum voltage to which either input terminal may be raised with or without device power applied. For example, with ± 18 volt supplies max V_{IN} is ± 18 volts, with zero supply voltage max V_{IN} is ± 36 volts.

METALIZATION PHOTOGRAPH

Contact factory for latest dimensions.
Dimensions shown in inches and (mm).



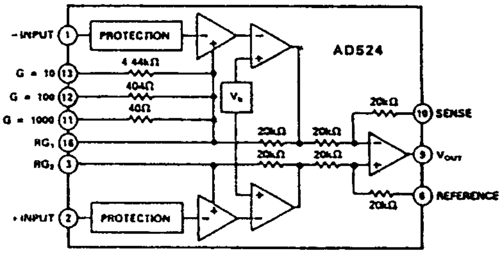
PAD NUMBERS CORRESPOND TO PIN NUMBERS FOR THE D-16 AND R-16 16-PIN CERAMIC PACKAGES

ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Description	Package Option*
AD524AD	−40°C to +85°C	16-Pin Ceramic DIP	D-16
AD524AE	−40°C to +85°C	20-Pin Leadless Chip Carrier	E-20A
AD524AR	−40°C to +85°C	16-Pin Gull-Wing SOIC	R-16
AD524AR-REEL	−40°C to +85°C	Tape & Reel Packaging	
AD524BD	−40°C to +85°C	16-Pin Ceramic DIP	D-16
AD524BE	−40°C to +85°C	20-Pin Leadless Chip Carrier	E-20A
AD524CD	−40°C to +85°C	16-Pin Ceramic DIP	D-16
AD524CE	−40°C to +85°C	20-Pin Leadless Chip Carrier	E-20A
AD524SD	−55°C to +125°C	16-Pin Ceramic DIP	D-16
AD524SE	−55°C to +125°C	20-Pin Leadless Chip Carrier	E-20A
AD524SD/883B	−55°C to +125°C	16-Pin Ceramic DIP	D-16
AD524SE/883B	−55°C to +125°C	20-Pin Leadless Chip Carrier	E-20A
AD524AChips	−40°C to +85°C	Die	
AD524CChips	−40°C to +85°C	Die	
AD524SChips	−55°C to +125°C	Die	

*For outline information see Package Information section.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524—Typical Characteristics

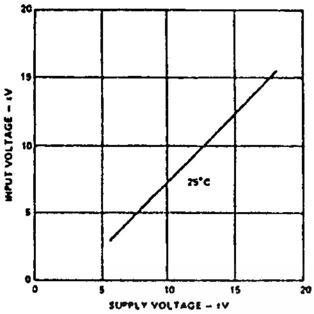


Figure 1. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, G = 1

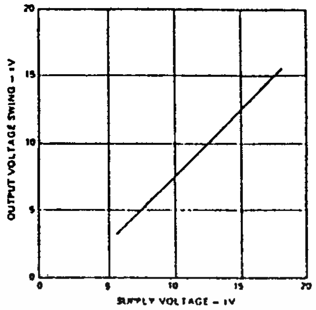


Figure 2. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

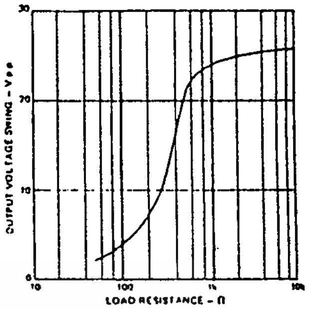


Figure 3. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

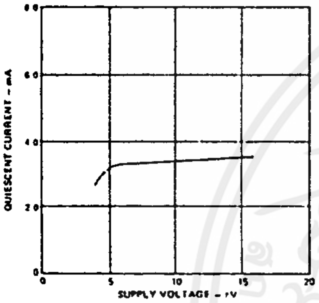


Figure 4. Quiescent Current vs. Supply Voltage

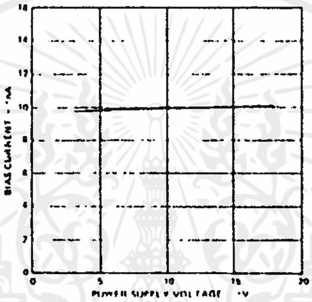


Figure 5. Input Bias Current vs. Supply Voltage

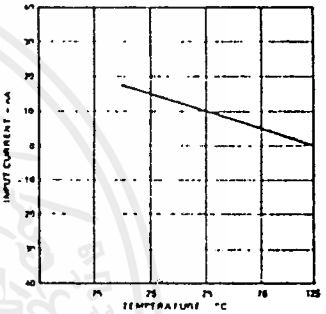


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

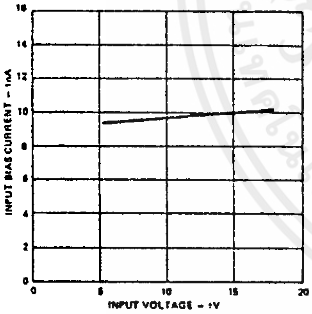


Figure 7. Input Bias Current vs. CMV

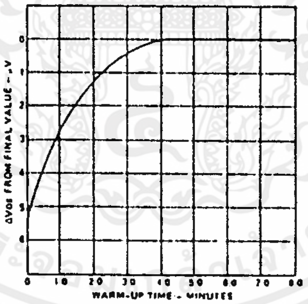


Figure 8. Offset Voltage, RTI, Turn On Drift

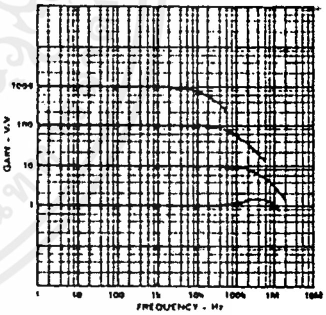


Figure 9. Gain vs. Frequency

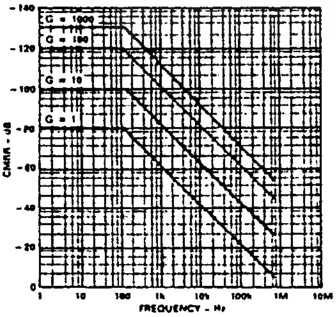


Figure 10. CMRR vs. Frequency RTI, Zero to 1k Source Imbalance

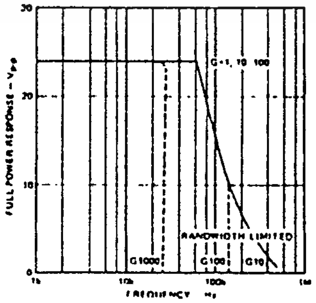


Figure 11. Large Signal Frequency Response

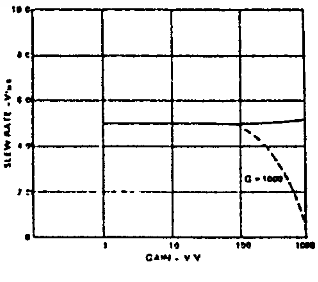


Figure 12. Slew Rate vs. Gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Characteristics—AD524

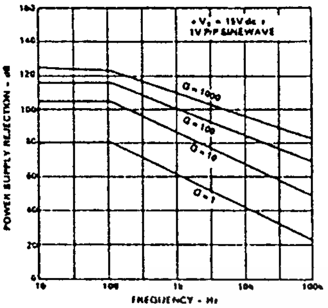


Figure 13. Positive PSRR vs. Frequency

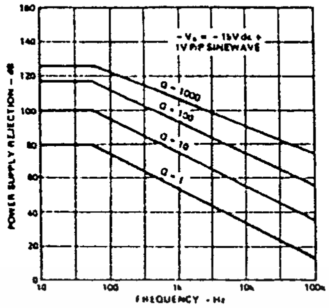


Figure 14. Negative PSRR vs. Frequency

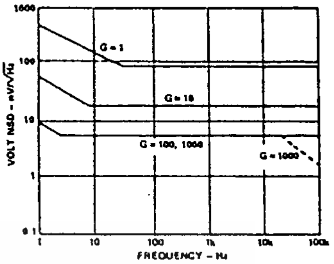


Figure 15. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

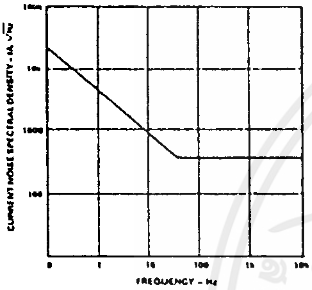


Figure 16. Input Current Noise

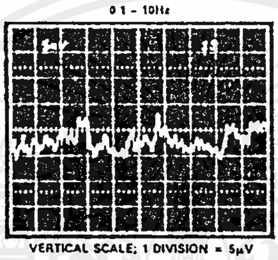


Figure 17. Low Frequency Noise – G = 1 (System Gain = 1000)

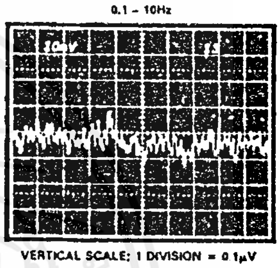


Figure 18. Low Frequency Noise – G = 1000 (System Gain = 100,000)

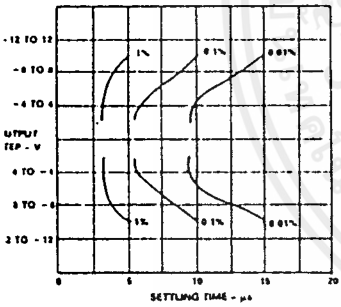


Figure 19. Settling Time Gain = 1

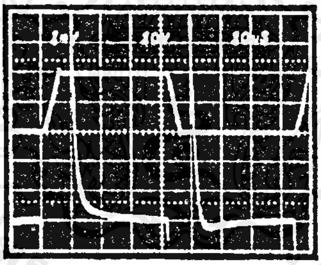


Figure 20. Large Signal Pulse Response and Settling Time – G = 1

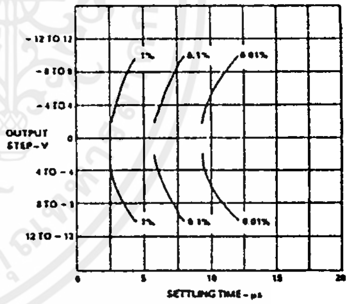


Figure 21. Settling Time Gain = 10

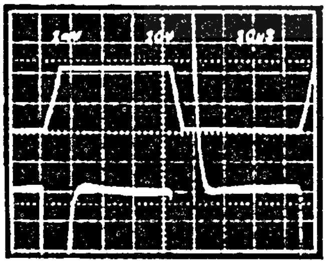


Figure 22. Large Signal Pulse Response and Settling Time G 10

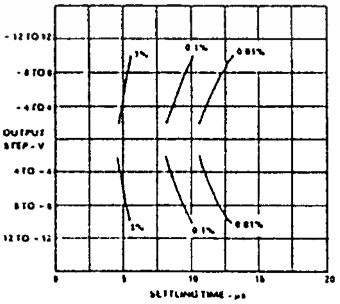


Figure 23. Settling Time Gain · 100

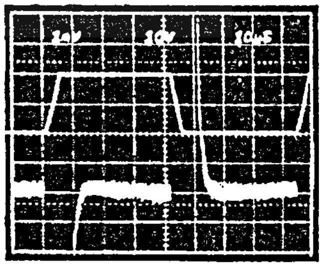


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 100

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

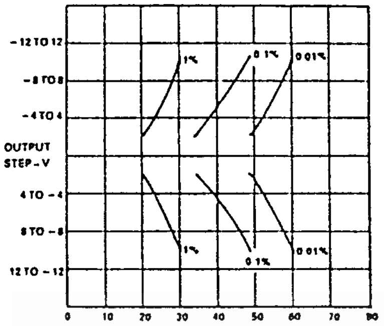


Figure 25. Settling Time Gain – 1000

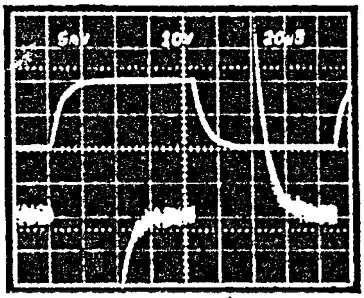


Figure 26. Large Signal Pulse Response and Settling Time G – 1000

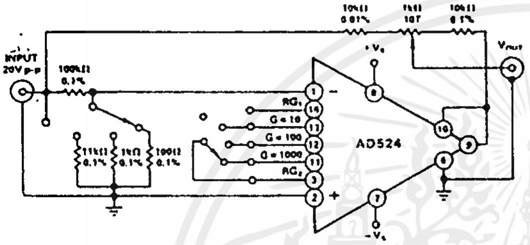


Figure 27. Settling Time Test Circuit

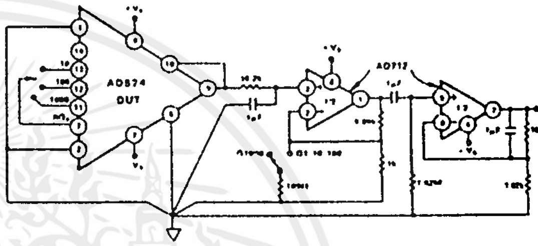


Figure 28. Noise Test Circuit

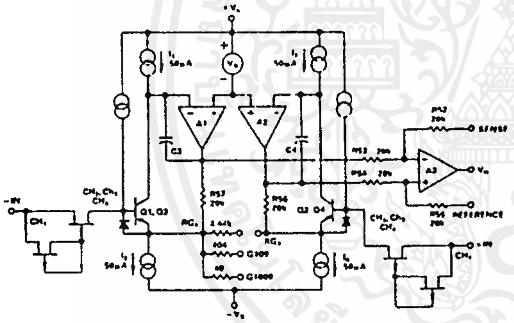


Figure 29. Simplified Circuit of Amplifier; Gain is Defined as ((R56 + R57)/(R_G)) + 1. For a Gain of 1, R_G is an Open Circuit

Theory of Operation

The AD524 is a monolithic instrumentation amplifier based on the classic 3 op amp circuit. The advantage of monolithic construction is the closely matched components that enhance the performance of the input preamp. The preamp section develops the programmed gain by the use of feedback concepts. The programmed gain is developed by varying the value of R_G (smaller values increase the gain) while the feedback forces the collector currents Q1, Q2, Q3 and Q4 to be constant which impresses the input voltage across R_G.

As R_G is reduced to increase the programmed gain, the transconductance of the input preamp increases to the transconductance of the input transistors. This has three important advantages. First, this approach allows the circuit to achieve a very high open loop gain of 3×10^8 at a programmed gain of 1000 thus reducing gain related errors to a negligible 30ppm. Second, the gain bandwith product which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of 7nV/√Hz at G = 1000.

INPUT PROTECTION

As interface amplifiers for data acquisition systems, instrumentation amplifiers are often subjected to input overloads, i.e., voltage levels in excess of the full scale for the selected gain range. At low gains, 10 or less, the gain resistor acts as a current limiting element in series with the inputs. At high gains the lower value of R_G will not adequately protect the inputs from excessive currents. Standard practice would be to place series limiting resistors in each input, but to limit input current to below 5mA with a full differential overload (36V) would require over 7k of resistance which would add 10nV√Hz of noise. To provide both input protection and low noise a special series protect FET was used.

A unique FET design was used to provide a bidirectional current limit, thereby, protecting against both positive and negative overloads. Under nonoverload conditions, three channels CH_2, CH_3, CH_4, act as a resistance (≈1kΩ) in series with the input as before. During an overload in the positive direction, a fourth channel, CH_1, acts as a small resistance (≈3kΩ) in series with the gate, which draws only the leakage current, and the FET limits I_{DSS}. When the FET enhances under a negative overload, the gate current must go through the small FET formed by CH_1 and when this FET goes into saturation, the gate current is limited and the main FET will go into controlled enhancement. The bidirectional limiting holds the maximum input current to 3mA over the 36V range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applying the AD524

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

Voltage offset specifications are often considered a figure of merit for instrumentation amplifiers. While initial offset may be adjusted to zero, shifts in offset voltage due to temperature variations will cause errors. Intelligent systems can often correct for this factor with an auto-zero cycle, but there are many small-signal high-gain applications that don't have this capability.

Voltage offset and drift comprise two components each; input and output offset and offset drift. Input offset is that component of offset that is directly proportional to gain i.e., input offset as measured at the output at G = 100 is 100 times greater than at G = 1. Output offset is independent of gain. At low gains, output offset drift is dominant, while at high gains input offset drift dominates. Therefore, the output offset voltage drift is normally specified as drift at G = 1 (where input effects are insignificant), while input offset voltage drift is given by drift specification at a high gain (where output offset effects are negligible). All input-related numbers are referred to the input (RTI) which is to say that the effect on the output is "G" times larger. Voltage offset vs. power supply is also specified at one or more gain settings and is also RTI.

By separating these errors, one can evaluate the total error independent of the gain setting used. In a given gain configuration both errors can be combined to give a total error referred to the input (R.T.I.) or output (R.T.O.) by the following formula:

Total Error R.T.I. = input error + (output error/gain)

Total Error R.T.O. = (Gain × input error) + output error

As an illustration, a typical AD524 might have a $+250\mu V$ output offset and a $-50\mu V$ input offset. In a unity gain configuration, the *total* output offset would be $200\mu V$ or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be $-4.75mV$ or: $+250\mu V + 100(-50\mu V) = -4.75mV$.

The AD524 provides for both input and output offset adjustment. This simplifies very high precision applications and minimize offset voltage changes in switched gain applications. In such applications the input offset is adjusted first at the highest programmed gain, then the output offset is adjusted at G = 1.

GAIN

The AD524 has internal high accuracy pretrimmed resistors for pin programmable gain of 1, 10, 100 and 1000. One of the preset gains can be selected by pin strapping the appropriate gain terminal and RG_2 together (for G = 1 RG_2 is not connected).

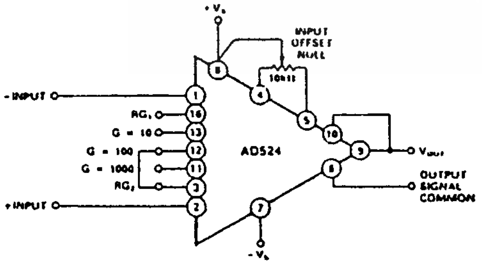


Figure 30. Operating Connections for G = 100

The AD524 can be configured for gains other than those that are internally preset; there are two methods to do this. The first method uses just an external resistor connected between pins 3 and 16 which programs the gain according to the formula $R_G = \frac{40k}{G-1}$ (see Figure 31). For best results R_G should be a precision resistor with a low temperature coefficient. An external R_G affects both gain accuracy and gain drift due to the mismatch between it and the internal thin-film resistors. Gain accuracy is determined by the tolerance of the external R_G and the absolute accuracy of the internal resistors (±20%). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of R_G and the temperature coefficient of the internal resistors (−50ppm/°C typ).

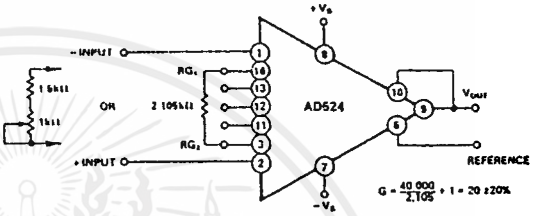


Figure 31. Operating Connections for G = 20

The second technique uses the internal resistors in parallel with an external resistor (Figure 32). This technique minimizes the gain adjustment range and reduces the effects of temperature coefficient sensitivity.

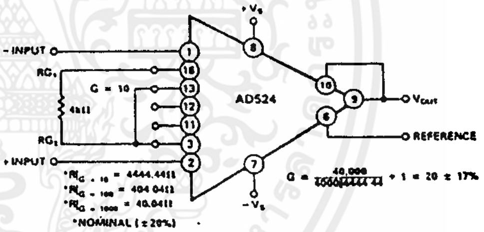


Figure 32. Operating Connections for G = 20, Low Gain T.C. Technique

The AD524 may also be configured to provide gain in the output stage. Figure 33 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD524. R1, R2 and R3 should be made as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R2 will precisely set the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R1 and R3.

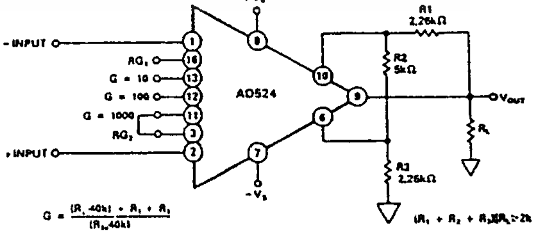


Figure 33. Gain of 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524

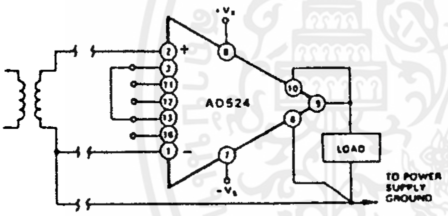
Output Gain	R2	R1,R3	Nominal Gain
2	5kΩ	2.26kΩ	2.02
5	1.05kΩ	2.05kΩ	5.01
10	1kΩ	4.42kΩ	10.1

Table I. Output Gain Resistor Values

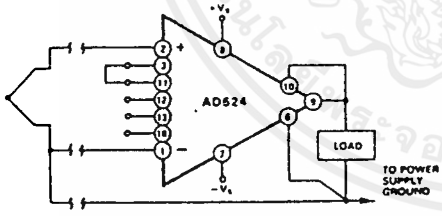
INPUT BIAS CURRENTS

Input bias currents are those currents necessary to bias the input transistors of a dc amplifier. Bias currents are an additional source of input error and must be considered in an total error budget. The bias currents when multiplied by the source resistance appear as an offset voltage. What is of concern in calculating bias current errors is the change in bias current with respect to signal voltage and temperature. Input offset current is the difference between the two input bias currents. The effect of offset current is an input offset voltage whose magnitude is the offset current times the source impedance imbalance.

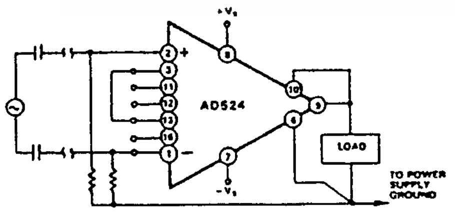
Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents will charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore, when amplifying "floating" input sources such as transformers and thermocouples, as well as ac-coupled sources, there must still be a dc path from each input to ground.



a. Transformer Coupled



b. Thermocouple



c. AC Coupled

Figure 34. Indirect Ground Returns for Bias Currents

COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance. "Common-Mode Rejection Ratio" (CMRR) is a ratio expression while "Common-Mode Rejection" (CMR) is the logarithm of that ratio. For example, a CMRR of 10,000 corresponds to a CMR of 80dB.

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figures 35 and 36 shows active data guards which are configured to improve ac common mode rejection by "bootstrapping" the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

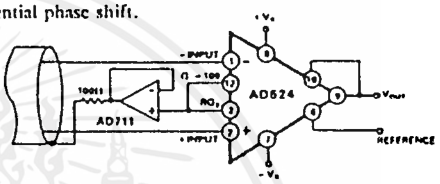


Figure 35. Shield Driver, G ≥ 100

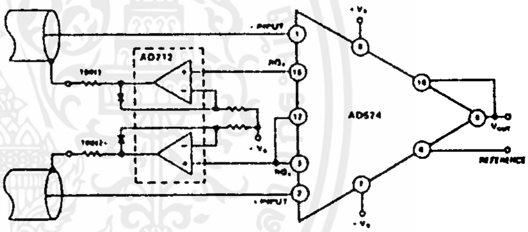


Figure 36. Differential Shield Driver

GROUNDING

Many data-acquisition components have two or more ground pins which are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power-supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, since current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and since these paths

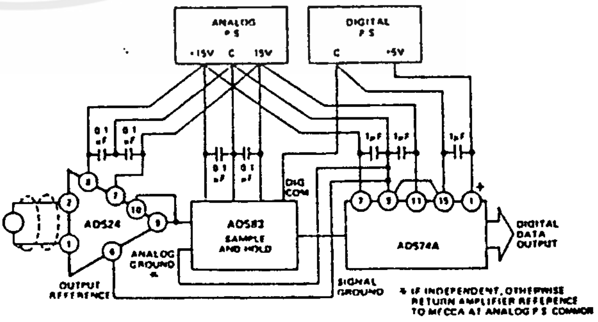


Figure 37. Basic Grounding Practice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data acquisition components. Separate ground returns should be provided to minimize the current flow in the path from the sensitive points to the system ground point. In this way supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors.

Since the output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal an instrumentation amplifier can solve many grounding problems.

SENSE TERMINAL

The sense terminal is the feedback point for the instrument amplifier's output amplifier. Normally it is connected to the instrument amplifier output. If heavy load currents are to be drawn through long leads, voltage drops due to current flowing through lead resistance can cause errors. The sense terminal can be wired to the instrument amplifier at the load thus putting the IxR drops "inside the loop" and virtually eliminating this error source.

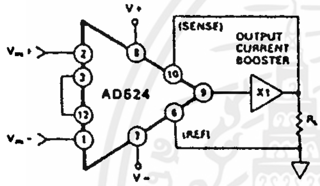


Figure 38. AD524 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 volt output swing into 2kΩ. In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 38 shows how a high-current booster may be connected "inside the loop" of an instrumentation amplifier to provide the required current boost without significantly degrading overall performance. Nonlinearities, offset and gain inaccuracies of the buffer are minimized by the loop gain of the IA output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal may be used to offset the output by up to ± 10V. This is useful when the load is "floating" or does not share a ground with the rest of the system. It also provides a direct means of injecting a precise offset. It must be remembered that the total output swing is ± 10 volts to be shared between signal and reference offset.

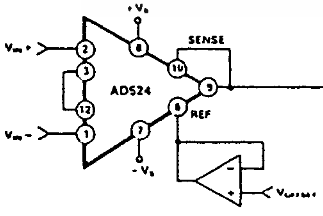
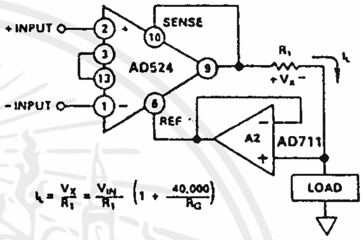


Figure 39. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

When the IA is of the three-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal. Any significant resistance from the reference terminal to ground increases the gain of the noninverting signal path thereby upsetting the common-mode rejection of the IA.

In the AD524 a reference source resistance will unbalance the CMR trim by the ratio of $20k\Omega/R_{REF}$. For example, if the reference source impedance is 1Ω, CMR will be reduced to 86dB (20kΩ/ 1Ω = 86dB). An operational amplifier may be used to provide that low impedance reference point as shown in Figure 39. The input offset voltage characteristics of that amplifier will add directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals as shown in Figure 40.



$$I_L = \frac{V_X}{R_1} = \frac{V_{IN}}{R_1}\left(1 + \frac{40{,}000}{R_G}\right)$$

Figure 40. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the "low" side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain and the value of that resistor. Since only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier A_2, the forced current I_L will largely flow through the load. Offset and drift specifications of A_2 must be added to the output offset and drift specifications of the IA.

PROGRAMMABLE GAIN

Figure 41 shows the AD524 being used as a software programmable gain amplifier. Gain switching can be accomplished with mechanical switches such as DIP switches or reed relays. It should be noted that the "on" resistance of the switch in series with the internal gain resistor becomes part of the gain equation and will have an effect on gain accuracy.

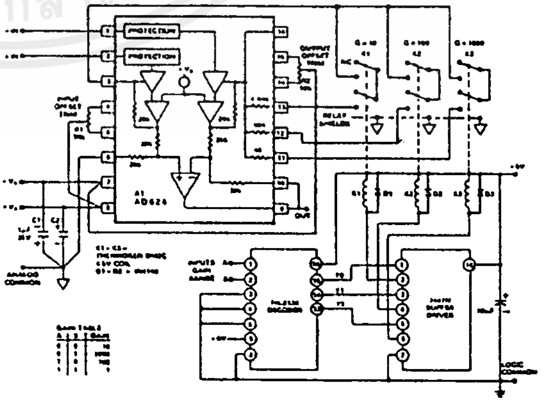


Figure 41. 3 Decade Gain Programmable Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524

The AD524 can also be connected for gain in the output stage. Figure 42 shows an AD547 used as an active attenuator in the output amplifier's feedback loop. The active attenuation presents a very low impedance to the feedback resistors therefore minimizing the common rejection ratio degradation.

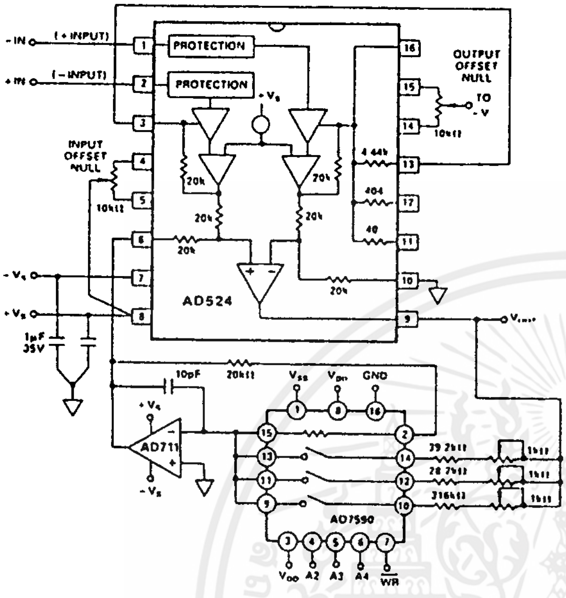


Figure 42. Programmable Output Gain

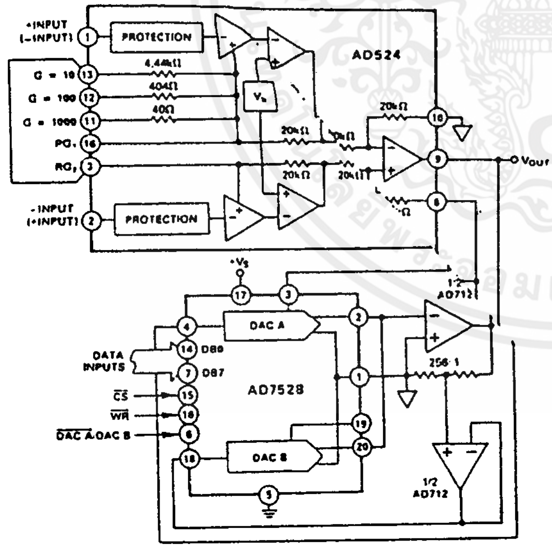


Figure 43. Programmable Output Gain Using a DAC

Another method for developing the switching scheme is to use a DAC. The AD7528 dual DAC which acts essentially as a pair of switched resistive attenuators having high analog linearity and symmetrical bipolar transmission is ideal in this application. The multiplying DAC's advantage is that it can handle inputs of either polarity or zero without affecting the programmed gain. The circuit shown uses an AD7528 to set the gain (DAC A) and to perform a fine adjustment (DAC B).

AUTO-ZERO CIRCUITS

In many applications it is necessary to provide very accurate data in high gain configurations. At room temperature the offset effects can be nulled by the use of offset trimpots. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 44 show a CMOS DAC operating in the bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

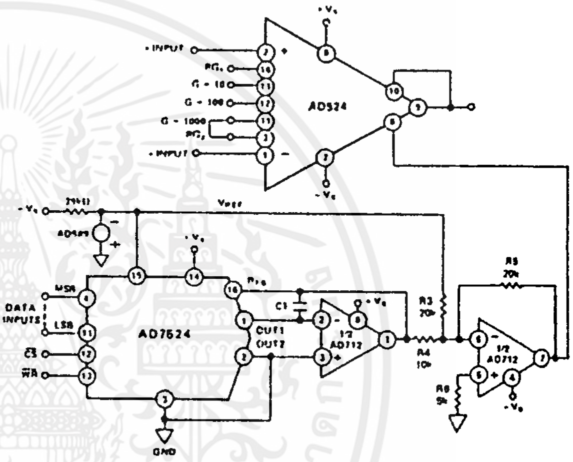


Figure 44. Software Controllable Offset

In many applications complex software algorithms for auto-zero applications are not available. For those applications Figure 45 provides a hardware solution.

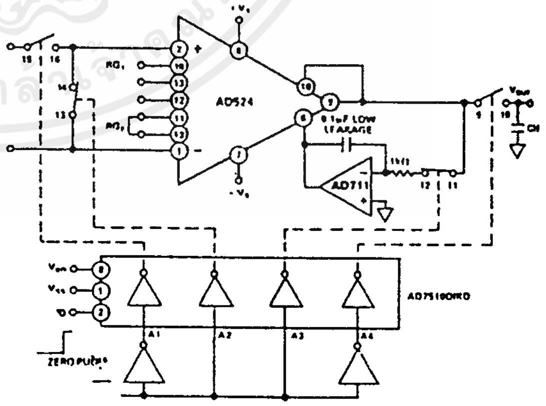


Figure 45. Auto-Zero Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Error Budget Analysis—AD524

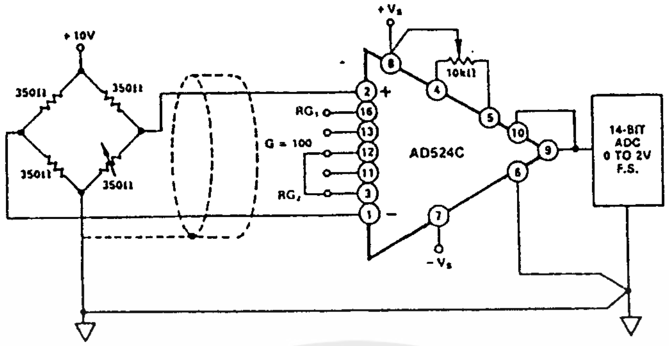


Figure 46. Typical Bridge Application

ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, we will now examine a typical case where an AD524 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 46 shows a differential transducer, unbalanced by 100Ω, supplying a 0 to 20mV signal to an AD524C. The output of the IA feeds a 14-bit A to D converter with a 0 to 2 volt input voltage range. The operating temperature range is −25°C to +85°C. Therefore, the largest change in temperature ΔT within the operating range is from ambient to +85°C (85°C − 25°C = 60°C).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance. This would be so in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (45ppm = 0.004%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the A to D output, the addition of a auto-gain/auto-zero cycle will remove all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This will also reduce errors to 0.004%.

Error Source	AD524C Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at T_A = 25°C	Effect on Absolute Accuracy at T_A = 85°C	Effect on Resolution
Gain Error	±0.25%	±0.25% = 2500ppm	2500ppm	2500ppm	–
Gain Instability	25ppm	(25ppm/°C)(60°C) = 1500ppm	–	1500ppm	–
Gain Nonlinearity	±0.003%	±0.003% = 30ppm	–	–	30ppm
Input Offset Voltage	±50μV, RTI	±50μV/20mV = ±2500ppm	2500ppm	2500ppm	–
Input Offset Voltage Drift	±0.5μV/°C	(±0.5μV/°C)(60°C) = 30μV 30μV/20mV = 1500ppm	–	1500ppm	–
Output Offset Voltage[1]	±2.0mV	±2.0mV/20mV = 1000ppm	1000ppm	1000ppm	–
Output Offset Voltage Drift[1]	±25μV/°C	(±25μV/°C)(60°C) = 1500μV 1500μV/20mV = 750ppm	–	750ppm	–
Bias Current – Source Imbalance Error	±15nA	(±15nA)(100Ω) = 1.5μV 1.5μV/20mV = 75ppm	75ppm	75ppm	–
Bias Current – Source Imbalance Drift	±100pA/°C	(±100pA/°C)(100Ω)(60°C) = 0.6μV 0.6μV/20mV = 30ppm	–	30ppm	–
Offset Current – Source Imbalance Error	±10nA	(±10nA)(100Ω) = 1μV 1μV/20mV = 50ppm	50ppm	50ppm	–
Offset Current – Source Imbalance Drift	±100pA/°C	(100pA/°C)(100Ω)(60°C) = 0.6μV 0.6μV/20mV = 30ppm	–	30ppm	–
Offset Current – Source Resistance – Error	±10nA	(10nA)(175Ω) = 3.5μV 3.5μV/20mV = 87.5ppm	87.5ppm	87.5ppm	–
Offset Current – Source Resistance – Drift	±100pA/°C	(100pA/°C)(175Ω)(60°C) = 1μV 1μV/20mV = 50ppm	–	50ppm	–
Common Mode Rejection 5V dc	115dB	115dB = 1.8ppm × 5V = 8.8μV 8.8μV/20mV = 444ppm	444ppm	444ppm	–
Noise, RTI (0.1–10Hz)	0.3μV p-p	0.3μV p-p/20mV = 15ppm	–	–	15ppm
		Total Error	6656.5ppm	10516.5ppm	45ppm

[1]Output offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

Table II. Error Budget Analysis of AD524CD in Bridge Application

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524

Figure 47 shows a simple application, in which the variation of the cold-junction voltage of a Type J thermocouple–iron(+)– constantan– is compensated for by a voltage developed in series by the temperature-sensitive output current of an AD590 semiconductor temperature sensor.

The circuit is calibrated by adjusting R_T for proper output voltage with the measuring junction at a known reference temperature and the circuit near 25°C. If resistors with low tempcos are used, compensation accuracy will be to within ±0.5°C, for temperatures between +15°C and +35°C. Other thermocouple types may be accommodated with the standard resistance values shown in the table. For other ranges of ambient temperature, the equation in the figure may be solved for the optimum values of R_T and R_A.

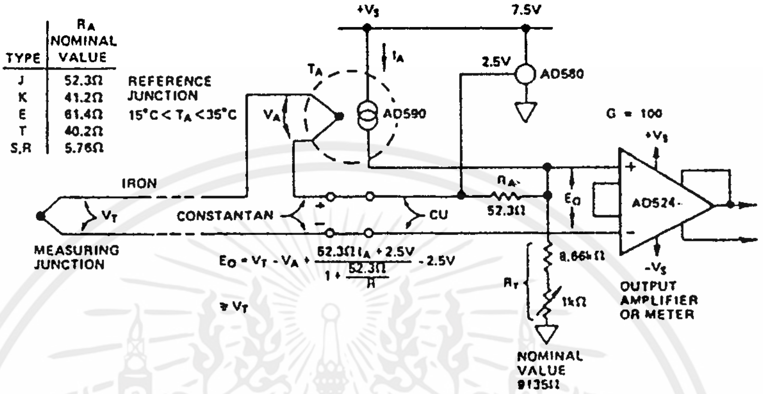


Figure 47. Cold-Junction Compensation

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 48 includes both auto-zero and auto-gain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The auto-zero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8 bit) to the AD7524 which eliminates the zero error since its output has an inverted scale. The auto-gain cycle converts the A/D reference and compares it with full scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

For a comprehensive study of instrumentation amplifier design and applications, refer to the *Instrumentation Amplifier Application Guide*, available free from Analog Devices.

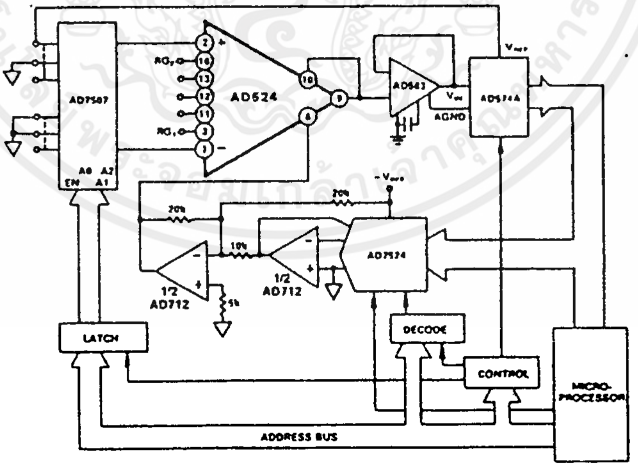


Figure 48. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALOG DEVICES

High Precision, Wide-Band RMS-to-DC Converter

AD637

FEATURES

High Accuracy
- 0.02% Max Nonlinearity, 0 V to 2 V RMS Input
- 0.10% Additional Error to Crest Factor of 3

Wide Bandwidth
- 8 MHz at 2 V RMS Input
- 600 kHz at 100 mV RMS

Computes:
- True RMS
- Square
- Mean Square
- Absolute Value

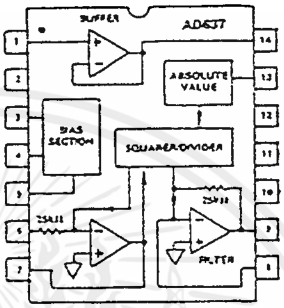
dB Output (60 dB Range)

Chip Select-Power Down Feature Allows:
- Analog "3-State" Operation
- Quiescent Current Reduction from 2.2 mA to 350 μA

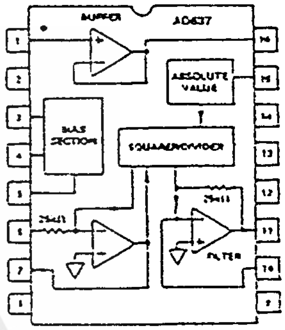
Side-Brazed DIP, Low Cost Cerdip and SOIC

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

Ceramic DIP (D) and Cerdip (Q) Packages



SOIC (R) Package



PRODUCT DESCRIPTION

The AD637 is a complete high accuracy monolithic rms-to-dc converter that computes the true rms value of any complex waveform. It offers performance that is unprecedented in integrated circuit rms-to-dc converters and comparable to discrete and modular techniques in accuracy, bandwidth and dynamic range. A crest factor compensation scheme in the AD637 permits measurements of signals with crest factors of up to 10 with less than 1% additional error. The circuit's wide bandwidth permits the measurement of signals up to 600 kHz with inputs of 200 mV rms and up to 8 MHz when the input levels are above 1 V rms.

As with previous monolithic rms converters from Analog Devices, the AD637 has an auxiliary dB output available to the user. The logarithm of the rms output signal is brought out to a separate pin allowing direct dB measurement with a useful range of 60 dB. An externally programmed reference current allows the user to select the 0 dB reference voltage to correspond to any level between 0.1 V and 2.0 V rms.

A chip select connection on the AD637 permits the user to decrease the supply current from 2.2 mA to 350 μA during periods when the rms function is not in use. This feature facilitates the addition of precision rms measurement to remote or hand-held applications where minimum power consumption is critical. In addition when the AD637 is powered down the output goes to a high impedance state. This allows several AD637s to be tied together to form a wide-band true rms multiplexer.

The input circuitry of the AD637 is protected from overload voltages that are in excess of the supply levels. The inputs will not be damaged by input signals if the supply voltages are lost.

The AD637 is available in two accuracy grades (J, K) for commercial (0°C to +70°C) temperature range applications; two accuracy grades (A, B) for industrial (−40°C to +85°C) applications; and one (S) rated over the −55°C to + 125°C temperature range. All versions are available in hermetically-sealed, 14-pin side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages. A 16-pin SOIC package is also available.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD637 computes the true root-mean-square, mean square, or absolute value of any complex ac (or ac plus dc) input waveform and gives an equivalent dc output voltage. The true rms value of a waveform is more useful than an average rectified signal since it relates directly to the power of the signal. The rms value of a statistical signal is also related to the standard deviation of the signal.
2. The AD637 is laser wafer trimmed to achieve rated performance without external trimming. The only external component required is a capacitor which sets the averaging time period. The value of this capacitor also determines low frequency accuracy, ripple level and settling time.
3. The chip select feature of the AD637 permits the user to power down the device down during periods of nonuse, thereby, decreasing battery drain in remote or hand-held applications.
4. The on-chip buffer amplifier can be used as either an input buffer or in an active filter configuration. The filter can be used to reduce the amount of ac ripple, thereby, increasing the accuracy of the measurement.

REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 617/329-4700 Fax: 617/326-8703

...เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ƒTES
ƒuracy specified 0-7 V rms dc with AD637 connected as shown in Figure 2.
ƒonlinearity is defined as the maximum deviation from the straight line connecting the readings at 10 mV and 2 V.
ƒror vs. crest factor is specified as additional error for 1 V rms.
ƒput voltages are expressed in volts rms. % are in % of reading.
ƒth external 2 kΩ pull down resistor tied to $-V_S$.
ƒcifications subject to change without notice.
ƒcifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min
ƒd max specifications are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units.

ƒSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SD Rating	500 V
ƒpply Voltage	±18 V dc
ƒternal Quiescent Power Dissipation	108 mW
ƒutput Short-Circuit Duration	Indefinite
ƒtorage Temperature Range	-65°C to +150°C
ƒead Temperature Range (Soldering 10 secs)	+300°C
ƒated Operating Temperature Range	
AD637J, K	0°C to +70°C
AD637A, B	-40°C to +85°C
AD637S, 5962-8963701CA	-55°C to +125°C

ORDERING GUIDE

Model[1, 2]	Temperature Range	Package Description	Package Option
AD637AR	-40°C to +85°C	SOIC	R-16
AD637BR	-40°C to +85°C	SOIC	R-16
AD637AQ	-40°C to +85°C	Cerdip	Q-14
AD637BQ	-40°C to +85°C	Cerdip	Q-14
AD637JD	0°C to +70°C	Side Brazed Ceramic DIP	D-14
AD637KD	0°C to +70°C	Side Brazed Ceramic DIP	D-14
AD637JQ	0°C to +70°C	Cerdip	Q-14
AD637KQ	0°C to +70°C	Cerdip	Q-14
AD637JR	0°C to +70°C	SOIC	R-16
AD637JR-REEL	0°C to +70°C	SOIC	R-16
AD637JR-REEL7	0°C to +70°C	SOIC	R-16
AD637KR	0°C to +70°C	SOIC	R-16
AD637SD	-55°C to +125°C	Side Brazed Ceramic DIP	D-14
AD637SD/883B	-55°C to +125°C	Side Brazed Ceramic DIP	D-14
AD637SQ/883B	-55°C to +125°C	Cerdip	Q-14

NOTES
[1]"S" grade chips are also available.
[2]A Standard Microcircuit Drawing, 5962-8963701CA, is also available.

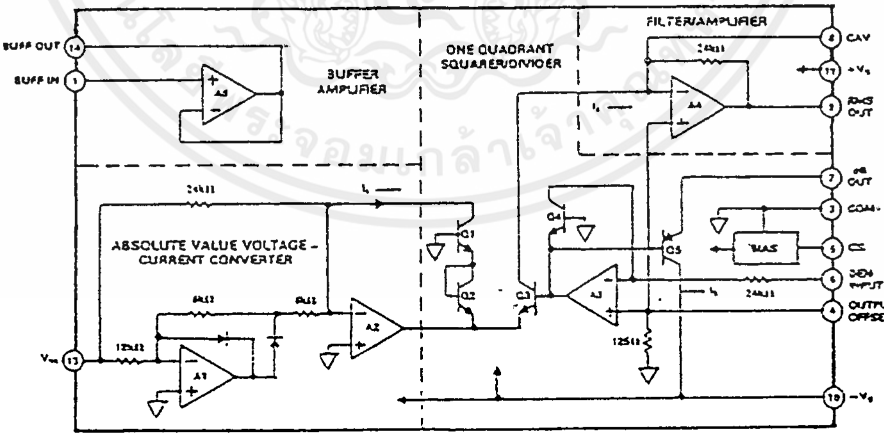


Figure 1. Simplified Schematic

CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AD637 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IONAL DESCRIPTION

637 embodies an implicit solution of the rms equation rcomes the inherent limitations of straightforward rms ation. The actual computation performed by the AD637 the equation

$$V\,rms = Avg\left[\frac{V_{IN}^2}{V\,rms}\right]$$

1 is a simplified schematic of the AD637, it is subdivided ur major sections: absolute value circuit (active rectifier), /divider, filter circuit and buffer amplifier. The input volt- which can be ac or dc is converted to a unipolar current he active rectifier A1, A2. I1 drives one input of the r divider which has the transfer function

$$I_4 = \frac{I_1^2}{I_3}$$

utput current of the squarer/divider, I4 drives A4 which a low-pass filter with the external averaging capacitor. If C time constant of the filter is much greater than the long- riod of the input signal than A4s output will be propor- to the average of I4. The output of this filter amplifier is by A3 to provide the denominator current I3 which equals I4 and is returned to the squarer/divider to complete the cit rms computation.

$$I_4 = Avg\left[\frac{I_1^2}{I_4}\right] = I_1\,rms$$

$$V_{OUT} = V_{IN}\,rms$$

averaging capacitor is omitted, the AD637 will compute the ute value of the input signal. A nominal 5 pF capacitor should sed to insure stability. The circuit operates identically to that of ms configuration except that I3 is now equal to I4 giving

$$I_4 = \frac{I_1^2}{I_4}$$

$$I_4 = |I_1|$$

denominator current can also be supplied externally by pro- g a reference voltage, V_{REF}, to Pin 6. The circuit operates tically to the rms case except that I3 is now proportional to . Thus:

$$I_4 = Avg\frac{I_1^2}{I_3}$$

$$V_O = \frac{V_{IN}^2}{V_{DEN}}$$

is the mean square of the input signal.

NDARD CONNECTION

AD637 is simple to connect for a majority of rms measure- ts. In the standard rms connection shown in Figure 2, only gle external capacitor is required to set the averaging time tant. In this configuration, the AD637 will compute the rms of any input signal. An averaging error, the magnitude hich will be dependent on the value of the averaging capaci- will be present at low frequencies. For example, if the filter acitor C_{AV}, is 4 µF this error will be 0.1% at 10 Hz and in- ses to 1% at 3 Hz. If it is desired to measure only ac signals. AD637 can be ac coupled through the addition of a non- r capacitor in series with the input as shown in Figure 2.

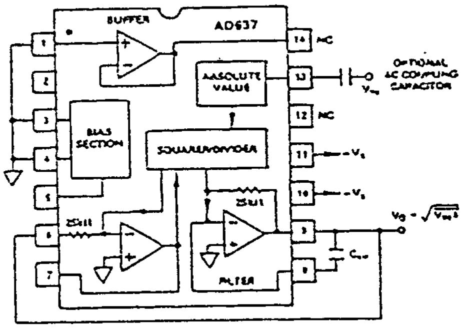


Figure 2. Standard RMS Connection

The performance of the AD637 is tolerant of minor variations in the power supply voltages, however, if the supplies being used exhibit a considerable amount of high frequency ripple it is advisable to bypass both supplies to ground through a 0.1 µF ceramic disc capacitor placed as close to the device as possible.

The output signal range of the AD637 is a function of the supply voltages, as shown in Figure 3. The output signal can be used buffered or nonbuffered depending on the characteristics of the load. If no buffer is needed, tie buffer input (Pin 1) to common. The output of the AD637 is capable of driving 5 mA into a 2 kΩ load without degrading the accuracy of the device.

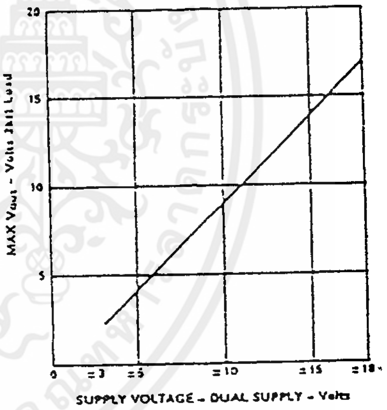


Figure 3. AD637 max V_{OUT} vs. Supply Voltage

CHIP SELECT

The AD637 includes a chip select feature which allows the user to decrease the quiescent current of the device from 2.2 mA to 350 µA. This is done by driving the CS, Pin 5, to below 0.2 V dc. Under these conditions, the output will go into a high impedance state. In addition to lowering power consumption, this feature permits bussing the outputs of a number of AD637s to form a wide bandwidth rms multiplexer. If the chip select is not being used, Pin 5 should be tied high.

OPTIONAL TRIMS FOR HIGH ACCURACY

The AD637 includes provisions to allow the user to trim out both output offset and scale factor errors. These trims will result in significant reduction in the maximum total error as shown in Figure 4. This remaining error is due to a nontrimmable input offset in the absolute value circuit and the irreducible nonlinearity of the device.

The trimming procedure on the AD637 is as follows:

1. Ground the input signal, V_{IN} and adjust R1 to give 0 V output from Pin 9. Alternatively R1 can be adjusted to give the correct output with the lowest expected value of V_{IN}.

Connect the desired full scale input to V_{IN}, using either a dc or a calibrated ac signal, trim R3 to give the correct output at Pin 9, i.e., 1 V dc should give 1.000 V dc output. Of course, a 2 V peak-to-peak sine wave should give 0.707 V dc output. Remaining errors are due to the nonlinearity.

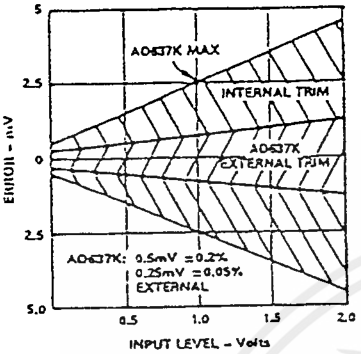


Figure 4. Max Total Error vs. Input Level AD637K Internal and External Trims

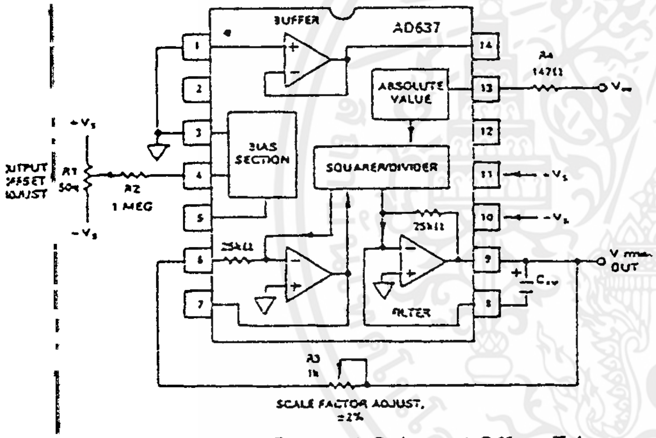


Figure 5. Optional External Gain and Offset Trims

CHOOSING THE AVERAGING TIME CONSTANT

The AD637 will compute the true rms value of both dc and ac input signals. At dc the output will track the absolute value of the input exactly; with ac signals the AD637's output will approach the true rms value of the input. The deviation from the ideal rms value is due to an averaging error. The averaging error is comprised of an ac and dc component. Both components are functions of input signal frequency f, and the averaging time constant τ (τ: 25 ms/µF of averaging capacitance). As shown in Figure 6, the averaging error is defined as the peak value of the ac component, ripple, plus the value of the dc error.

The peak value of the ac ripple component of the averaging error is defined approximately by the relationship:

$$\frac{50}{6.3\,\tau f} \text{ in \% of reading where } (t > 1/f)$$

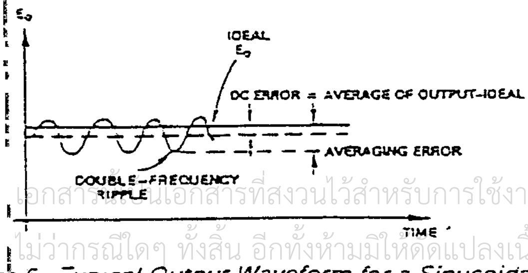


Figure 6. Typical Output Waveform for a Sinusoidal Input

This ripple can add a significant amount of uncertainty to the accuracy of the measurement being made. The uncertainty can be significantly reduced through the use of a post filtering network or by increasing the value of the averaging capacitor.

The dc error appears as a frequency dependent offset at the output of the AD637 and follows the equation:

$$\frac{1}{0.16 + 6.4\tau^2 f^2} \text{ in \% of reading}$$

Since the averaging time constant, set by C_{AV}, directly sets the time that the rms converter "holds" the input signal during computation, the magnitude of the dc error is determined only by C_{AV} and will not be affected by post filtering.

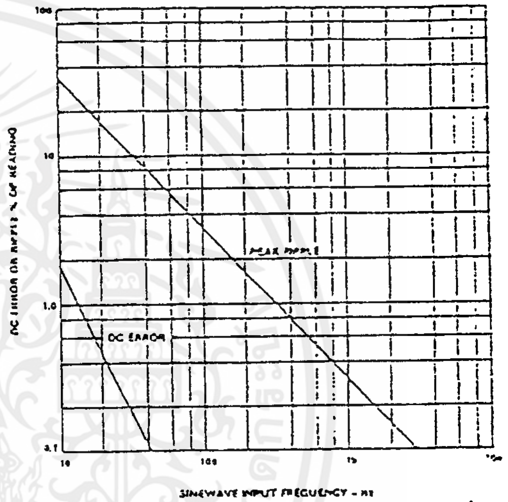


Figure 7. Comparison of Percent DC Error to the Percent Peak Ripple over Frequency Using the AD637 in the Standard RMS Connection with a 1 × µF C_{AV}

The ac ripple component of averaging error can be greatly reduced by increasing the value of the averaging capacitor. There are two major disadvantages to this: first, the value of the averaging capacitor will become extremely large and second, the settling time of the AD637 increases in direct proportion to the value of the averaging capacitor (Ts = 115 ms/µF of averaging capacitance). A preferable method of reducing the ripple is through the use of the post filter network, shown in Figure 8. This network can be used in either a one or two pole configuration. For most applications the single pole filter will give the best overall compromise between ripple and settling time.

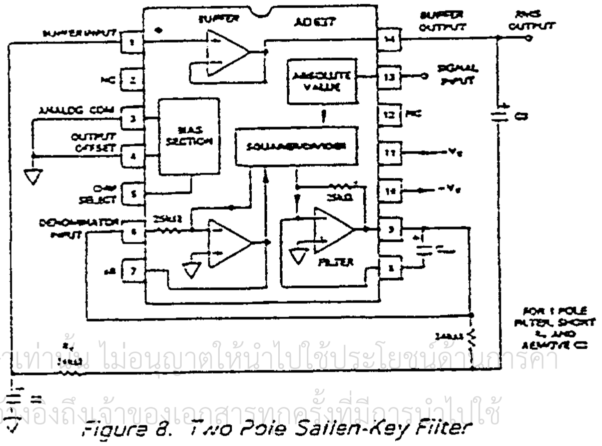


Figure 8. Two Pole Sallen-Key Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[AD]637–SPECIFICATIONS (@ + 25°C, and ±15 V dc unless otherwise noted)

	AD637J/A			AD637K/B			AD637S			
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Units
[TRAN]SFER FUNCTION		V_{OUT} = avg. $(V_{IN})^2$			V_{OUT} = avg. $(V_{IN})^2$			V_{OUT} = avg. $(V_{IN})^2$		
[CON]VERSION ACCURACY										
[Total] Error, Internal Trim[1] (Fig. 2)			±1 ± 0.5			±0.5 ± 0.2			±1 ± 0.5	mV ± % of Reading
T_{MIN} to T_{MAX}			±3.0 ± 0.6			±2.0 ± 0.3			±6 ± 0.7	mV ± % of Reading
vs. Supply, + V_{IN} = +300 mV		30	150		30	150		30	150	µV/V
vs. Supply, – V_{IN} = –300 mV		100	300		100	300		100	300	µV/V
DC Reversal Error at 2 V			0.25			0.1			0.25	% of Reading
Nonlinearity 2 V Full Scale[2]			0.04			0.02			0.04	% of FSR
Nonlinearity 7 V Full Scale			0.05			0.05			0.05	% of FSR
[Total] Error, External Trim		±0.5 ± 0.1			±0.25 ± 0.05			±0.5 ± 0.1		mV ± % of Reading
[ERR]OR VS. CREST FACTOR[3]										
[Cre]st Factor 1 to 2		Specified Accuracy			Specified Accuracy			Specified Accuracy		
[Cre]st Factor = 3		±0.1			±0.1			±0.1		% of Reading
[Cre]st Factor = 10		±1.0			±1.0			±1.0		% of Reading
[AVE]RAGING TIME CONSTANT		25			25			25		ms/µF C_{AV}
[INP]UT CHARACTERISTICS										
[Sig]nal Range, ±15 V Supply										
Continuous RMS Level		0 to 7			0 to 7			0 to 7		V rms
Peak Transient Input			±15			±15			±15	V p-p
[Sig]nal Range, ±5 V Supply										
Continuous rms Level		0 to 4			0 to 4			0 to 4		V rms
Peak Transient Input			±6			±6			±6	V p-p
[Max]imum Continuous Nondestructive Input Level (All Supply Voltages)			±15			±15			±15	V p-p
[Inp]ut Resistance	6.4	8	9.6	6.4	8	9.6	6.4	8	9.6	kΩ
[Inp]ut Offset Voltage			±0.5			±0.2			±0.5	mV
[FRE]QUENCY RESPONSE[4]										
Bandwidth for 1% Additional Error (0.09 dB)										
V_{IN} = 20 mV		11			11			11		kHz
V_{IN} = 200 mV		66			66			66		kHz
V_{IN} = 2 V		200			200			200		kHz
±3 dB Bandwidth										
V_{IN} = 20 mV		150			150			150		kHz
V_{IN} = 200 mV		1			1			1		MHz
V_{IN} = 2 V		8			8			8		MHz
[OU]TPUT CHARACTERISTICS										
[Of]fset Voltage			±1			±0.5			±1	mV
vs. Temperature		±0.05	±0.089		±0.04	±0.056		±0.04	±0.07	mV/°C
[Vo]ltage Swing, ±15 V Supply, 2 kΩ Load	0 to +12.0	+13.5		0 to +12.0	+13.5		0 to +12.0	+13.5		V
[Vo]ltage Swing, ±3 V Supply, 2 kΩ Load	0 to +2	+2.2		0 to +2	+2.2		0 to +2	+2.2		V
[Out]put Current	6			6			6			mA
[Sh]ort Circuit Current		20			20			20		mA
[Re]sistance, Chip Select "High"		0.5			0.5			0.5		Ω
[Re]sistance, Chip Select "Low"		100			100			100		kΩ
[dB] OUTPUT										
[Err]or, V_{IN} 7 mV to 7 V rms, 0 dB = 1 V rms		±0.5			±0.3			±0.5		dB
[Sc]ale Factor		–3			–3			–3		mV/dB
[Sc]ale Factor Temperature Coefficient		–0.33			–0.33			–0.33		% of Reading/°C
		–0.033			–0.033			–0.033		dB/°C
[I_{REF}] for 0 dB = 1 V rms	5	20	80	5	20	80	5	20	80	µA
[I_{REF}] Range	1		100	1		100	1		100	µA
[BU]FFER AMPLIFIER										
[Inp]ut Output Voltage Range	–V_S to (+V_S – 2.5 V)			–V_S to (+V_S – 2.5 V)			–V_S to (+V_S – 2.5 V)			V
[Inp]ut Offset Voltage		±0.8	±2		±0.5	±1		±0.8	±2	mV
[Inp]ut Current		±2	±10		±2	±5		±2	±10	nA
[Inp]ut Resistance		10^8			10^8			10^8		Ω
[Ou]tput Current	(+5 mA, –130 µA)			(+5 mA, –130 µA)			(+5 mA, –130 µA)			
[Sh]ort Circuit Current		20			20			20		mA
[Sm]all Signal Bandwidth		1			1			1		MHz
[Sl]ew Rate[5]		5			5			5		V/µs
[DE]NOMINATOR INPUT										
[Inp]ut Range		0 to +10			0 to +10			0 to +10		V
[Inp]ut Resistance	20	25	30	20	25	30	20	25	30	kΩ
[Of]fset Voltage		±0.2	±0.5		±0.2	±0.5		±0.2	±0.5	mV
[CHI]P SELECT PROVISION (CS)										
[R]MS "ON" Level	Open or +2.4 V < V_C < +V_S			Open or +2.4 V < V_C < +V_S			Open or +2.4 V < V_C < +V_S			
[R]MS "OFF" Level	V_C < +0.2 V			V_C < +0.2 V			V_C < +0.2 V			
[I]OUT of Chip Select										
CS "LOW"	10			10			10			µA
CS "HIGH"	Zero			Zero			Zero			
[O]n Time Constant	10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			
[O]ff Time Constant	10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			10 µs + ((25 kΩ) × C_{AV})			
[PO]WER SUPPLY										
[Op]erating Voltage Range	±3.0		±18	±3.0		±18	±3.0		±18	V
[Q]uiescent Current		2.2	3		2.2	3		2.2	3	mA
[St]andby Current		350	450		350	450		350	450	µA
[TRA]NSISTOR COUNT		107			107			107		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำการดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

:9a shows values of C_{AV} and the corresponding averaging s a function of sine-wave frequency for the standard rms ction. The 1% settling time is shown on the right side of aph.

e 9b shows the relationship between averaging error, signal ncy settling time and averaging capacitor value. This is drawn for filter capacitor values of 3.3 times the averag- pacitor value. This ratio sets the magnitude of the ac and rs equal at 50 Hz. As an example, by using a 1 µF averag- pacitor and a 3.3 µF filter capacitor, the ripple for a 60 Hz signal will be reduced from 5.3% of reading using the ging capacitor alone to 0.15% using the single pole filter. gives a factor of thirty reduction in ripple and yet the set- time would only increase by a factor of three. The values of nd C_2, the filter capacitor, can be calculated for the desired of averaging error and settling time by using Figure 9b.

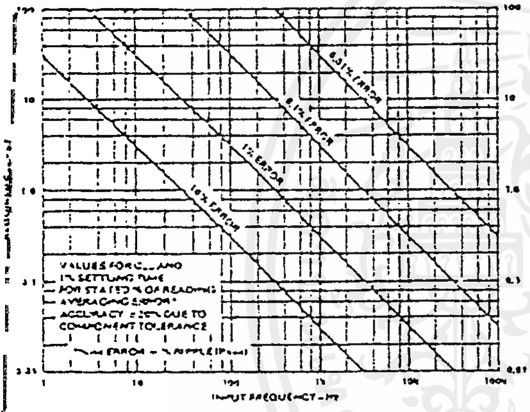


Figure 9a.

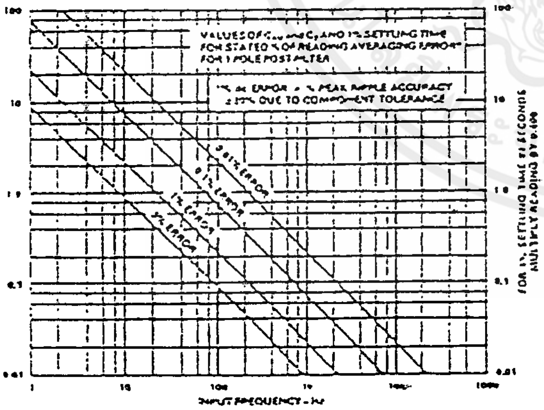


Figure 9b.

symmetry of the input signal also has an effect on the mag- le of the averaging error. Table I gives practical component es for various types of 60 Hz input signals. These capacitor es can be directly scaled for frequencies other than 60 Hz, for 30 Hz double these values, for 120 Hz they are halved.

applications that are extremely sensitive to ripple, the two pole figuration is suggested. This configuration will minimize citor values and settling time while maximizing performance.

re 9c can be used to determine the required value of C_{AV}, nd C_3 for the desired level of ripple and settling time.

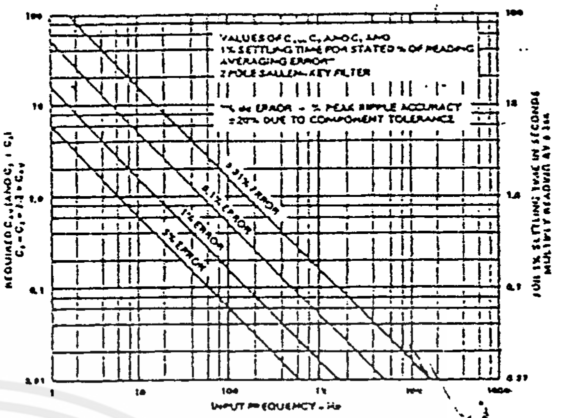


Figure 9c.

Table I. Practical Values of C_{AV} and C2 for Various Input Waveforms

	Input Waveform and Period	Absolute Value Circuit Waveform and Period	Minimum R × C_{AV} Time Constant	Recommended C_{AV} and C2 Values for 1% Averaging Error @ 60 Hz with T = 16.6 ms		1% Settling Time
				Recommended Standard Value C_{AV}	Recommended Standard Value C2	
A	Symmetrical Sine Wave		1/2T	0.47 µF	1.5 µF	181 ms
B	Sine Wave with dc Offset		T	0.82 µF	2.7 µF	[illegible]
C	Pulse Train Waveform		$10(T - T_2)$	[illegible]	22 µF	2.67 sec
D			$10(T - 2T_2)$	5.6 µF	18 µF	2.17 sec

FREQUENCY RESPONSE

The frequency response of the AD637 at various signal levels is shown in Figure 10. The dashed lines show the upper frequency limits for 1%, 10% and ±3 dB of additional error. For example, note that for 1% additional error with a 2 V rms input the highest frequency allowable is 200 kHz. A 200 mV signal can be measured with 1% error at signal frequencies up to 100 kHz.

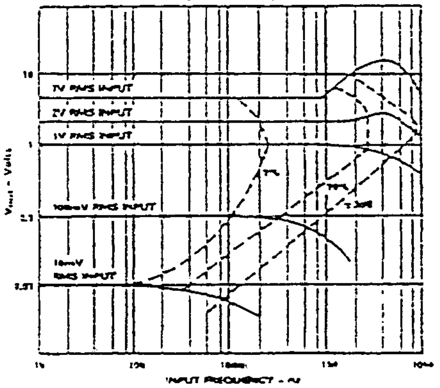


Figure 10. Frequency Response

To take full advantage of the wide bandwidth of the AD637 care must be taken in the selection of the input buffer amplifier. To insure that the input signal is accurately presented to the converter, the input buffer must have a −3 dB bandwidth that is

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้อง

ter than that of the AD637. A point that should not be over- ked is the importance of slew rate in this application. For mple, the minimum slew rate required for a 1 V rms 5 MHz -wave input signal is 44 V/µs. The user is cautioned that this he minimum rising or falling slew rate and that care must be rcised in the selection of the buffer amplifier as some amplifi- exhibit a two-to-one difference between rising and falling slew es. The AD845 is recommended as a precision input buffer.

MEASUREMENT ACCURACY AND CREST FACTOR

est factor is often overlooked in determining the accuracy of ac measurement. Crest factor is defined as the ratio of the ak signal amplitude to the rms value of the signal (C.F. = Vp/ rms). Most common waveforms, such as sine and triangle ves, have relatively low crest factors (≤2). Waveforms which semble low duty cycle pulse trains, such as those occurring in itching power supplies and SCR circuits, have high crest ctors. For example, a rectangular pulse train with a 1% duty cle has a crest factor of 10 (C.F. = 1 $\sqrt{\eta}$).

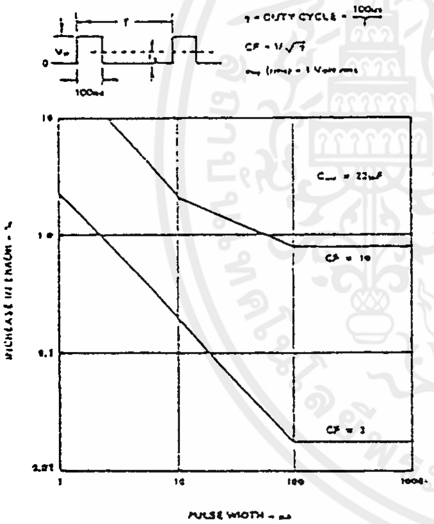


Figure 11. AD637 Error vs. Pulse Width Rectangular Pulse

Figure 12 is a curve of additional reading error for the AD637 for a 1 volt rms input signal with crest factors from 1 to 11. A rectangular pulse train (pulse width 100 µs) was used for this test since it is the worst-case waveform for rms measurement (all

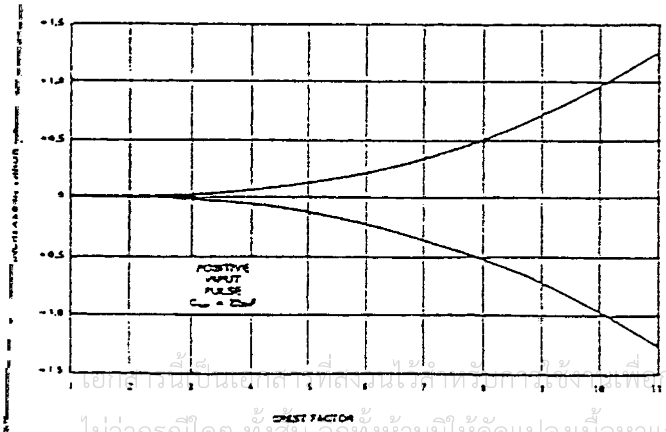


Figure 12. Additional Error vs. Crest Factor

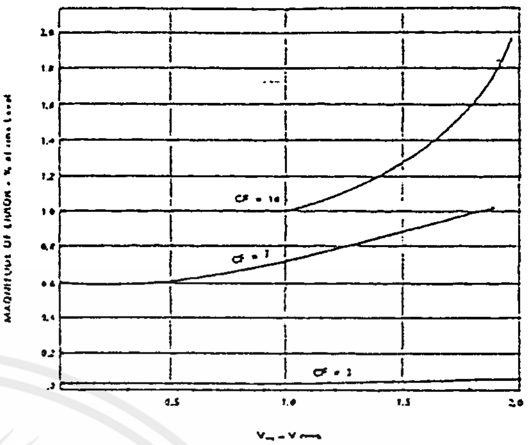


Figure 13. Error vs. RMS Input Level for Three Common Crest Factors

the energy is contained in the peaks). The duty cycle and peak amplitude were varied to produce crest factors from 1 to 10 while maintaining a constant 1 volt rms input amplitude.

CONNECTION FOR dB OUTPUT

Another feature of the AD637 is the logarithmic or decibel output. The internal circuit which computes dB works well over a 60 dB range. The connection for dB measurement is shown in Figure 14. The user selects the 0 dB level by setting R1 for the proper 0 dB reference current (which is set to exactly cancel the log output current from the squarer/divider circuit at the desired 0 dB point). The external op amp is used to provide a more convenient scale and to allow compensation of the +0.33%/°C temperature drift of the dB circuit. The special T.C. resistor R3 is available from Tel Labs in Londonderry, New Hampshire (model Q-81) and from Precision Resistor Inc., Hillside, N.J. (model PT146).

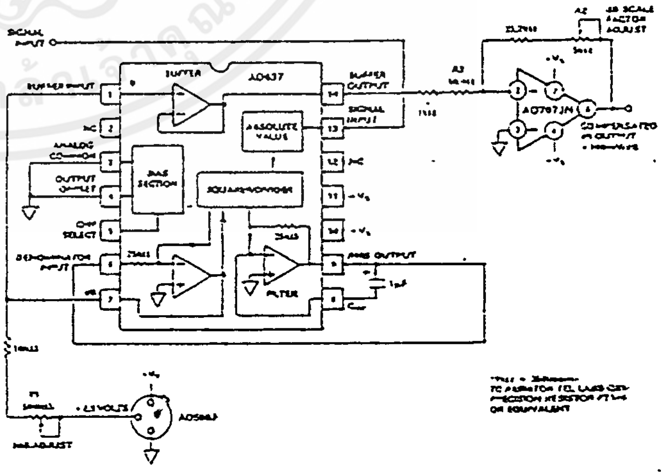


Figure 14. dB Connection

DB CALIBRATION

1. Set V_{IN} = 1.00 V dc or 1.00 V rms
2. Adjust R1 for 0 dB out = 0.00 V
3. Set V_{IN} = 0.1 V dc or 0.10 V rms
4. Adjust R2 for dB out = - 2.00 V

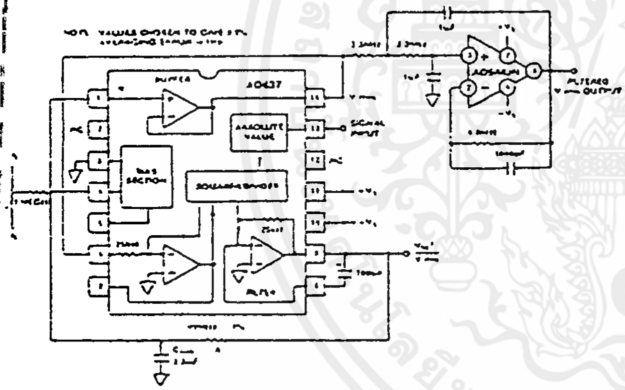
Any other dB reference can be used by setting V_{IN} and R1 accordingly.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FREQUENCY MEASUREMENTS

frequencies of the signals to be measured are below the value of the averaging capacitor required to deliver % averaging error in the standard rms connection be- extremely large. The circuit shown in Figure 15 shows an tive method of obtaining low frequency rms measure- The averaging time constant is determined by the prod- R and C_{AV1}. in this circuit 0.5 s/μF of C_{AV}. This circuit s a 20:1 reduction in the value of the averaging capacitor, ting the use of high quality tantalum capacitors. It is sug- that the two pole Sallen-Key filter shown in the diagram d to obtain a low ripple level and minimize the value of eraging capacitor.

frequency of interest is below 1 Hz, or if the value of the ging capacitor is still too large, the 20:1 ratio can be ased. This is accomplished by increasing the value of R. If done it is suggested that a low input current, low offset ge amplifier like the AD548 be used instead of the internal amplifier. This is necessary to minimize the offset error duced by the combination of amplifier input currents and arger resistance.



igure 15. AD637 as a Low Frequency RMS Converter

TOR SUMMATION

or summation can be accomplished through the use of two 37s as shown in Figure 16. Here the averaging capacitors mitted (nominal 100 pF capacitors are used to insure stability of the filter amplifier), and the outputs are summed as shown. The output of the circuit is

$$V_O = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2}$$

This concept can be expanded to include additional terms by feeding the signal from Pin 9 of each additional AD637 through a 10 kΩ resistor to the summing junction of the AD711, and tying all of the denominator inputs (Pin 6) together.

If C_{AV} is added to IC1 in this configuration, the output is $\overline{V_X^2 + V_Y^2}$. If the averaging capacitor is included on both IC1 and IC2, the output will be $\overline{V_X^2} + \overline{V_Y^2}$.

This circuit has a dynamic range of 10 V to 10 mV and is limited only by the 0.5 mV offset voltage of the AD637. The useful bandwidth is 100 kHz.

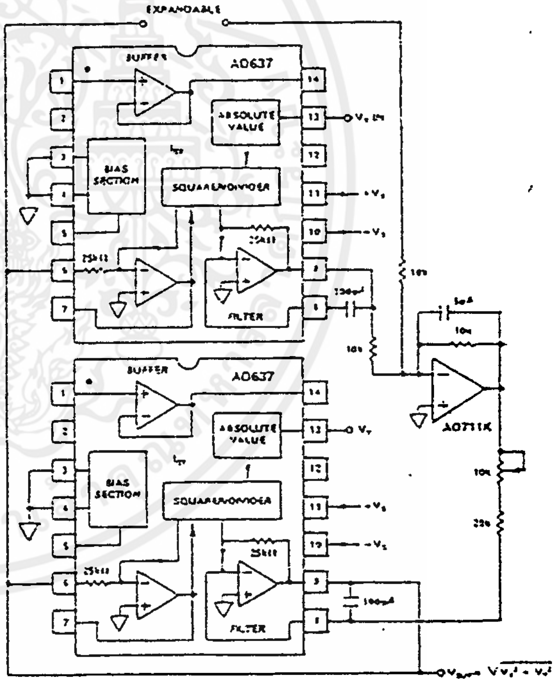
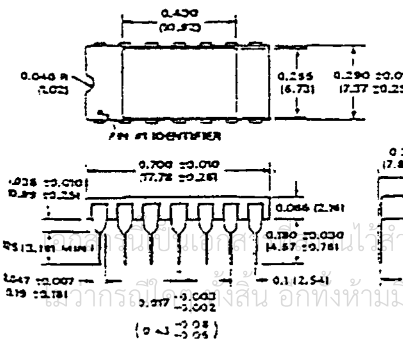


Figure 16. AD637 Vector Sum Configuration

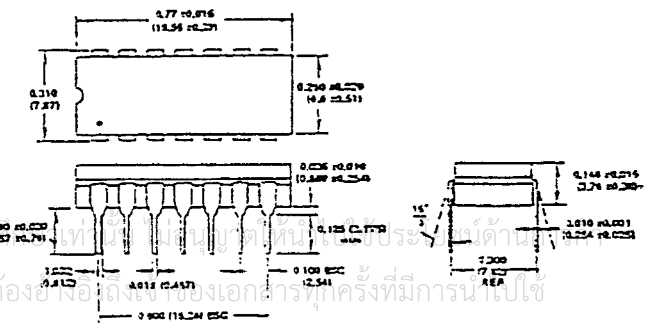
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

TO-116 (D) Package



Cerdip (Q) Package



เอกสารนี้เป็นเอกสาร...ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ...เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXAR XR-2206

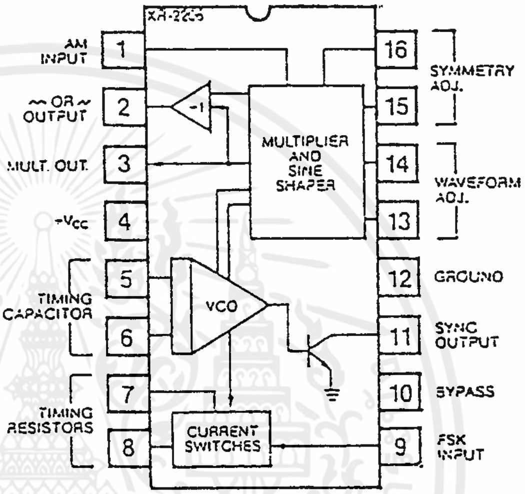
Monolithic Function Generator

GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high-stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01 Hz to more than 1 MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20 ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range, with an external control voltage, having a very small affect on distortion.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



FEATURES

Low-Sine Wave Distortion	0.5%, Typical
Excellent Temperature Stability	20 ppm/°C, Typical
Wide Sweep Range	2000:1, Typical
Low-Supply Sensitivity	0.01%V, Typical
Linear Amplitude Modulation	
TTL Compatible FSK Controls	
Wide Supply Range	10V to 26V
Adjustable Duty Cycle	1% to 99%

ORDERING INFORMATION

Part Number	Package	Operating Temperature
XR-2206M	Ceramic	−55°C to +125°C
XR-2206N	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206P	Plastic	0°C to +70°C
XR-2206CN	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2206CP	Plastic	0°C to +70°C

APPLICATIONS

Waveform Generation
Sweep Generation
AM/FM Generation
V/F Conversion
FSK Generation
Phase-Locked Loops (VCO)

SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2206 is comprised of four functional blocks: a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO actually produces an output frequency proportional to an input current, which is produced by a resistor from the timing terminals to ground. The current switches route one of the timing pins current to the VCO controlled by an FSK input pin, to produce an output frequency. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK Generation Applications.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply	26V
Power Dissipation	750 mW
Derate Above 25°C	5 mW/°C
Total Timing Current	6 mA
Storage Temperature	−65°C to +150°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of Figure 1, $V^+ = 12V$, $T_A = 25°$, $C = 0.01\ \mu F$, $R_1 = 100\ k\Omega$, $R_2 = 10\ k\Omega$, $R_3 = 25\ k\Omega$ unless otherwise specified. S_1 open for triangle, closed for sine wave.

PARAMETERS	XR-2206M			XR-2206C			UNITS	CONDITIONS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
GENERAL CHARACTERISTICS								
Single Supply Voltage	10		26	10		26	V	
Split-Supply Voltage	±5		±13	±5		±13	V	
Supply Current		12	17		14	20	mA	$R_1 \geq 10\ k\Omega$
OSCILLATOR SECTION								
Max. Operating Frequency	0.5	1		0.5	1		MHz	$C = 1000\ pF$, $R_1 = 1\ k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50\ \mu F$, $R_1 = 2\ M\Omega$
Frequency Accuracy		±1	±4		±2		% of f_0	$f_0 = 1/R_1C$
Temperature Stability		±10	±50		±20		ppm/°C	$0°C \leq T_A \leq 70°C$, $R_1 = R_2 = 20\ k\Omega$
Supply Sensitivity		0.01	0.1		0.01		%/V	$V_{LOW} = 10V$, $V_{HIGH} = 20V$, $R_1 = R_2 = 20\ k\Omega$
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	f_H @ $R_1 = 1\ k\Omega$, f_L @ $R_1 = 2\ M\Omega$
Sweep Linearity								
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 1\ kHz$, $f_H = 10\ kHz$
1000:1 Sweep		8			8		%	$f_L = 100\ kHz$, $f_H = 100\ kHz$
FM Distortion		0.1			0.1		%	±10% Deviation
Recommended Timing Components								
Timing Capacitor: C	0.001		100	0.001		100	μF	See Figure 4.
Timing Resistors: R_1 & R_2	1		2000	1		2000	kΩ	
Triangle Sine Wave Output								See Note 1, Figure 2.
Triangle Amplitude		160			160		mV/kΩ	Figure 1, S_1 Open
Sine Wave Amplitude	40	60	80		60		mV/kΩ	Figure 1, S_1 Closed.
Max. Output Swing		6			6		V p-p	
Output Impedance		600			600		Ω	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep
Sine Wave Amplitude Stability		4800			4800		ppm/°C	See Note 2.
Sine Wave Distortion								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30\ k\Omega$
With Adjustment		0.4	1.0		0.5	1.5	%	See Figures 6 and 7.
Amplitude Modulation								
Input Impedance	50	100		50	100		kΩ	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
Square-Wave Output								
Amplitude		12			12		V p-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		nsec	$C_L = 10\ pF$
Fall Time		50			50		nsec	$C_L = 10\ pF$
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	$I_L = 2\ mA$
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	μA	$V_{11} = 26V$
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

Note 1: Output amplitude is directly proportional to the resistance, R_3, on Pin 3. See Figure 2.
Note 2: For maximum amplitude stability, R_3 should be a positive temperature coefficient resistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

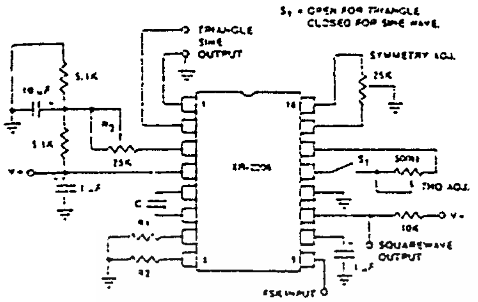


Figure 1. Basic Test Circuit.

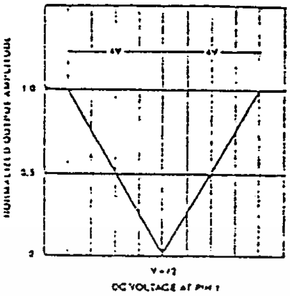


Figure 5. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1).

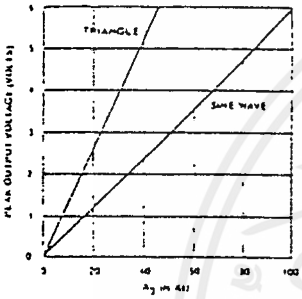


Figure 2. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R_3, at Pin 3.

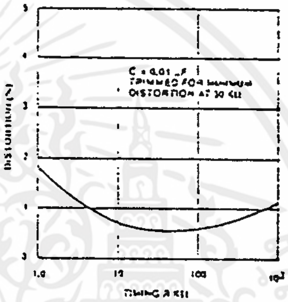


Figure 6. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

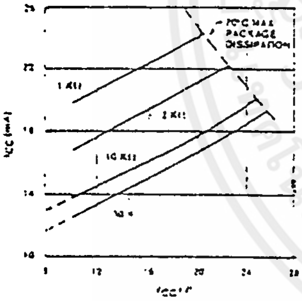


Figure 3. Supply Current versus Supply Voltage, Timing, R.

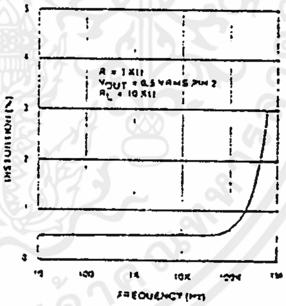


Figure 7. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.

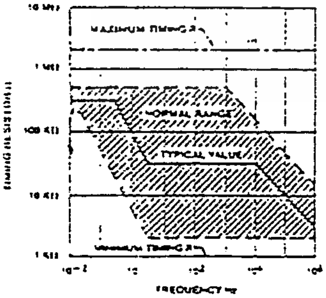


Figure 4. R versus Oscillation Frequency.

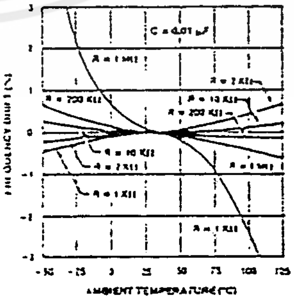


Figure 8. Frequency Drift versus Temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

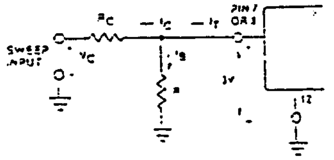


Figure 9. Circuit Connection for Frequency Sweep.

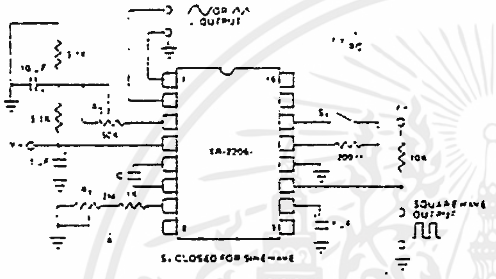


Figure 10. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 2 for Choice of R_3).

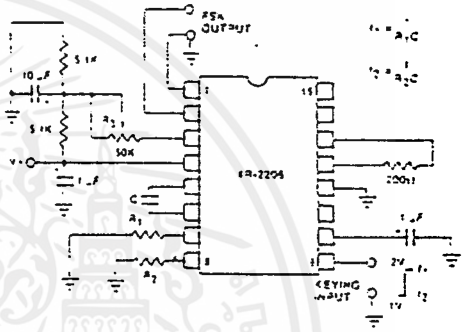


Figure 12. Sinusoidal FSK Generator.

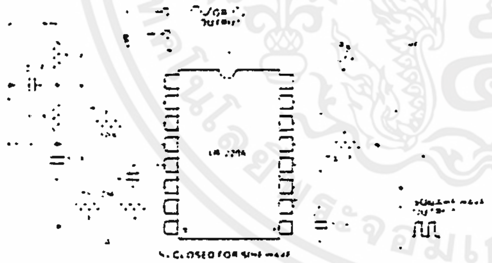


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R_3 Determines Output Swing—See Figure 2.)

Figure 13. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency-Shift Keying:

The XR-2206 can be operated with two separate timing resistors, R_1 and R_2, connected to the timing Pin 7 and 8, respectively, as shown in Figure 12. Depending on the polarity of the logic signal at Pin 9, either one or the other of these timing resistors is activated. If Pin 9 is open-circuited or connected to a bias voltage $\geq 2V$, only R_1 is activated. Similarly, if the voltage level at Pin 9 is $\leq 1V$, only R_2 is activated. Thus, the output frequency can be keyed between two levels, f_1 and f_2, as:

$$f_1 = 1/R_1C \text{ and } f_2 = 1/R_2C$$

For split-supply operation, the keying voltage at Pin 9 is referenced to V^-.

Output DC Level Control:

The dc level at the output (Pin 2) is approximately the same as the dc bias at Pin 3. In Figures 10, 11 and 12, Pin 3 is biased midway between V^+ and ground, to give an output dc level of $\approx V^+/2$.

APPLICATIONS INFORMATION

Sine Wave Generation

Without External Adjustment:

Figure 10 shows the circuit connection for generating a sinusoidal output from the XR-2206. The potentiometer, R_1 at Pin 7, provides the desired frequency tuning. The maximum output swing is greater than $V^+/2$, and the typical distortion (THD) is $< 2.5\%$. If lower sine wave distortion is desired, additional adjustments can be provided as described in the following section.

The circuit of Figure 10 can be converted to split-supply operation, simply by replacing all ground connections with V^-. For split-supply operation, R_3 can be directly connected to ground.

With External Adjustment:

The harmonic content of sinusoidal output can be reduced to $\approx 0.5\%$ by additional adjustments as shown in Figure 11. The potentiometer, R_A, adjusts the sine-shaping resistor, and R_B provides the fine adjustment for the waveform symmetry. The adjustment procedure is as follows:

1. Set R_B at midpoint, and adjust R_A for minimum distortion.
2. With R_A set as above, adjust R_B to further reduce distortion.

Triangle Wave Generation

The circuits of Figures 10 and 11 can be converted to triangle wave generation, by simply open-circuiting Pin 13 and 14 (i.e., S_1 open). Amplitude of the triangle is approximately twice the sine wave output.

FSK Generation

Figure 12 shows the circuit connection for sinusoidal FSK signal operation. Mark and space frequencies can be independently adjusted, by the choice of timing resistors, R_1 and R_2; the output is phase-continuous during transitions. The keying signal is applied to Pin 9. The circuit can be converted to split-supply operation by simply replacing ground with V^-.

Pulse and Ramp Generation

Figure 13 shows the circuit for pulse and ramp waveform generation. In this mode of operation, the FSK keying terminal (Pin 9) is shorted to the square-wave output (Pin 11), and the circuit automatically frequency-shift keys itself between two separate frequencies during the positive-going and negative-going output waveforms. The pulse width and duty cycle can be adjusted from 1% to 99%, by the choice of R_1 and R_2. The values of R_1 and R_2 should be in the range of 1 kΩ to 2 MΩ.

1

PRINCIPLES OF OPERATION

Description of Controls

Frequency of Operation:

The frequency of oscillation, f_0, is determined by the external timing capacitor, C, across Pin 5 and 6, and by the timing resistor, R, connected to either Pin 7 or 8. The frequency is given as:

$$f_0 = \frac{1}{RC} \text{ Hz}$$

and can be adjusted by varying either R or C. The recommended values of R, for a given frequency range, as shown in Figure 4. Temperature stability is optimum for $4\text{ k}\Omega < R < 200\text{ k}\Omega$. Recommended values of C are from 1000 pF to 100 μF.

Frequency Sweep and Modulation:

Frequency of oscillation is proportional to the total timing current, I_T, drawn from Pin 7 or 8:

$$f = \frac{320\, I_T\,(\text{mA})}{C\,(\mu F)} \text{ Hz}$$

Timing terminals (Pin 7 or 8) are low-impedance points, and are internally biased at +3V, with respect to Pin 12. Frequency varies linearly with I_T, over a wide range of current values, from 1 μA to 3 mA. The frequency can be controlled by applying a control voltage, V_C, to the activated timing pin as shown in Figure 9. The frequency of oscillation is related to V_C as:

$$f = \frac{1}{RC}\left[1 + \frac{R}{R_C}\left(1 - \frac{V_C}{3}\right)\right] \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2206

where V_C is in volts. The voltage-to-frequency conversion gain, K, is given as:

$$K = \partial f/\partial V_C = -\frac{0.32}{R_C C}\ \text{Hz/V}$$

CAUTION: For safety operation of the circuit, I_T should be limited to ≤ 3 mA.

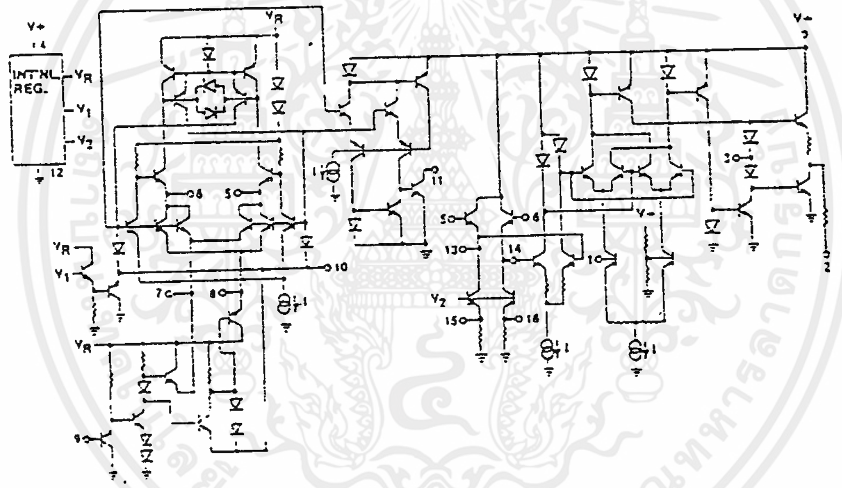
Output Amplitude:

Maximum output amplitude is inversely proportional to the external resistor, R_3, connected to Pin 3 (see Figure 2). For sine wave output, amplitude is approximately 60 mV peak per kΩ of R_3; for triangle, the peak amplitude is approximately 160 mV peak per kΩ of R_3. Thus, for example, R_3 = 50 kΩ would produce approximately ±3V sinusoidal output amplitude.

Amplitude Modulation:

Output amplitude can be modulated by applying a dc bias and a modulating signal to Pin 1. The internal impedance at Pin 1 is approximately 100 kΩ. Output amplitude varies linearly with the applied voltage at Pin 1, for values of dc bias at this pin, within ±4 volts of $V^+/2$ as shown in Figure 5. As this bias level approaches $V^+/2$, the phase of the output signal is reversed, and the amplitude goes through zero. This property is suitable for phase-shift keying and suppressed-carrier AM generation. Total dynamic range of amplitude modulation is approximately 55 dB.

CAUTION: AM control must be used in conjunction with a well-regulated supply, since the output amplitude now becomes a function of V^+.



EQUIVALENT SCHEMATIC DIAGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2212

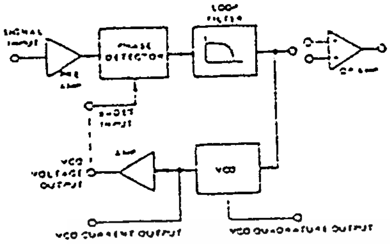


Figure 1. Functional Block Diagram of XR-2212 Precision PLL System

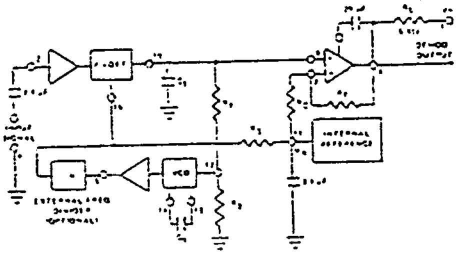


Figure 2. Generalized Circuit Connection for FM Detection, Signal Tracking or Frequency Synthesis

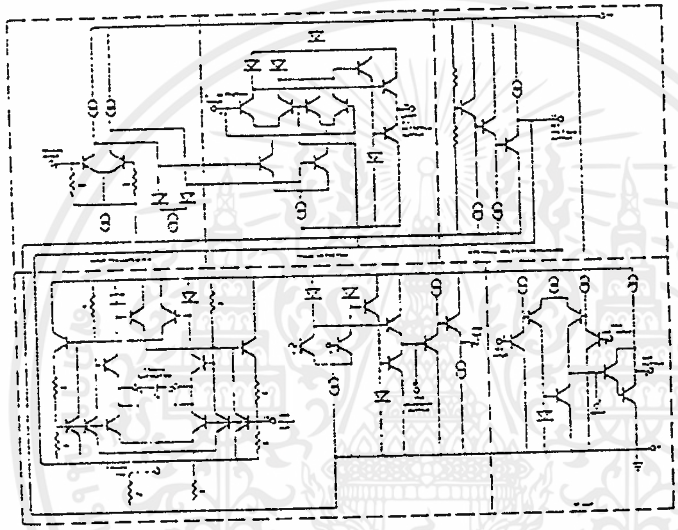


Figure 3. Simplified Circuit Schematic of XR-2212

TYPICAL CHARACTERISTICS

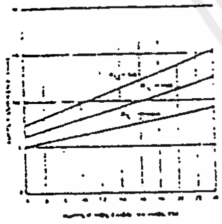


Figure 4. Typical Supply Current vs V+ (Logic Outputs Open Circuited)

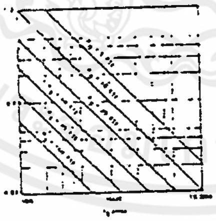


Figure 5. VCO Frequency vs Timing Resistor

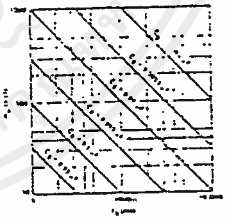


Figure 6. VCO Frequency vs Timing Capacitor

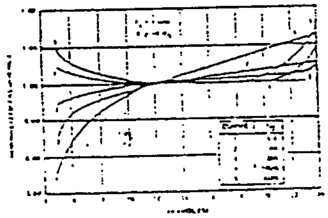


Figure 7. Typical fo vs Power Supply Characteristics

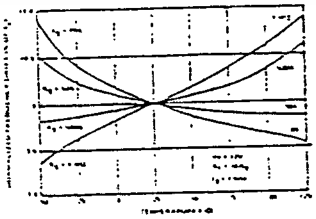


Figure 8. Typical Center Frequency Drift vs Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2212

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: $V^+ = +12V$, $T_A = +25°C$, $R_0 = 30\ k\Omega$, $C_0 = 0.033\ \mu F$, unless otherwise specified. See Figure 2 for component designation.

PARAMETERS	XR-2212/2212M			XR-2212C			UNITS	CONDITIONS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
GENERAL								
Supply Voltage	4.5		15	4.5		15	V	
Supply Current		5	10		6	12	mA	$R_0 \geq 10\ K\Omega$. See Fig. 4
OSCILLATOR SECTION								
Frequency Accuracy		±1	±3		±1		%	Deviation from $f_0 = 1/R_0C_0$
Frequency Stability								$R_1 = \infty$
Temperature		±20	±50		±20		ppm/°C	See Fig. 8.
Power Supply		0.05	0.5		0.05		%/V	$V^+ = 12 \pm 1$ V. See Fig. 7.
		.2			.2		%/V	$V^+ = 5 \pm 0.5$ V. See Fig. 7.
Upper Frequency Limit	100	300			300		kHz	$R_0 = 8.2\ K\Omega$, $C_0 = 400\ pF$
Lowest Practical Operating Frequency			0.01		0.01		Hz	$R_0 = 2\ M\Omega$, $C_0 = 50\ \mu F$
Timing Resistor, R_0								See Fig. 5.
Operating Range	5		2000	5		2000	KΩ	
Recommended Range	15		100	15		100	KΩ	See Fig. 7 and 8.
OSCILLATOR OUTPUTS								
Voltage Output								Measured at Pin 5.
Positive Swing, V_{OH}		11			11		V	
Negative Swing, V_{OL}	.3	.4			.5		V	
Current Sink Capability		1			1		mA	
Current Output								Measured at Pin 3.
Peak Current Swing	100	150			150		µA	
Output Impedance		1			1		MΩ	
Quadrature Output								Measured at Pin 15.
Output Swing		0.6			0.5		V	
DC Level		0.3			0.3		V	Referenced to Pin 11.
Output Impedance		3			3		KΩ	
LOOP PHASE DETECTOR SECTION								Measured at Pin 10.
Peak Output Current	±150	±200	±300	±100	±200	±300	µA	
Output Offset Current		±1			±2		µA	
Output Impedance		1			1		MΩ	
Maximum Swing	±4	±5		±4	±5		V	Referenced to Pin 11.
INPUT PREAMP SECTION								Measured at Pin 2.
Input Impedance		20			20		KΩ	
Input Signal to Cause Limiting		2	10		2		mVrms	
OP AMP SECTION								
Voltage Gain	55	70		55	70		dB	$R_L = 5.1\ K\Omega$, $R_F = \infty$
Input Bias Current		0.1	1		0.1	1	µA	
Offset Voltage		±5	±20		±5	±20	mV	
Slew Rate		2			2		V/µsec	
INTERNAL REFERENCE								Measured at Pin 11.
Voltage Level	4.9	5.3	5.7	4.75	5.3	5.85	V	
Output Impedance		100			100		Ω	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXAR XR-2212

Precision Phase-Locked Loop

GENERAL DESCRIPTION

The XR-2212 is an ultra-stable monolithic phase-locked loop (PLL) system especially designed for data communications and control system applications. Its on board reference and uncommitted operational amplifier, together with a typical temperature stability of better than 20 ppm/°C, make it ideally suited for frequency synthesis, FM detection, and tracking filter applications. The wide input dynamic range, large operating voltage range, large frequency range, and ECL, DTL, and TTL compatibility contribute to the usefulness and wide applicability of this device.

FEATURES

Quadrature VCO Outputs	
Wide Frequency Range	0.01 Hz to 300 kHz
Wide Supply Voltage Range	4.5V to 20V
DTL/TTL/ECL Logic Compatibility	
Wide Dynamic Range	2 mV to 3 Vrms
Adjustable Tracking Range (±1% to ±80%)	
Excellent Temp. Stability	20 ppm/°C, Typ.

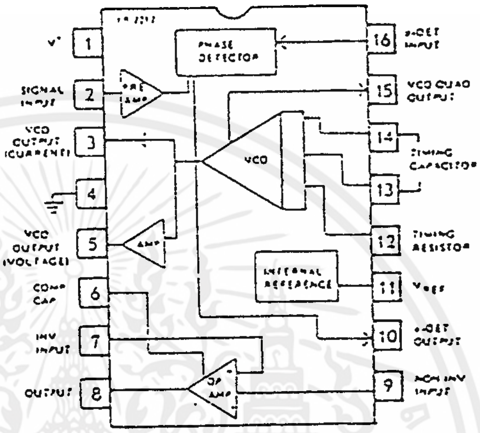
APPLICATIONS

Frequency Synthesis
Data Synchronization
FM Detection
Tracking Filters
FSK Demodulation

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply	18V
Input Signal Level	3 Vrms
Power Dissipation	
Ceramic Package:	750 mW
Derate Above T_A = +25°C	6 mW/°C
Plastic Package:	625 mW
Derate Above T_A = +25°C	5 mW/°C

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ORDERING INFORMATION

Part Number	Package	Operating Temperature
XR-2212M	Ceramic	−55°C to +125°C
XR2212CN	Ceramic	0°C to +70°C
XR-2212CP	Plastic	0°C to +70°C
XR-2212N	Ceramic	−40°C to +85°C
XR-2212P	Plastic	−40°C to +85°C

SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2212 is a complete PLL system with buffered inputs and outputs, an internal reference, and an uncommitted op amp. Two VCO outputs are pinned out; one sources current, the other sources voltage. This enables operation as a frequency synthesizer using an external programmable divider. The op amp section can be used as an audio preamplifier for FM detection or as a high speed sense amplifier (comparator) for FSK demodulation. The center frequency, bandwidth, and tracking range of the PLL are controlled independently by external components. The PLL output is directly compatible with MOS, DTL, ECL, and TTL logic families as well as microprocessor peripheral systems.

The precision PLL system operates over a supply voltage range of 4.5 V to 20 V, a frequency range of 0.01 Hz to 300 kHz, and accepts input signals in the range of 2 mV to 3 Vrms. Temperature stability of the VCO is typically better than 20 ppm/°C.

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2212

DESCRIPTION OF CIRCUIT CONTROLS

Signal Input (Pin 2): Signal is ac coupled to this terminal. The internal impedance at Pin 2 is 20 KΩ. Recommended input signal level is in the range of 10 mV to 5V peak-to-peak.

VCO Current Output (Pin 3): This is a high impedance (MΩ) current output terminal which can provide ±100 μA drive capability with a voltage swing equal to V^+. This output can directly interface with CMOS or NMOS logic families.

VCO Voltage Output (Pin 5): This terminal provides a low-impedance (≈ 50Ω) buffered output for the VCO. It can directly interface with low-power Schottky TTL. For interfacing with standard TTL circuits, a 750Ω pull-down resistor from pin 5 to ground is required. For operation of the PLL without an external divider, pin 5 can be dc coupled to pin 16.

Op Amp Compensation (Pin 6): The op amp section is frequency compensated by connecting an external capacitor from pin 6 to the amplifier output (pin 8). For unity-gain compensation a 20 pF capacitor is recommended.

Op Amp Inputs (Pins 7 and 9): These are the inverting and the non-inverting inputs for the op amp section. The common-mode range of the op amp inputs is from + 1V to (V^- − 1.5) volts.

Op Amp Output (Pin 8): The op amp output is an open-collector type gain stage and requires a pull-up resistor, R_L, to V^- for proper operation. For most applications, the recommended value of R_L is in 5 kΩ to 10 kΩ range.

Phase Detector Output (Pin 10): This terminal provides a high-impedance output for the loop phase-detector. The PLL loop filter is formed by R_1 and C_1 connected to Pin 10 (see Figure 2). With no input signal, or with no phase-error within the PLL, the dc level at Pin 10 is very nearly equal to V_R. The peak voltage swing available at the phase detector output is equal to $\pm V_R$.

Reference Voltage, V_R (Pin 11): This pin is internally biased at the reference voltage level, V_R: $V_R = V^+/2 -$ 650 mV. The dc voltage level at this pin forms an internal reference for the voltage levels at pins 10, 12 and 16. Pin 11 *must* be bypassed to ground with a 0.1 μF capacitor, for proper operation of the circuit.

VCO Control Input (Pin 12): VCO free-running frequency is determined by external timing resistor, R_0, connected from this terminal to ground. For optimum temperature stability, R_0 must be in the range of 10 KΩ to 100 KΩ (see Figure 8).

VCO Frequency Adjustment: VCO can be fine-tuned by connecting a potentiometer, R_X, in series with R_0 at Pin 12 (see Figure 10).

This terminal is a low-impedance point, and is internally biased at a dc level equal to V_R. The maximum timing current drawn from Pin 12 must be limited to ≤3 mA for proper operation of the circuit.

VCO Timing Capacitor (Pins 13 and 14): VCO frequency is inversely proportional to the external timing capacitor, C_0, connected across these terminals (see Figure 5). C_0 must be nonpolar, and in the range of 200 pF to 10 μF.

VCO Quadrature Output (Pin 15): The low-level (≈0.5 Vpp) output at this pin is at quadrature phase (i.e. 90° phase-offset) with the other VCO outputs at pins 3 and 5. The dc level at pin 15 is approximately 300 mV above V_R. The quadrature output can be used with an external multiplier as a "lock detect" circuit. In order not to degrade oscillator performance, the output at pin 15 must be buffered with an external high-impedance low-capacitance amplifier. When not in use, pin 15 should be left open-circuited.

Phase Detector Input (Pin 16): Voltage output of the VCO (pin 5) or the output of an external frequency divider is connected to this pin. The dc level of the sensing threshold for the phase detector is referenced to V_R. If the signal is capacitively coupled to pin 16, then this pin must be biased from pin 11, through an external resistor, R_B (R_B = 10 KΩ). The peak voltage swing applied to pin 16 *must not* exceed (V^+ − 1.5) volts.

PHASE-LOCKED LOOP PARAMETERS:

Transfer Characteristics:

Figure 9 shows the basic frequency to voltage characteristics of XR-2212. With no input signal present, filtered phase detector output voltage is approximately equal to the internal reference voltage, V_R, at pin 11. The PLL can track an input signal over its tracking bandwidth, shown in the figure. The frequencies f_{TL} and f_{TH} represent the lower and the upper edge of the tracking range. f_0 represents the VCO center frequency.

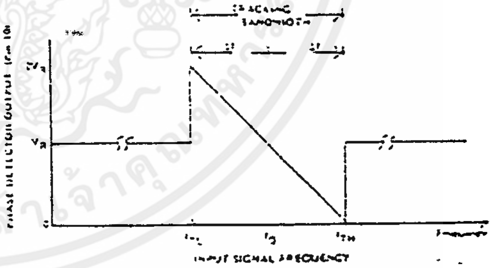


Figure 9. Phase Detector Output Voltage (Pin 10) as a Function of Input Signal Frequency. Note: Output Voltage is Referenced to Internal Reference Voltage V_R at Pin 11

Design Equations:

(See Figure 2 and Figure 9 for definition of components.)

1. VCO Center Frequency, f_0: $f_0 = 1/R_0C_0$ Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d) Calculate R_1 to set tracking bandwidth (see Figure 9, and design equation 5). If a range of output frequencies are desired, set R_1 to get:

$$\Delta f = f_{max} - f_{min}.$$

If a single fixed output frequency is desired, set R_1 to get:

$$\Delta f = 0.1\ f_0.$$

e) Calculate C_1 to obtain desired loop damping. (See design equation 4). For most applications, $\zeta = 1/2$ is recommended, thus:

$$C_1 = NC_0/4$$

Note: All component values except R_0 can be rounded-off to nearest standard value.

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XR-2212

2. Internal Reference Voltage, V_R (measured at Pin 11)

   $V_R = V+/2 - 650$ mV

3. Loop Low-Pass Filter Time Constant, τ: $\tau = R_1C_1$

4. Loop Damping, ζ: $\zeta = 1/4\sqrt{\frac{NC_0}{C_1}}$

   where N is the external frequency divider modular (See 2). If no divider is used, N = 1.

5. Loop Tracking Bandwidth, $\pm\Delta f/f_0$: $\Delta f/f_0 = R_0/R_1$

6. Phase Detector Conversion Gain, K_ϕ: (K_ϕ is the differential dc voltage across Pins 10 and 11, per unit of phase error at phase-detector input) $K_\phi = -2V_R/\pi$ volts/radian

7. VCO Conversion Gain, K_0: (K_0 is the amount of change in VCO frequency, per unit of dc voltage change at Pin 10. It is the reciprocal of the slope of conversion characteristics shown in Figure 9). $K_0 \approx -1/V_RC_0R_1$ Hz/volt

8. Total Loop Gain, K_T:

   $K_T = 2\pi K_\phi K_0 = 4/C_0R_1$ rad/sec/volt

9. Peak Phase-Detector Current, I_A: available at pin 10.

   $I_A = V_R$ (volts)/25 mA

APPLICATION INFORMATION

FM DEMODULATION:

XR-2212 can be used as a linear FM demodulator for both narrow-band and wide-band FM signals. The generalized circuit connection for this application is shown in Figure 10, where the VCO output (pin 5) is directly connected to the phase detector input (pin 16). The demodulated signal is obtained at phase detector output (pin 10). In the circuit connection of Figure 10, the op amp section of XR-2212 is used as a buffer amplifier to provide both additional voltage amplification as well as current drive capability. Thus, the demodulated output signal available at the op amp output (pin 6) is fully buffered from the rest of the circuit.

In the circuit of Figure 10, R_0C_0 set the VCO center frequency, R_1 sets the tracking bandwidth, C_1 sets the low-pass filter time constant. Op amp feedback resistors R_F and R_C set the voltage gain of the amplifier section.

Design Instructions:

The circuit of Figure 10 can be tailored to any FM demodulation application by a choice of the external components R_0, R_1, R_C, R_F, C_0 and C_1. For a given FM center frequency and frequency deviation, the choice of these components can be calculated as follows, using the design equations and definitions given on page 1-34, 1-35 and 1-36.

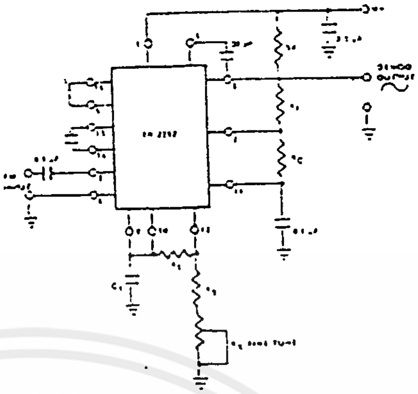


Figure 10. Circuit Connection for FM Demodulation

a) Choose VCO center frequency f_0 to be the same as FM carrier frequency.

b) Choose value of timing resistor R_0, to be in the range of 10 KΩ to 100 KΩ. This choice is arbitrary. The recommended value is $R_0 \cong 20$ KΩ. The final value of R_0 is normally fine-tuned with the series potentiometer, R_X.

c) Calculate value of C_0 from design equation (1) or from Figure 6:

$$C_0 = 1/R_0f_0$$

d) Choose R_1 to determine the tracking bandwidth, Δf (see design equation 5). The tracking bandwidth, Δf, should be set significantly wider than the maximum input FM signal deviation, Δf_{SM}. Assuming the tracking bandwidth to be "N" times larger than Δf_{SM}, one can re-write design equation 5 as:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{R_0}{R_1} = N\frac{\Delta f_{SM}}{f_0}$$

Table I lists recommended values of N, for various values of the maximum deviation of the input FM signal.

% Deviation of FM Signal ($\Delta f_{SM}/f_0$)	Recommended value of Bandwidth Ratio, N ($N = \Delta f/\Delta f_{SM}$)
1% or less	10
1 to 3%	5
1 to 5%	4
5 to 10%	3
10 to 30%	2
30 to 50%	1.5

TABLE I

Recommended values of bandwidth ratio, N, for various values of FM signal frequency deviation. (Note: N is the ratio of tracking bandwidth Δf to max. signal frequency deviation, Δf_{SM}).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

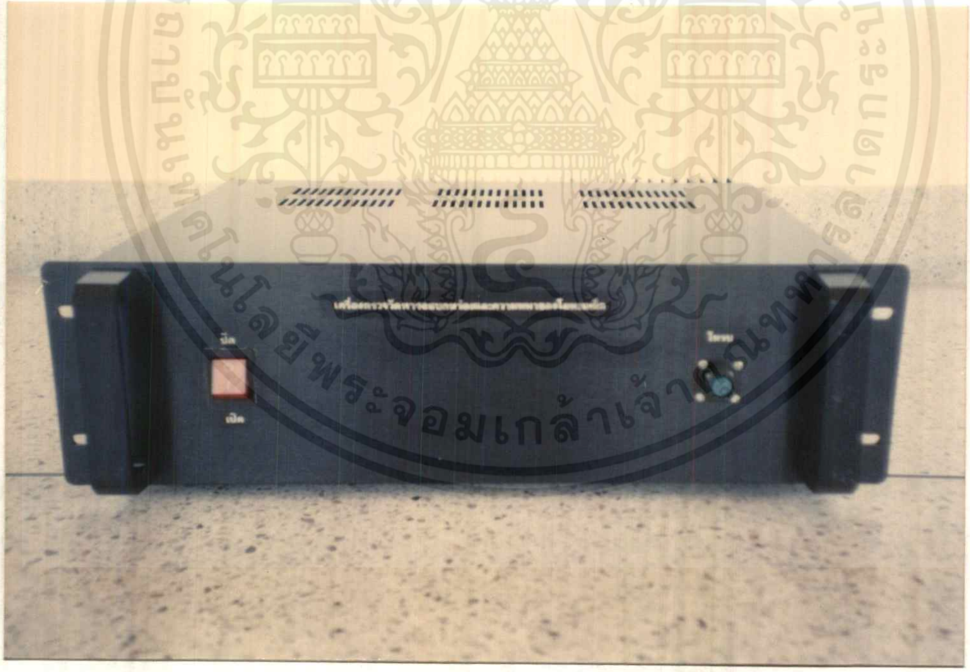
คู่มือการใช้เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก

(THE FERRO METAL OBJECT CRACK AND THICNESS DETECTOR)

เครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก มีส่วนประกอบดังนี้

1. สวิทช์เปิด-ปิด (Power)
2. ขั้วต่อโพรบทดสอบ (Probe Connecter)
3. ขั้วต่อสายเอาท์พุต (Output Connecter)
4. โพรบตรวจสอบ (Probe)
5. สายต่อสัญญาณ 25 ขา (DB-25)

ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



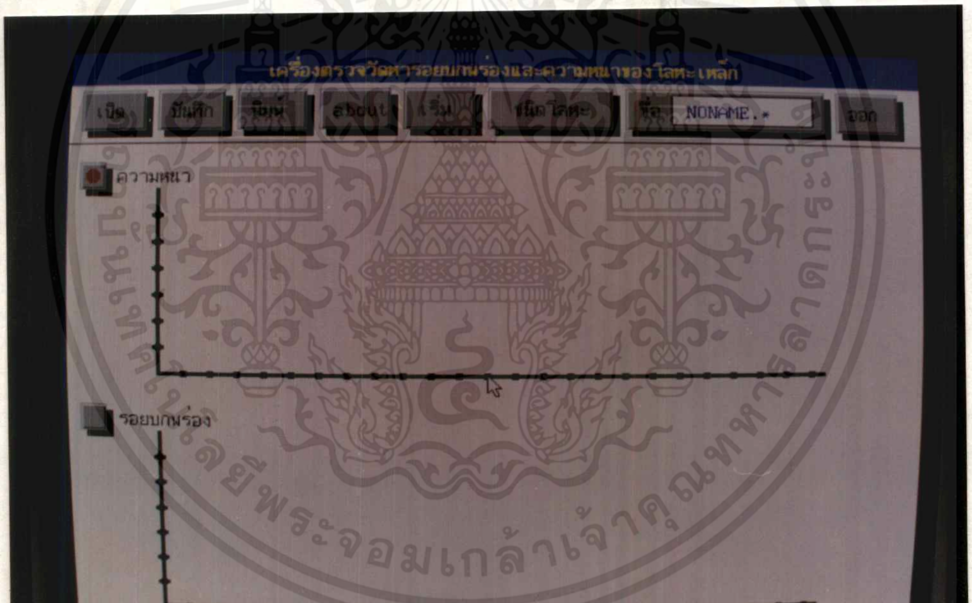
รูปที่ 1 ลักษณะของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเรียกใช้ไฟล์ **Projert.exe**

จะมีลักษณะเมนูดังรูปที่ 2 แต่ละเมนูมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1.เมนูเปิด จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะทำการเปิดแฟ้มข้อมูลหรือไม่ ถ้ามีให้คลิกเมาส์ที่เมนูเปิด หลังจากนั้นจะแสดงเมนูย่อยให้เลือกดังนี้ เมนูแสดงความหนาของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . ATH เมนูแสดงรอยบกพร่องของอลูมิเนียม เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . CTH เมนูแสดงความหนาของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MTH เมนูแสดงรอยบกพร่องของโลหะเหล็ก เก็บแฟ้มข้อมูลนามสกุล . MCK และเมนูยกเลิก ถ้าเลือกแฟ้มข้อมูลแล้ว ชื่อของแฟ้มข้อมูลนั้นจะแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ส่วนของคำว่า ชื่อ



รูปที่ 2 แสดงเมนูการใช้งานหลังจากเรียกโปรแกรม Project.exe

2. เมนูบันทึก จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะบันทึกหรือไม่ ถ้ามีจะแสดงเมนูย่อยให้เขียนชื่อแฟ้มข้อมูล ด้วยตัวอักษรทั้งหมดไม่เกิน 8 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมนูพิมพ์ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่จะพิมพ์หรือไม่เมื่อต้องการพิมพ์สัญญาณที่ได้ออกทางเครื่องพิมพ์ ให้คลิกเมาส์ที่เมนูพิมพ์ จะปรากฏแถบทึบที่สัญญาณนั้นแสดงว่าสัญญาณนั้นจะถูกพิมพ์ออกที่เครื่องพิมพ์ หลังจากนั้นคลิกเมาส์ที่จุดใดก็ได้ จะเริ่มการพิมพ์

4. เมนู about แสดงรายชื่อของอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้จัดทำโครงงาน

5.เมนูเริ่ม-หยุด จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีการคลิกเมาส์หรือไม่ เมนูในขั้นแรกจะแสดงคำว่า เริ่ม เพื่อทำการเริ่มพล็อตค่าที่ได้จากการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล แสดงที่จอคอมพิวเตอร์ และเมื่อคลิกคำว่าเริ่มแล้วจะแสดงคำว่า หยุด พร้อมที่จะหยุดจากการพล็อตค่าที่ได้เมื่อคลิกเมาส์ที่คำว่า หยุด

6. เมนูชนิดของโลหะ จะใช้ตรวจสอบเมาส์ว่ามีความต้องการที่เปลี่ยนชนิดของโลหะที่ต้องการวัดหรือไม่ มีโลหะให้เลือก 2 ชนิดคือ อลูมิเนียมและโลหะเหล็ก ซึ่งถ้าคลิกที่โลหะชนิดใดแล้วจะแสดงชนิดของโลหะที่ด้านล่างกึ่งกลางจอคอมพิวเตอร์

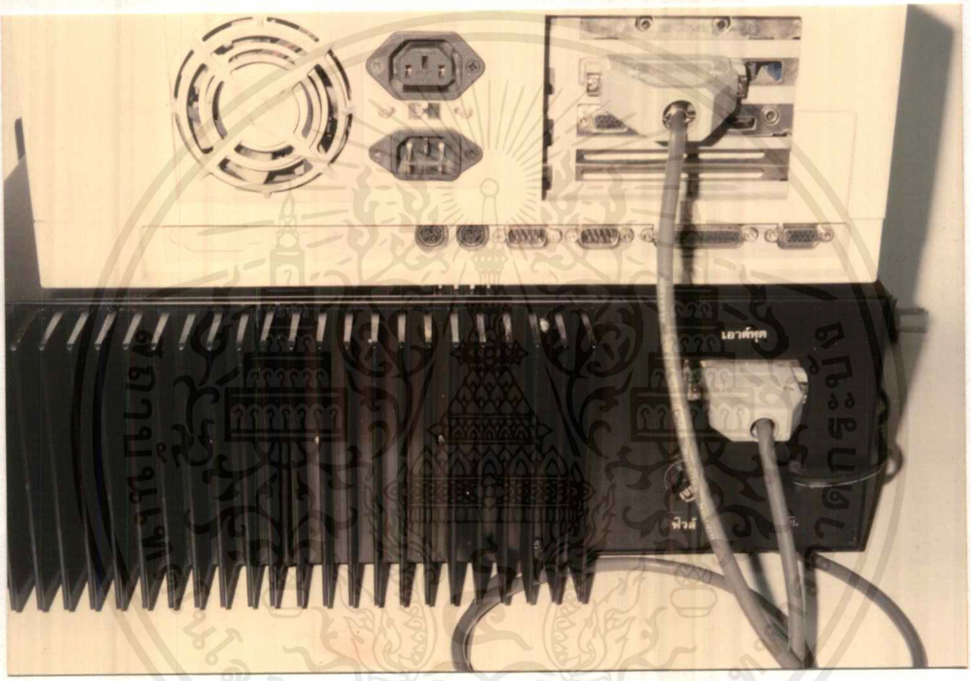
การตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะสามารถเลือกการแสดงผลได้โดยการคลิกเมาส์ที่กรอบสี่เหลี่ยมหน้าคำว่า รอยบกพร่องหรือความหนา ซึ่งเมื่อคลิกเมาส์เลือกการแสดงผลของโลหะใดจะปรากฏจุดกลมสีแดงในกรอบสี่เหลี่ยมนั้น จากนั้นคลิกเมาส์ที่เมนูเริ่ม เพื่อทำการตรวจวัด และคลิกเมาส์ด้านซ้ายที่เมนูหยุดเพื่อหยุดการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีใช้งาน

1. ต่อโพรบตรวจสอบที่ขั้วโพรบตรวจสอบ

2. ต่อสายสัญญาณ 25 ขา เข้าที่ขั้วต่อสายเอาท์พุตของเครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก กับการ์ดแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล ดังรูปที่ 3



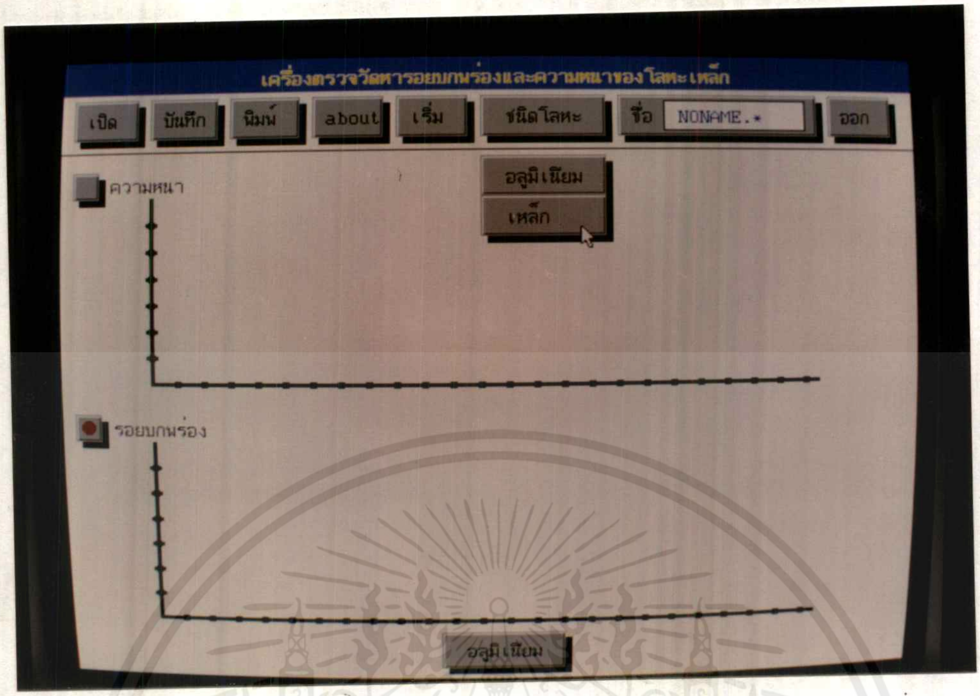
รูปที่ 3 การต่อสาย DB-25 กับการ์ดแปลงสัญญาณแอนาลอก เป็นดิจิตอล

3. เปิดสวิทช์ของเครื่องตรวจวัดหารอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก

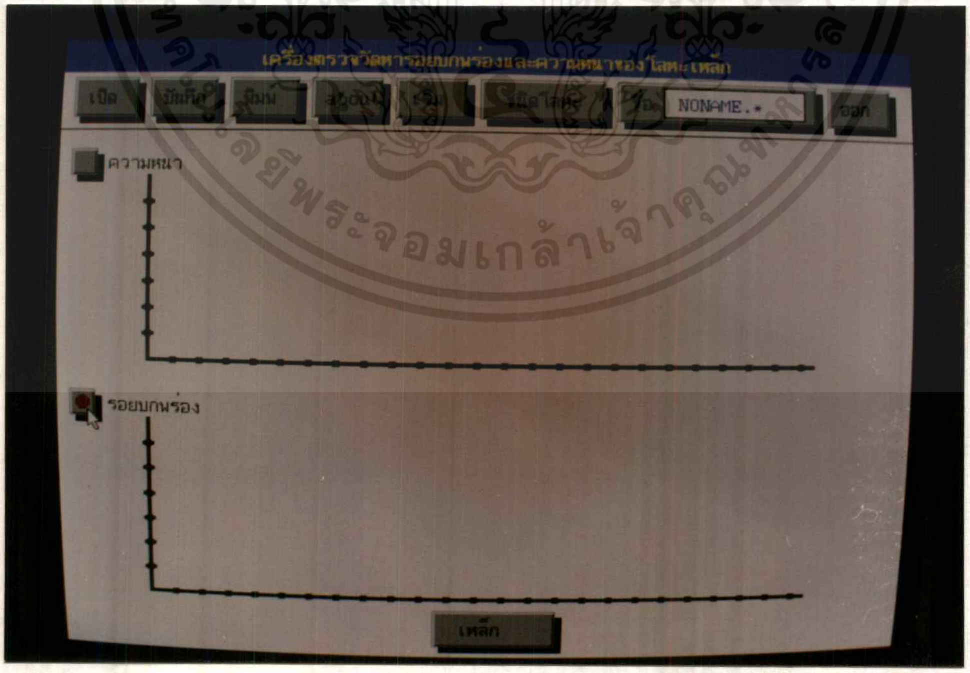
4. เรียกโปรแกรม Project.exe มีลักษณะการแสดงผล ดังรูปที่ 2

4.1 คลิกเมาส์ที่เมนูชนิดของโลหะเพื่อเลือกชิ้นงานทดสอบที่ต้องการอลูมิเนียมหรือโลหะเหล็ก เมื่อเลือกชนิดของโลหะแล้ว จะแสดงที่ส่วนล่างของกราฟ ในที่นี้สมมติว่า เลือกโลหะเหล็กและต้องการวัดรอยบกพร่อง ให้คลิกเมาส์ที่กรอบสี่เหลี่ยมของกราฟรอยบกพร่อง จะมีจุดกลมสีแดงภายในกรอบสี่เหลี่ยมนั้น จากนั้นให้คลิกเมาส์ที่เมนูเริ่ม จะมีกราฟแสดงการวัดหารอยบกพร่อง มีลักษณะการแสดงผลดังรูปที่ 4 และ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



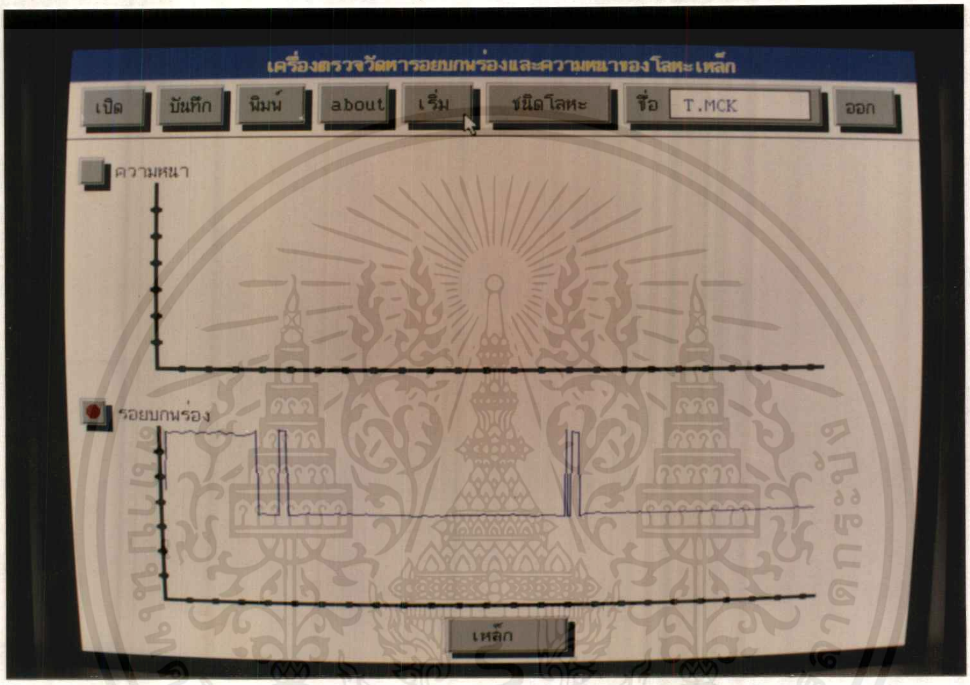
รูปที่ 4 การแสดงผลของเมนูชนิดของโลหะ



รูปที่ 5 การแสดงผลเมื่อเลือกโลหะเหล็กและวัดหารอยบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

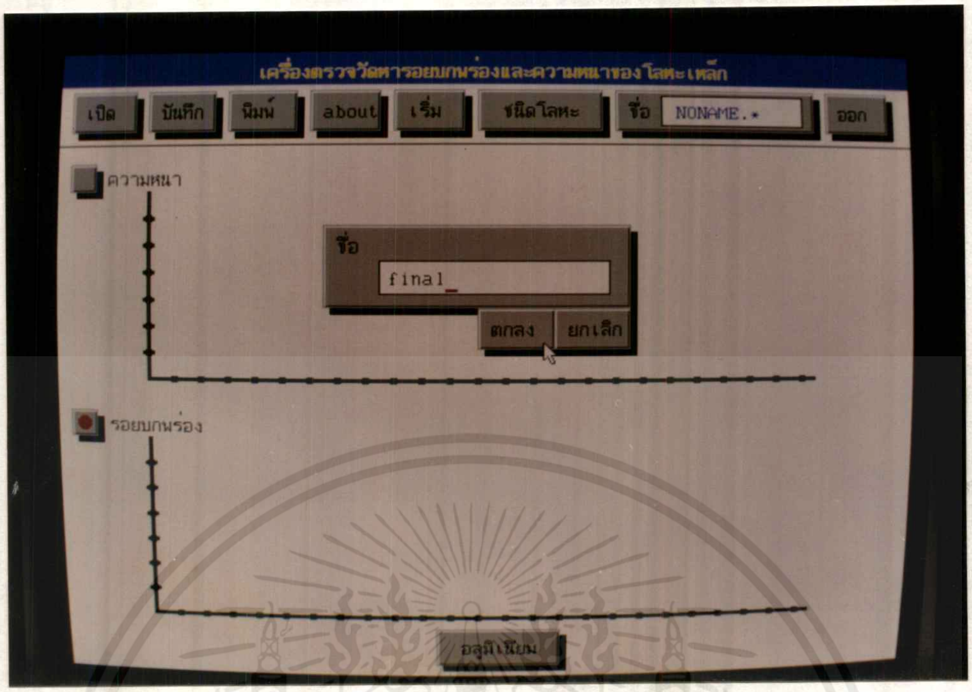
4.2 เมื่อคลิกเมาส์ที่เมนูเริ่มคำว่า เริ่ม จะเปลี่ยนเป็นคำว่า หยุด กราฟจะแสดงไปตามคาบเวลา กราฟจะแสดงครั้งละหนึ่งหน้าจอแล้วหยุดจนกว่าจะมีการคลิกเมาส์ด้านซ้ายจึงจะแสดงหน้าต่อไป เมื่อต้องการหยุดการวัดให้คลิกเมาส์ที่เมนูหยุด จะแสดงผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 การแสดงผลของกราฟการวัดหารอยบกพร่อง

4.3 เมื่อต้องการบันทึกสัญญาณการวัดหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กที่ได้ ให้คลิกเมาส์ที่เมนูบันทึก สำหรับชื่อเป็นตัวอักษรไม่เกิน 8 ตัว นามสกุลจะใส่เองโดยอัตโนมัติ ตามการเลือกชนิดของโลหะ และลักษณะการวัด กดปุ่ม ENTER แล้วตามด้วยการคลิกเมาส์ที่คำว่า ตกลงหรือยกเลิก เช่น วัดรอยบกพร่องของโลหะเหล็กจะมีนามสกุลเป็น .CTH และความหนาของโลหะเหล็กเป็น .MTH. และวัดรอยบกพร่องของอลูมิเนียมจะมีนามสกุลเป็น ATH และความหนาของอลูมิเนียมจะมีนามสกุลเป็น . ACK. มีลักษณะดังรูปที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

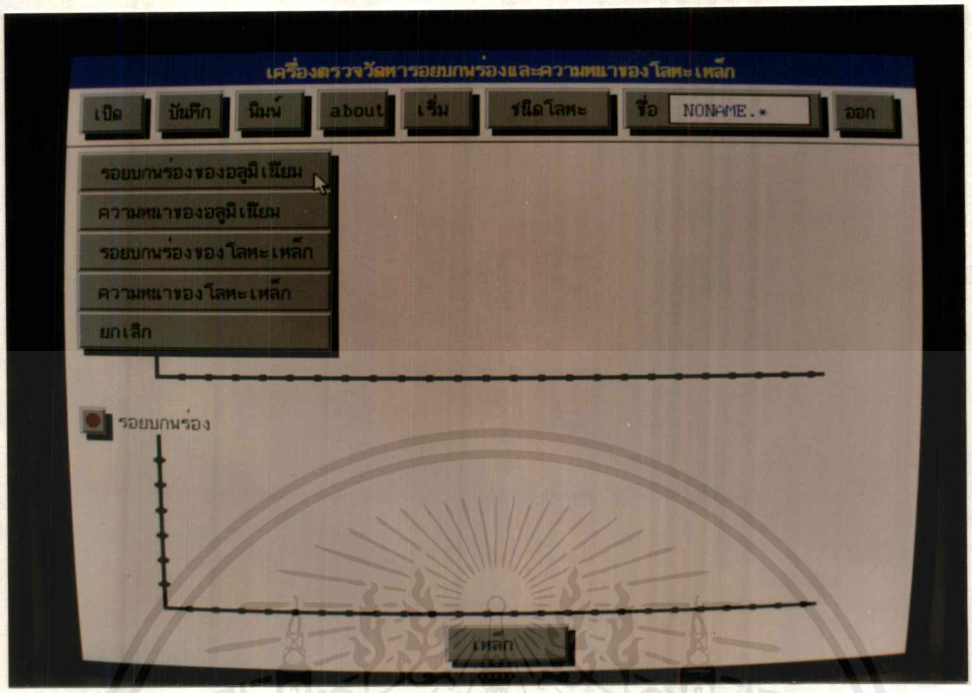


รูปที่ 7 การบันทึกสัญญาณที่วัดได้

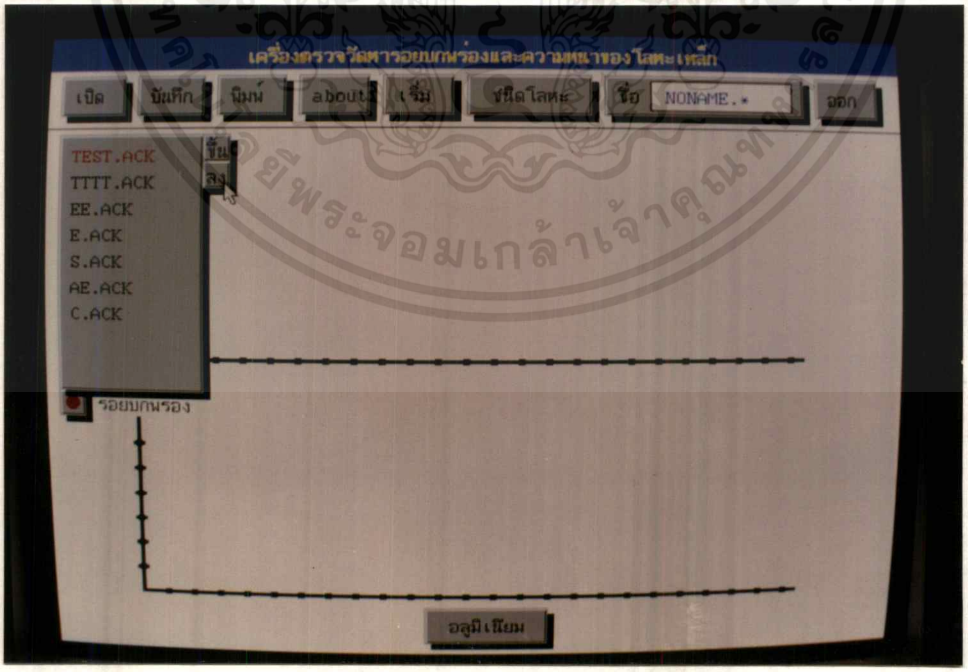
การวัดความหนาก็มีขั้นตอนที่เหมือนกัน เปลี่ยนเพียงรอยบกพร่องเป็นความหนาด้วยการคลิกเมาส์ที่กรอบสี่เหลี่ยม

4.4 เมื่อต้องการนำสัญญาณที่บันทึกไว้ออกมา ให้คลิกเมาส์ที่เมนูเปิด จะแสดงเมนูย่อยให้เลือกชนิดของโลหะ และลักษณะการวัดหลังจากเลือกแล้วจะปรากฏชื่อของแฟ้มข้อมูลให้คลิกเมาส์เมนู ขึ้น-ลง เพื่อเลือกแฟ้มข้อมูลที่ต้องการ แล้วคลิกเมาส์ด้านขวา 1 ครั้งสัญญาณที่บันทึกไว้ แสดงออกมาทีละ 1 หน้าจอ ให้คลิกเมาส์ด้านซ้าย 1 ครั้ง เพื่อดูหน้าต่อไป แสดงผลในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 การแสดงผลของเมนูเปิด



รูปที่ 9 การแสดงผลของเมนูย่อยเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 เมื่อต้องการพิมพ์สัญญาณที่ได้ออกทางเครื่องพิมพ์ ให้คลิกเมาส์ที่เมนูพิมพ์ จะปรากฏแถบทึบสีดำที่สัญญาณนั้น แสดงว่าสัญญาณนั้นจะถูกพิมพ์ที่เครื่องพิมพ์ หลังจากนั้นคลิกเมาส์ที่จุดใดก็ได้ จะเริ่มการพิมพ์

4.6 คลิกเมาส์ที่เมนู about จะแสดงรายชื่อของอาจารย์ที่ปรึกษา และรายชื่อผู้จัดทำ แสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 แสดงเมนู about

4.7 เลือกเมนูออก เมื่อต้องการออกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Winckski , J.P.Fulton, S.Nath , N.Namkung , and J.W.Simpson , "Self-Nulling Eddy Probe for Surface and Subsurface Flaw Detector",Submitted to Materials Evaluation.

David F.Stout , "Handbook of Operational Amplier Circuit Design" , McGRAW Hill Book Copany,1976

"Microsoft C/C++ Run-Time Library Reference Covers Version7" , Microsoft Languages Library.

Ramakant A. Gayakwad , "Op-Amp Linear Integrated Circuit" Prentice-Hall Internation Inc.,1988

Robert T.Paynter ,"Introductory Electronics Devices and Circuit" , Prentice-Hall International Inc.,1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นายนลิตร ศรีสนาม
วันเดือนปีเกิด	24 มีนาคม 2516
สถานที่เกิด	จังหวัดสุรินทร์
ภูมิลำเนาเดิม	13 หมู่ 9 ต.หนองบัว อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	384 หมู่ 1 ซ.จินดานิเวศน์ แขวง หัวตะเข้ เขต ลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ
โทรศัพท์	7391224

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านม่วงมูล
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนท่าตูมประชาเสริมวิทย์
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
คติพจน์	ฝันให้ไกล ไปให้ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นายสมบัติ พิทักษ์ชัยวัฒนา
วันเดือนปีเกิด	31 กรกฎาคม 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดปทุมธานี
ภูมิลำเนาเดิม	512/588 หมู่ 2 ต.ประชาธิปปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	384 หมู่ 1 ซ.จินดานิเวศน์ แขวง หัวตะเข้ เขต ลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ
โทรศัพท์	7391224

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนชุมชนประชาธิปปัตย์วิทยาคาร
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนดอนเมืองทหารอากาศบำรุง
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	-
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
คติพจน์	ทำดีได้ดี ทำชั่วได้ชั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

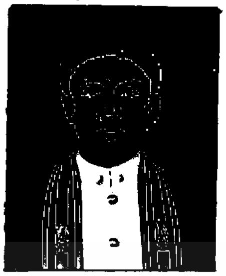
ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นายสรศักดิ์ คุณเจตน์
วันเดือนปีเกิด	11 กันยายน 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดจันทบุรี
ภูมิลำเนาเดิม	24/3 หมู่ 5 ต.พลวง กิ่ง อ.พลวง จ.จันทบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	384 หมู่ 1 ซ.จินดานิเวศน์ แขวง หัวตะเข้ เขต ลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ
โทรศัพท์	7391224

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนวัดกระทิง
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนพลวงวิทยาคม
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
คติพจน์	ทำให้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นายอำนาจ เกษศรีไพร
วันเดือนปีเกิด	10 ตุลาคม 2518
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบูรณ์
ภูมิลำเนาเดิม	62 หมู่ 8 ต.บุ่งคล้า อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์
ที่อยู่ปัจจุบัน	384 หมู่ 1 ซ.จินดานิเวศน์ แขวง หัวตะเข้ เขต ลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ
โทรศัพท์	7391224

ประวัติการศึกษา	
ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนผดุงวิทย์
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนท่าพลพิทยาคม
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคเพชรบูรณ์
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคเพชรบูรณ์
ปริญญาตรี	สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
คติพจน์	เหนือฟ้ายังมีฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้