

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ เครื่องตรวจหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

THE METAL OBJECT CRACK DETECTOR USING HALL EFFECT

ชื่อนักศึกษา

1. นายกิตติพงษ์ ขวัญแข่ง รหัสประจำตัว 40031502
2. นายปรีชา เข้มมุกดา รหัสประจำตัว 40031515
3. นางสาวรัตติกา ธนุสา รหัสประจำตัว 40031518

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

1. อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี
2. อาจารย์วรวิทย์ สมหา



คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์		ลายมือชื่อ
อาจารย์วรวิทย์	สมหา	
อาจารย์อำพล	ทองระอา	
อาจารย์พงษ์เกียรติ	เชษฐพิทักษ์สกุล	
อาจารย์สุรพงษ์	สิริพงษ์ดี	
อาจารย์สุระชัย	พิมพ์สาดี	
อาจารย์อมรชัย	ชัยชนะ	

วัน เดือน ปีที่สอบ วันที่ 28 พฤศจิกายน 2541 เวลา 01.20 น.

สถานที่สอบ ห้อง 301 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

เลขหม.....
เลขทะเบียน.....32858
วัน, เดือน ปี 14 ส.ย. 2542



ภาควิชารับรองแล้ว

โดย

(ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่ 2 เดือน พ.ศ. 42

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เครื่องตรวจหารอยร้าวของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

THE METAL OBJECT CRACK DETECTOR USING HALL EFFECT



นายกิตติพงษ์ ขวัญเซ่ง
นายปรีชา เข้มมุกดา
นางสาวรัตติกา ธนูสา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องตรวจหารอยבקพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์
THE METAL OBJECT CRACK DETECTOR USING HALL EFFECT

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------|-----------|
| 1. นายกิตติพงษ์ | ขวัญแข็ง |
| 2. นายปรีชา | เข็มมุกดา |
| 3. นางสาวรัตติกา | ธนูสา |

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม.....
(อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี)

ลงนาม.....
(อาจารย์วรวิทย์ สมหา)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

ลงนาม.....
(ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องตรวจหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

THE METAL OBJECT CRACK DETECTOR USING HALL EFFECT

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย
2. เพื่อศึกษาการใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบ
3. เพื่อศึกษาการตรวจสอบด้วยวิธีการปรากฏการณ์ฮอลล์
4. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องตรวจสอบโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ให้มีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเข้าใจวิธีการตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยวิธีการใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เพื่อสามารถออกแบบเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้
3. เพื่อสามารถสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้

เครื่องตรวจหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

นายกิตติพงศ์	ขวัญแข่ง
นายปรีชา	เข็มมุกดา
นางสาวรัตติกา	ธनुสา

อาจารย์ที่ปรึกษา	
อาจารย์ศุภพงษ์	ศิริพงศ์ดี
อาจารย์วรวิทย์	สมหา
ปีการศึกษา 2541	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการพัฒนาเครื่องตรวจสอบโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบหนึ่ง ซึ่งจะอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กถาวร โดยใช้สนามแม่เหล็กถาวรส่งสนามแม่เหล็กไปที่ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แล้วใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นตัวตรวจจับค่าความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโดยที่ตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแสดงค่าออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้า ตัวตรวจจับรอยบกพร่องโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ ตัวตรวจจับจะมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ทางด้านหลังของตัวตรวจจับ เมื่อส่งสนามแม่เหล็กถาวรเข้าไปที่โลหะที่เกิดรอยบกพร่องก็จะทำให้ทางเดินของสนามแม่เหล็กเกิดการกระโดด หรือเกิดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กนั่นเอง ทำให้ค่าที่ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กตรวจจับได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะของโลหะเป็นปกติ โดยนำผลของสัญญาณที่ได้จากตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กมาทำการประมวลผล เพื่อทำการแสดงผลทางจอเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE METAL OBJECT CRACK DETECTOR USING HALL EFFECT

MR.KITTIPONG	KWANSANG
MR.PREECHA	SEMMUKDA
MISS.RATTIKA	THANUSA

ADVISORS

MR.SURAPONG	SIRIPONGDEE
MR.WORAWIT	SOMHA

1998

ABSTRACT

The thesis presents the development of The Metal Object Crack Detector Using Hall Effect. This project is non-destructive testing. Hall effect use principle of permanent magnetic field by send magnetic field to the object. Magnetic Sensor will detect the variation of permanent magnetic field then convert to voltage output. The result of the process will be display on a computer monitor and a printer.

III

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น คณะผู้จัดทำขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงานทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และทางด้านซอฟต์แวร์ รวมทั้งขอขอบคุณท่านอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมทุกท่านเป็นอย่างมาก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสุดท้ายขอขอบคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดคือ บิดาและมารดา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV
สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	VII
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ชี้ความสามารถของโครงการ	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	3
2.2.1 สนามแม่เหล็ก	6
2.3 สมการของแมกซ์เวลล์	8
2.4 ปราบกฎการณฮอลล์	12
2.4.1. ฮอลล์เจนอเรเตอร์	15
2.4.2 ชนิดของฮอลล์	16
2.5 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก	18
2.5.1 การตรวจสอบรอยหาคำหนดของผิวงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า	19
2.6 การเหนี่ยวนำของปราบกฎการณฮอลล์	23
บทที่ 3 การออกแบบและการทำงาน	
3.1 ฮาร์ดแวร์	24
3.2 การออกแบบวงจรขยาย	25
3.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	28
3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.5 ซอฟต์แวร์	31
3.5.1 ส่วนรับค่าจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	31
3.5.2 ส่วนแสดงผล	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองและการทดสอบฮาร์ดแวร์	33
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
4.1.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	33
4.2 ผลการทดสอบฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ	34
4.3 การทดลองทั้งระบบ	39
4.3.1 การทดลองใช้โปรแกรม	39
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา	
5.1 บทสรุป	42
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	43
5.3 แนวทางในการแก้ไข	43
5.4 แนวทางในการพัฒนา	44
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผังการทำงานและโปรแกรม	45
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของอุปกรณ์	54
บรรณานุกรม	75
ประวัติผู้แต่ง	76

VI

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 เส้นแรงของสนามไฟฟ้ารอบประจุไฟฟ้าบวกซึ่งมีขนาดเล็ก	5
รูปภาพที่ 2.2 เส้นทางเดินของสนามไฟฟ้าที่ตัดผ่านพื้นที่ใด ๆ	6
รูปภาพที่ 2.3 แรงเส้นแม่เหล็กที่กระทำกับอนุภาคที่มีขนาดประจุไฟฟ้าใด ๆ	8
รูปภาพที่ 2.4 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน	9
รูปภาพที่ 2.5 ฟลักซ์สุทธิของแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในพื้นที่ผิวปิดเพียงข้อเดียวและสองข้อ	10
รูปภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า	11
รูปภาพที่ 2.7 ปรากฏการณ์ของฮอลล์เอฟเฟกต์	12
รูปภาพที่ 2.8 หลักการของฮอลล์เซ็นเซอร์	15
รูปภาพที่ 2.9 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เซ็นเซอร์	16
รูปภาพที่ 2.10 ผังการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิตช์	17
รูปภาพที่ 2.11 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดเลดซ์	17
รูปภาพที่ 2.12 ผงเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก	18
รูปภาพที่ 2.13 แท่งแม่เหล็กแต่ละท่อนกลายเป็นไดโพลแม่เหล็กอันใหม่เสมอ	19
รูปภาพที่ 2.14 เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านชนิดงานที่มีรอยบกพร่อง	19
รูปภาพที่ 2.15 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้าตรง	20
รูปภาพที่ 2.16 การเกิดสนามแม่เหล็กบริเวณผิวชั้นทดสอบจากกระแสไฟฟ้าสลับ	20
รูปภาพที่ 2.17 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และ H	21
รูปภาพที่ 2.18 วงจรฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อน	22
รูปภาพที่ 2.19 วงจรฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กแข็ง	23
รูปภาพที่ 3.1 ผังการทำงานแสดงการทำงานของโครงการงาน	24
รูปภาพที่ 3.2 พื้นฐานอินทรีแมนแอมป์รีฟลายส์	25
รูปภาพที่ 3.3 การเพิ่มเกณฑ์เข้าไปในอินทรีแมนแอมป์รีฟลายส์	26
รูปภาพที่ 3.4 วงจรขยายสัญญาณ	28
รูปภาพที่ 3.5 การทำงานของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล	29
รูปภาพที่ 3.6 การต่อสัญญาณจากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล	30
รูปภาพที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปภาพที่ 4.1 เม็กนิติกส์ฟลักส์เซ็นเซอร์เบอร์ KMZ10B	32
รูปภาพที่ 4.2 พลัสเตอร์และลักษณะการวางชิ้นงาน	32
รูปภาพที่ 4.3 การทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ	34
รูปภาพที่ 4.4 ลักษณะของรอยบกพร่องแบบต่าง	35
รูปภาพที่ 4.5 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	35
รูปภาพที่ 4.6 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นที่สุด	36
รูปภาพที่ 4.7 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากที่สุด	36
รูปภาพที่ 4.8 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่างกัน	37
รูปภาพที่ 4.9 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์ที่ชิ้นงานปกติ	37
รูปภาพที่ 4.10 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์ที่รอยบกพร่อง	38
รูปภาพที่ 4.11 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีรอยบกพร่อง	38
รูปภาพที่ 4.12 การทดลองทั้งระบบของเครื่องตรวจสอบโลหะ โดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์	39
รูปภาพที่ 4.13 ลักษณะของหน้าจอหลังจากเรียกโปรแกรม	40
รูปภาพที่ 4.14 ผลการทดลองทั้งระบบกับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่างกัน	40
รูปภาพที่ 4.15 ผลการทดลองทั้งระบบกับชิ้นงานที่มีรอยบกพร่อง	41

VIII

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีระยะความห่างของตัว Sensor กับผิวของชิ้นงาน	34
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองกับชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องแบบต่าง ๆ	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป จำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อหาคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์และขบวนการผลิต นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบบำรุงวัสดุหรือเครื่องมือต่างๆ ได้ สำหรับการทดสอบดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การตรวจสอบแบบทำลายและการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เพราะการตรวจสอบวิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ทำให้วัสดุที่นำมาทดสอบเสียหาย ดังนั้นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายจึงเหมาะที่จะใช้ในการตรวจสอบ และซ่อมบำรุงอีกด้วย การตรวจสอบแบบไม่ทำลายมักจะเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานที่มาทำการตรวจสอบ เช่น แสง ความร้อน ไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้างที่ผิดปกติของชิ้นงานที่ตรวจสอบ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายนี้มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing), การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current), การตรวจสอบโดยใช้วิธีการวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก (Flux Leakage) ซึ่งการตรวจสอบที่ยกตัวอย่างมาทั้ง 3 วิธีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียคือ การตรวจสอบด้วยสายตานั้น สะดวกไม่ต้องมีอุปกรณ์ประกอบแต่มีความล่าช้า และไม่สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องภายใต้ผิวได้ ส่วนการตรวจสอบโดยใช้วิธีการกระแสไหลวนก็สามารถตรวจสอบวัสดุที่มีค่าไม่เป็นสภาพแม่เหล็กได้ แต่ก็มีปัญหายากในการสร้างหัวโพรบที่ใช้ในการตรวจสอบ เพราะในการสร้างหัวโพรบจะต้องมีความละเอียดและมีความแน่นอนของจำนวนรอบของโพรบ ส่วนวิธีการตรวจสอบโดยใช้วิธีวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก เป็นวิธีการที่ใช้กับวัสดุตรวจสอบที่มีค่าเป็นสภาพแม่เหล็ก ซึ่งในอดีตการตรวจสอบวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากวิธีหนึ่งแต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิต IC สำเร็จรูปขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการตรวจจับหารอยบกพร่องของโลหะเหล็ก ดังนั้นกลุ่มของผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการตรวจสอบโดยวิธีการวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็กโดยใช้ IC สำเร็จรูปมาใช้ซึ่งยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก และมีราคาแพงมาทำการสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้วิธีการวัดเส้นแรงรั่วไหลของสนามแม่เหล็กขึ้น โดยได้กำหนดขีดความสามารถของโครงการไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

ในการตรวจสอบหารอยบกพร่องของโลหะ โดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ออกแบบและใช้ส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์และอำนวยความสะดวกในการใช้ ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องมีดังนี้

1. สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กได้
2. สามารถบอกขนาดของรอยบกพร่องของโลหะเหล็กได้
3. สามารถตรวจสอบโลหะเหล็กที่มีความหนาไม่เกิน 10 มม.ได้

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

ในปฏิญานิพนธ์นี้ ได้มีการรวบรวมข้อมูลรายละเอียด ทั้งทฤษฎี, หลักการทำงาน, การออกแบบและการสร้างวงจรที่ใช้งานและจัดทำคู่มือการใช้งาน ซึ่งมีเนื้อหาโดยสังเขปของแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวความเป็นมาและความสำคัญของปฏิญานิพนธ์, ขีดความสามารถของโครงการ และเนื้อหาโดยสังเขปของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก, สมการของแมกซ์เวลล์, ปรากฏการณ์ฮอลล์, ทฤษฎีและหลักการตรวจสอบโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์, ชนิดของฮอลล์

บทที่ 3 การออกแบบการสร้างการทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์ดังนี้ ตัวฮอลล์, วงจรขยายแรงดัน, วงจรแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ส่วนของซอฟต์แวร์ดังนี้ ส่วนที่รับค่ามาจากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ส่วนที่แสดงผลออกทางจอคอมพิวเตอร์ และส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของพลอตเตอร์

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไขและพัฒนา

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กล่าวนำ

การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect Testing) ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่อาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น กับลักษณะของเนื้อวัสดุที่ใช้ตรวจสอบ โดยการส่งสนามแม่เหล็กไปที่ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แล้วใช้ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นตัวตรวจจับค่าความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสัมผัสระหว่างตัวฮอลล์กับชิ้นงานโดยตรง แต่อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบได้ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้า

การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นเทคนิคที่ไม่เป็นที่กว้างขวางนัก นอกเหนือจากการตรวจสอบเพื่อหารอยบกพร่องแล้ว การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถใช้ตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและทางโลหะการ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กได้โดยทางอ้อม นอกจากนี้ผลกระทบทางรูปทรง เช่น ความหนา ความโค้งช่องว่างระหว่างตัวฮอลล์กับชิ้นงาน ก็จะมีผลต่อการไหลหรือการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของปรากฏการณ์ฮอลล์และสามารถตรวจวัดได้

เนื่องจากมีตัวแปรสำคัญมากมายที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งก็เป็นทั้งข้อดีและข้อเสียของเทคนิคนี้ เพราะพารามิเตอร์ที่ไม่สำคัญอาจจะรบกวน หรือบดบังข้อมูลที่สำคัญทำให้แปลผลการตรวจสอบผิดพลาดไปได้ ดังนั้นตัวแปรทุกตัวที่มีผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องนำมาพิจารณาเสมอ จึงทำให้การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ค่อนข้างซับซ้อน และต้องการการฝึกฝนและความชำนาญมาก

2.2 ทฤษฎีสถานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับฟลักซ์แม่เหล็กนั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับเรื่องสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก่อน เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับสนามทั้งสองอย่างมาก

สนามไฟฟ้า

จากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) กล่าวว่า ประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะผลักกับและประจุไฟฟ้าต่างกันจะดูดกัน โดยที่เราเรียกแรงที่ประจุ 2 ตัว กระทำต่อกันว่า แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = \frac{k p_1 p_2}{r^2} \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์พื้นฐานของแรงสัมพันธ์ระหว่างประจุจากสมการข้างต้น สามารถพิจารณาได้จากแนวความคิดของสนามไฟฟ้าได้ โดยแยกออกเป็นสองส่วน คือ การเกิดสนามไฟฟ้าจากประจุหนึ่งตัว กับอีกส่วนหนึ่งเป็นการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของประจุอีกตัวหนึ่ง

ในส่วนแรกนั้น ประจุไฟฟ้าอนุภาค q_1 จะทำให้เกิดอิทธิพลเชิงกลไฟฟ้า หรือสนามไฟฟ้า E_1 ในบริเวณรอบประจุนั้น ไม่ว่าจะมีอีกประจุไฟฟ้าหนึ่งปรากฏอยู่หรือไม่ก็ตาม

$$E_1 = \frac{kq_1}{r^2} \quad (2.2)$$

แต่อีกส่วนหนึ่งนั้น ประจุไฟฟ้าตัวหนึ่ง q_2 เมื่ออยู่ในอิทธิพลของสนามดังกล่าวแล้ว แสดงการตอบสนองต่ออิทธิพลของสนามนั้น ซึ่งปรากฏเป็นแรงมีขนาดและทิศทาง

$$F_2 = q_2 E_1 \quad (2.3)$$

ถ้าหากแทนสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.2) ก็จะได้สมการกฎของคูลอมบ์ ดังเช่นสมการ (2.1) สมการ (2.3) นั้นเป็นการอธิบายอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อประจุไฟฟ้า ที่เข้าไปอยู่ในสนามนั้น และต่อมาได้กลายเป็นนิยามของสนามไฟฟ้าตามสมการ (2.4) เมื่อ q เป็นขนาดของประจุไฟฟ้าทดสอบที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้า E ก็จะถูกแรงกระทำดังนี้

$$F = qE \text{ หรือ } E = F/q \quad (2.4)$$

หน่วยของสนามไฟฟ้า E มีหน่วยเป็นแรงต่อประจุไฟฟ้า หรือนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) หรือ

บางครั้งอาจอยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทาง หรือ โวลต์ต่อเมตร (V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

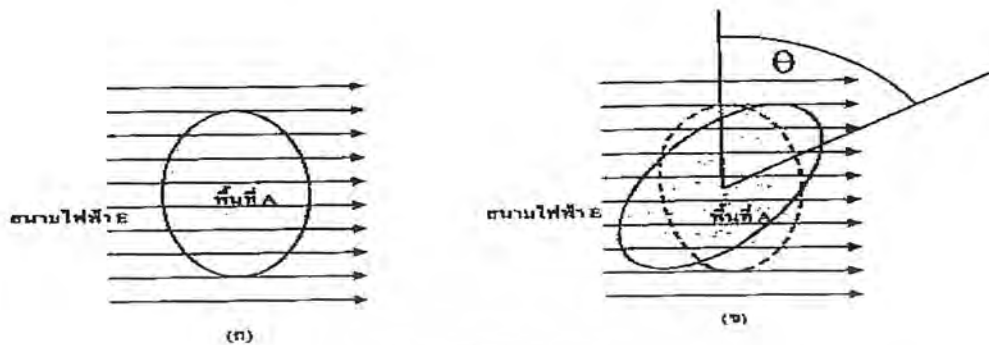
จากสมการ (2.4) จะพบว่าแรงของสนามไฟฟ้าจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับประจุ แต่เป็นอิสระกับความเร็วประจุ และทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดที่พิจารณาจะมีทิศทางขนานกับแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งนำไปวางทดสอบที่ตำแหน่งนั้น อีกทั้งสนามไฟฟ้าจากหลายประจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของแต่ละสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต่างๆ ที่กระทำที่จุดนั้น



รูปที่ 2.1 เส้นแรงของสนามไฟฟ้ารอบประจุไฟฟ้าบวกซึ่งมีขนาดเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบกับของไหลปริมาณคงที่ที่ไหลผ่านพื้นที่ ซึ่งมีขนาด และรูปร่างต่างๆ กัน เช่น กระแสน้ำไหลจากจุดเริ่มต้นผ่านท่อขนาดต่างๆ กันไปสู่จุดสุดท้าย โดยที่ปริมาณของน้ำทั้งหมดที่ไหลผ่านพื้นที่ต่างๆ ย่อมเท่ากัน แต่ปริมาณของน้ำที่ไหลต่อหน่วยพื้นที่ย่อมแตกต่างกัน ในทำนองเดียวกัน เส้นแรงสนามไฟฟ้าซึ่งเริ่มต้นจากประจุบวกผ่านบริเวณต่างๆ ไปสู่ประจุลบก็อาจถือได้ว่า จำนวนเส้นแรงทั้งหมดเทียบได้กับปริมาณกระแสน้ำทั้งหมดหรือฟลักซ์ ในขณะที่เส้นแรงไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เทียบได้กับปริมาณกระแสน้ำต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) ทำให้ทราบนิยามของฟลักซ์ไฟฟ้าว่าเป็นผลคูณของสนามไฟฟ้า E และพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งทำมุม θ กับทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\Psi = EA \cos \theta \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 (ก) ฟลักซ์ไฟฟ้าผ่านพื้นที่ A ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า E จะมีขนาด EA

(ข) หาก A เอียงทำมุม θ กับแนวตั้งฉากกับ E พื้นที่ยังผล $A = A \cos \theta$

ดังนั้น ฟลักซ์ไฟฟ้าจะเป็น $\Psi = EA \cos \theta$

2.2.1 สนามแม่เหล็ก

สมการของคูลอมบ์ ซึ่งแสดงแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุทั้งสองนั้นใช้เฉพาะกรณีที่ประจุใดประจุหนึ่งในสองประจุนั้นเคลื่อนที่ ถ้าหากประจุทั้งสองต่างก็เคลื่อนที่ แรงกระทำระหว่างประจุทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่หาได้ในสมการของคูลอมบ์ แรงที่เพิ่มเข้ามานี้เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่ นั่นคือ แรงแม่เหล็กเป็นแรงที่กระทำระหว่างกระแสไฟฟ้าสองกระแส ซึ่งจะต่างจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดจากประจุเมื่ออยู่กับที่กระทำกัน

การคำนวณหาค่าแรงแม่เหล็กหาได้จากการนำสมการ (2.1) คูณเข้ากับอัตราส่วนกำลังสองระหว่าง v คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของประจุทั้งสอง และ c เป็นความเร็วของแสง ดังนี้

$$F_m = \frac{kq_1 q_2}{r^2} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) สามารถแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแรงที่ได้จากไฟฟ้าสถิตย์และส่วนที่สองเป็นอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$B_1 = \frac{kq_1}{r^2} \frac{v}{c^2} \quad (2.7)$$

$$F_2 = q_2 v B_1 \quad (2.8)$$

เราสามารถเขียนสมการ (2.7) และ (2.8) ใหม่ให้อยู่ในรูปทั่วไป เพื่อใช้เป็นนิยามของสนามแม่เหล็ก B หรือที่เรียกว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) หรือความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Induction) ได้ดังนี้

$$B = \frac{Kq_2}{r^2} \frac{v}{c^2} \quad (2.9)$$

$$\text{เมื่อ } K = \frac{K'}{C^2}$$

$$B = k' v \frac{q}{r^2} \quad (2.10)$$

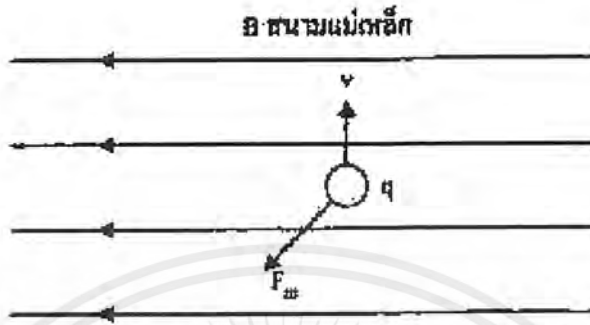
โดยที่สนามแม่เหล็ก B มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla) หรือ Ns/Cm หรือ N/Am หรือ kg/Cs

$$\text{ส่วนแรงแม่เหล็ก } F = qvB \quad (2.11)$$

นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการใช้หน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ($\text{Weber/m}^2, \text{Wb/m}^2$) และอีกหน่วยหนึ่งคือ หน่วยเกาส์ (Gauss, G) เพื่อให้ทราบไว้เป็นแนวทางเราอาจนำเอาสนามแม่เหล็กโลกมาอ้างว่ามีขนาดประมาณ 10^{-4}T หรือ 1G

จากสมการ (2.11) ขนาดของแรงจากสนามแม่เหล็กนั้น นอกจากเป็นส่วนสัดส่วนกับทั้งขนาดและความเร็วของประจุไฟฟ้าในอิทธิพลของสนามแม่เหล็กแล้ว ยังขึ้นอยู่กับทิศทางซึ่งประจุนั้นเคลื่อนที่ไปด้วย นอกจากนี้ ทิศทางของแรงจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลนั้นตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แรงแม่เหล็ก F_m ที่กระทำกับอนุภาคที่มีขนาดประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B จะมีขนาด $F_m = qvB$ และทิศทางตั้งฉาก v และ B

2.3 สมการของแมกซ์เวลล์

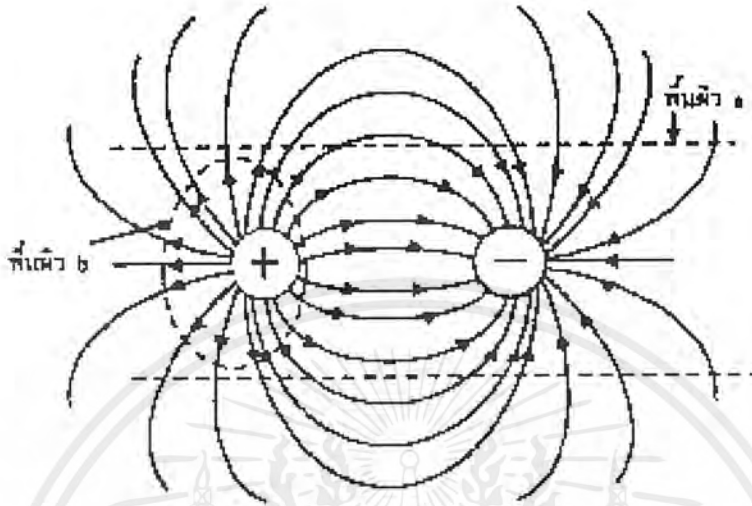
กฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งอธิบายสนามไฟฟ้าได้โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้ากล่าวว่าฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดหรือผลรวมขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ซึ่งอยู่ตามแนวตั้งฉาก และผ่านออกมาจากผิวที่ปิดสนิทจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมของประจุที่อยู่ในผิวนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Psi = \sum (E_N \Delta S) = \frac{1}{\epsilon_0} Q \quad (2.12)$$

โดยจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายประจุด้วย ทั้งนี้ เส้นแรงไฟฟ้าเริ่มจากประจุไฟฟ้าบวกไปสิ้นสุดที่ประจุไฟฟ้าลบ

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้านี้เริ่มใช้กับปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตย์ อันเป็นกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ไม่แปรกับเวลา และกฎนี้สามารถใช้ได้กับกรณีเมื่อสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา คือเป็นฟังก์ชันของเวลาด้วย



รูปที่ 2.4 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน ฟลักซ์สุทธิที่ไหลผ่านผิว a เป็นศูนย์ผ่าน
พื้นผิว b เป็นบวก (Q/ϵ_0) และที่ผ่านพื้นผิว c $(-q/\epsilon_0)$

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss's law for magnetic) กฎนี้ใช้อธิบายสนามแม่เหล็ก มีความคล้ายคลึงและคู่กับกฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ กล่าวว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวที่ปิดสนิท ซึ่งภายในอาจมีหรือไม่มีแท่งแม่เหล็กเลยก็ตาม จะเป็นศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Phi = \sum (B \cdot \Delta s) = 0 \quad (2.13)$$

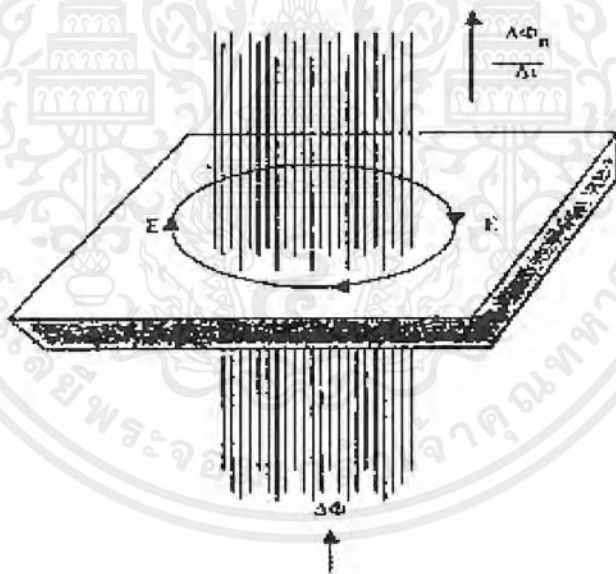
จะเห็นว่า สมการ (2.12) และ (2.13) มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งสมการ (2.13) นี้อาจเขียนแทนได้ดังสมการที่ (2.12) โดยการแทน และ ด้วย และ ตามลำดับ ส่วนทางขวามือสมการเป็นศูนย์เนื่องมาจากในการทดลองยังไม่เคยพบว่ามีขั้วแม่เหล็กเดี่ยว ไม่เหมือนประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ ซึ่งอยู่เป็นอิสระได้โดยลำพัง หมายถึงว่า ในผิวที่ปิดใดๆ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านออกไปจากผิวต้องผ่านสวนกลับเข้าไปในผิวด้วย ผลลัพธ์สุทธิจึงเป็นศูนย์อยู่เสมอ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเป็นปริมาณโดยตรงกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ด้วย กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ใช้ได้ทั้งกรณีที่สนามแม่เหล็กคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ งานที่ต้องกระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้าในการที่จะทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ ไปตามเส้นล้อมรอบฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาไว้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อาจเขียนให้อยู่ในรูปเป็นผลบวกของผลคูณ ของแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าหนึ่งหน่วย คือ E_r หรือองค์ประกอบสนามไฟฟ้า E เมื่อคิดในแนวขนานกับระยะทางคิดเป็นช่วงสั้น ๆ ΔL ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นซึ่งล้อมรอบฟลักซ์แม่เหล็กนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} = \sum (E_r \Delta L) = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.14)$$

หรืออีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามไฟฟ้ารอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้ เป็นค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ล้อมปิดดังกล่าว



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นรอบฟลักซ์แม่เหล็กนั้น

ความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้านี้ระบุว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กรอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่หนึ่งจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ล้อมปิดนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

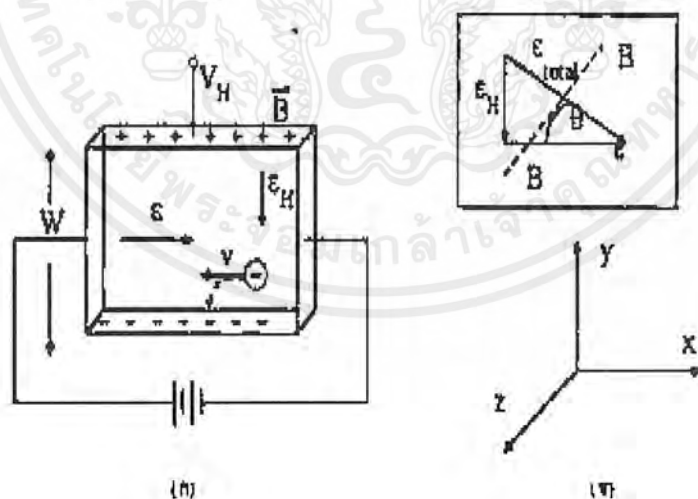
$$\sum (B\tau\Delta L) = \mu_0 I \quad (2.15)$$

เมื่อ B_T เป็นองค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก B ที่ขนานกับระยะทาง ΔL ที่ล้อมปิดบริเวณสนามแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นไม่เพียงเฉพาะบริเวณใกล้กับบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นด้วยหากสนามไฟฟ้าแปรไปกับเวลา ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum (B\tau\Delta L) = \mu_0 \left(I + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right) \quad (2.16)$$

หรืออีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กรอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงไฟฟ้าในบริเวณนั้น

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.7 (ก) ปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

(ข) ปรากฏการณ์มุมของฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.7 เมื่อมีสนามแม่เหล็ก (ทิศทางตั้งฉากกับ J และพุ่งออกจากกระดาษ) อิเล็กตรอนจะได้รับแสงลอเรนซ์ และเคลื่อนที่โค้งลงด้านล่าง ทำให้พิกัดด้านล่างเป็นลบเมื่อเทียบกับพิกัดด้านบน และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นในทิศทาง $-Y$ เรียกว่า สนามของฮอลล์ Hall Field สนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง $+Y$ ในสภาวะคงที่ แรงจากสนามแม่เหล็ก และจากสนามของฮอลล์จะเท่ากัน

$$e \mathcal{E}_H = eBv \quad (2.17)$$

ในกรณีของอิเล็กตรอนเนื่องจาก $J = -env$

$$-\frac{1}{ne} = \frac{\mathcal{E}_H}{BJ} \quad (2.18)$$

ค่า $\mathcal{E}_H/BJ$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) หรือ ค่าคงตัวของฮอลล์ (Hall Constant) แทนด้วย R ดังนี้

$$R_e = -\frac{1}{ne} = \frac{\mathcal{E}_H}{BJ} \quad (2.19)$$

ในกรณีของโฮลก็อยู่ในรูปเดียวกัน ยกเว้นประจุของโฮลซึ่งเป็นบวก และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เป็นบวกด้วย

$$R_h = \frac{1}{pe} = \frac{\mathcal{E}_H}{BJ} \quad (2.20)$$

ในกรณีที่มีประจุชนิดเดียวจาก $e\mathcal{E}_H = eBv$ หรือ $v = \mathcal{E}_H / B$ และจากนิยามของความคล่องตัว v ในที่นี้คือ Drift velocity ดังนั้น $\mathcal{E}$ คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน X หรือคือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแบตเตอรี่หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายนอกนั่นเอง ดังรูปที่ 2.7

เนื่องจากผิวของสัณยไฟฟ้าคงที่ (Constant Potential) จะตั้งฉากกับเส้นของสนามไฟฟ้า ดังนั้น จะเห็นได้ว่าจะมีจุดบางคู่ เช่น B และ B' ซึ่งมีความแตกต่างศักดาเป็นศูนย์ จากรูปที่ 2.7 $\mathcal{E}_H/\mathcal{E}$ มีค่าเท่ากับ $\tan \theta$ ดังนั้น θ นี้เรียกว่ามุมของฮอลล์ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu = \frac{\tan \theta}{B} \quad (2.21)$$

ความคล่องตัวนี้ยังอาจวัดได้อีกวิธีหนึ่งจากการทดลองของฮอลล์ คือ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แทนค่า ne จากสมการ (2.19) จะได้

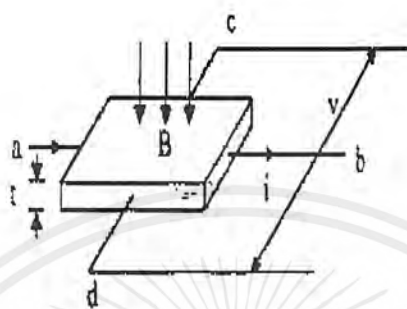
$$\sigma_e = ne\mu_e \quad (2.22)$$

สำหรับกรณีของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้สมการคล้าย ๆ กัน ดังนั้นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถวัดได้จากสภาพการนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากสารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิก (Extrinsic Semiconductor) ค่า σ_H เรียกว่า ความคล่องตัวฮอลล์ (Hall Mobility) และเขียนย่อ ๆ ว่า μ_H

จะเห็นได้ว่าวิธีการของฮอลล์เอฟเฟกต์ทำให้สามารถวัดความหนาแน่นของพาหะนำประจุและความคล่องตัวของพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำได้

ในกรณีที่ต้องพิจารณาทั้งอิเล็กตรอนและโฮลพร้อม ๆ กันต้องมีการแก้ไขสมการใหม่ให้ถูกต้อง จากรูปที่ 2.7 (ก) สนามไฟฟ้า E อยู่ในทิศ X และขณะเดียวกันสนามแม่เหล็ก B อยู่ในทิศ Z เนื่องจากสนาม E จะเกิดกระแส โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย และโฮลไปทางขวา การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสนามแม่เหล็กนี้ทำให้มันได้รับแรงลอเรนซ์ และทิศทางเปลี่ยนไป คือทั้งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ลงไปสู่ผิวด้านล่าง (ดังรูปที่ 2.7 (ก)) และเกิดการหักล้างขึ้น การหักล้างนี้จะไม่หมดไปโดยสิ้นเชิง และทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวด้านล่าง เนื่องจากสารจะต้องเป็นกลางทางไฟฟ้าดังนั้นจะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นที่ผิวด้านบน และเกิดสนามไฟฟ้าในแกน Y ขึ้น ซึ่งเรียกว่าสนามของฮอลล์

2.4.1 ฮอลล์เอฟเฟกต์



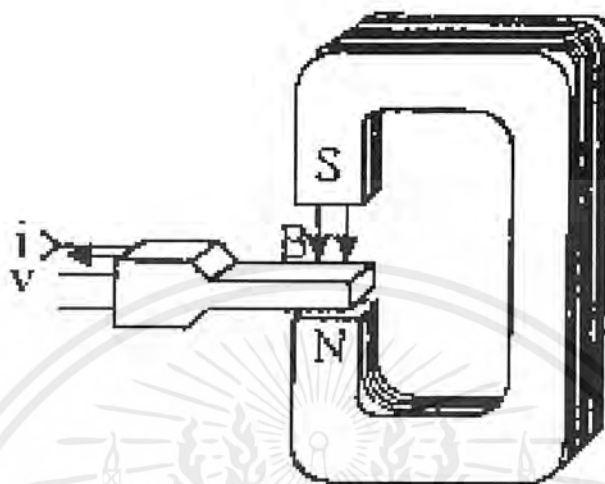
รูปที่ 2.8 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์

ในรูปที่ 2.8 ให้กระแส I (A) ไหลผ่านไปโดยสารกึ่งตัวนำ เช่น เจอร์มาเนียมที่มีความหนา t (m) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์ B (Wb/m²) ในแนวตั้งฉากกับระนาบ (plane) ของสารกึ่งตัวนำนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า v (V) ขึ้นในแนวตั้งฉากกับทั้ง B และ I ดังนี้

$$v = \frac{\eta i B}{t} \tag{2.23}$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) และ η (m³/C) เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) ถ้าทราบค่า η , t และ I เราจะสามารถหา B ได้โดยการวัด v

ฮอลล์เอฟเฟกต์มีขนาดเล็กมาก (t มีค่าอยู่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) จนสามารถนำไปวัดความหนาแน่นของฟลักซ์ในที่แคบ ๆ เช่น แสดงในรูปที่ 2.9 ได้ความไวของเครื่องนี้สามารถวัดได้ถึงระดับ 10^{-4} (Wb/m²) การปรับเทียบทำได้โดยการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall Emf) ในความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ทราบค่าแล้ว



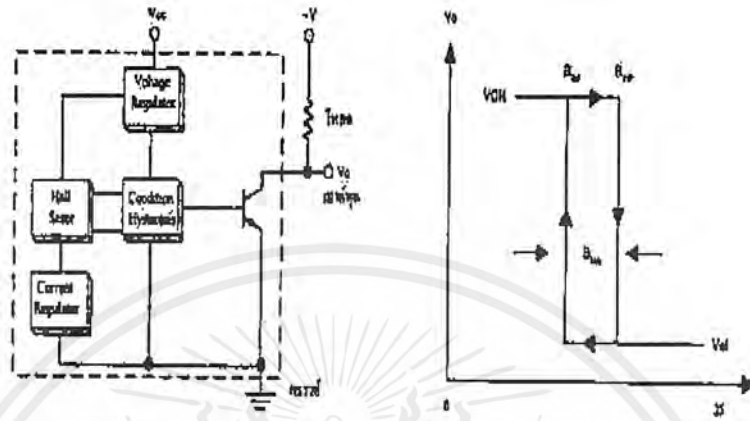
รูปที่ 2.9 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจนเนอเรเตอร์

2.4.2 ชนิดของฮอลล์

ฮอลล์แบ่งออกเป็นสามชนิด คือ ชนิดสวิตช์ ชนิดเป็นตัวลatches (Latch) และชนิดเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น ชนิดสวิตช์ และชนิดแลตช์เป็นอุปกรณ์ทางดิจิทัล คือ จะมีเอาต์พุตเพียงสองสถานะ ไม่เปิดก็ปิด ในขณะที่ฮอลล์แบบเชิงเส้นจะให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก

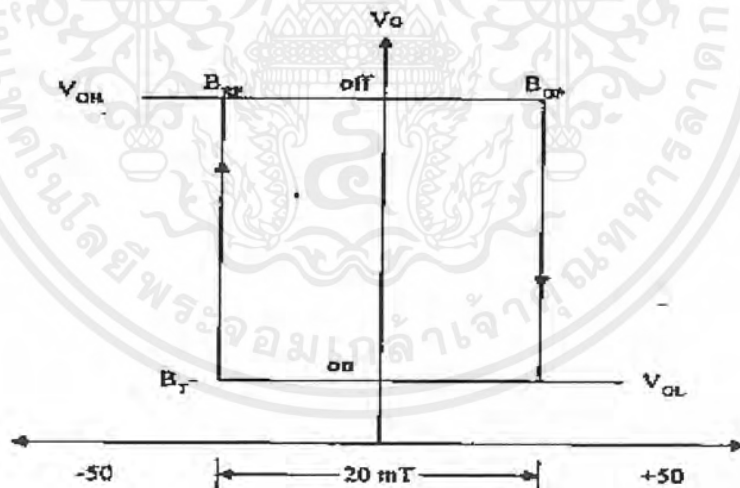
ฮอลล์ชนิดสวิตช์ (Switch Hall Device) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาวะปกติ “ปิด” และจะ “เปิด” เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก และจะปิดเมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.10 ผังงานของฮอลล์ชนิดสวิตช์ และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มจนถึงค่า B_{RP} แล้วจะให้แรงเคลื่อน V_{OH} สภาวะเช่นนี้ คือ “เปิด” แต่เมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจะถึง B_{OP} จะได้แรงดัน V_{OL} สภาวะเช่นนี้ คือ “ปิด”



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิตช์

ฮอลล์ชนิดเลตช์ (Latch Hall Device)



รูปที่ 2.11 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดเลตช์

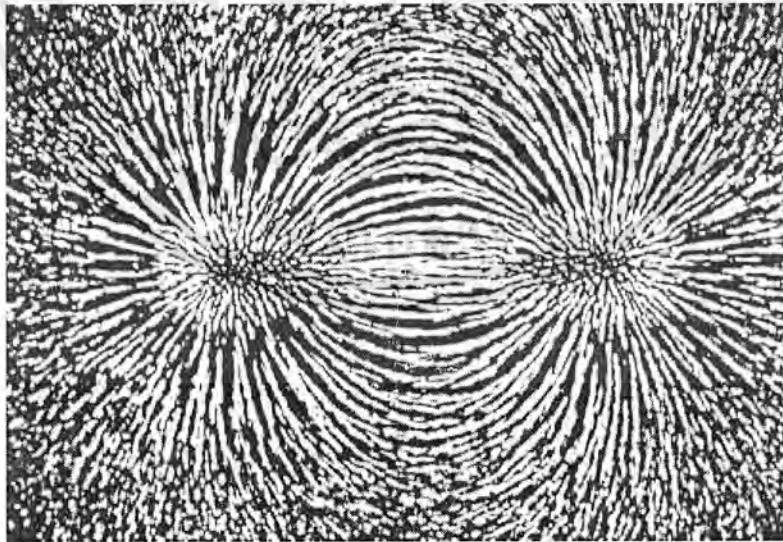
เนื่องจากฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการทำงานของฮอลล์ ภายในไอซีจึงจะต้องมีส่วนชดเชยอุณหภูมิ ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นที่ดีจะต้องมีความเที่ยงตรงขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานปกติ แรงดันที่วัดได้ไม่ควรพลาดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่อุณหภูมิปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

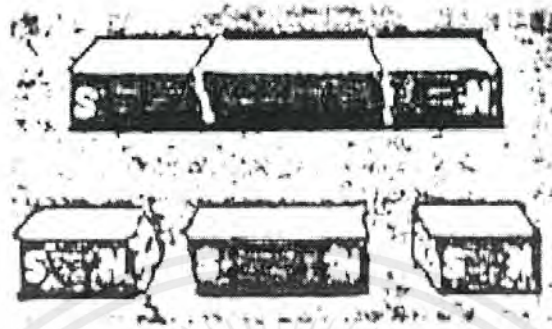
แรงดันของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นจะมีค่าน้อยมาดั่งนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องขยายเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น และถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยแรงดันที่ได้ก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากสนามแม่เหล็กมีค่ามากค่าของแรงดันก็จะมากขึ้นด้วย

2.5 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก

ตามธรรมชาติแล้วสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (Dipole) วางอยู่ห่างกันเป็นระยะทางจำกัดค่าหนึ่งเสมอ โครงสร้างทางแม่เหล็กนี้เราจะเรียกว่าไดโพล แม่เหล็ก (Magnetic Dipole) ดังรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผงเหล็กที่โรยลงบนแผ่นกระดาษที่มีแท่งแม่เหล็กวางอยู่ข้างใต้ จะปรากฏขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Lines) พุ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และในรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ซึ่งถูกหักออกเป็นท่อนเล็กๆ แล้วยังมีไดโพลแม่เหล็กเกิดขึ้นที่แม่เหล็กแต่ละท่อน และประพฤติกรรมเป็นแท่งแม่เหล็กอันใหม่ต่อไปอีก การที่จะทำการแยกขั้วแม่เหล็กทั้งสองออกจากกันเป็นขั้วแม่เหล็กเดี่ยว (Monopole) จึงไม่สามารถที่จะทำได้เลย



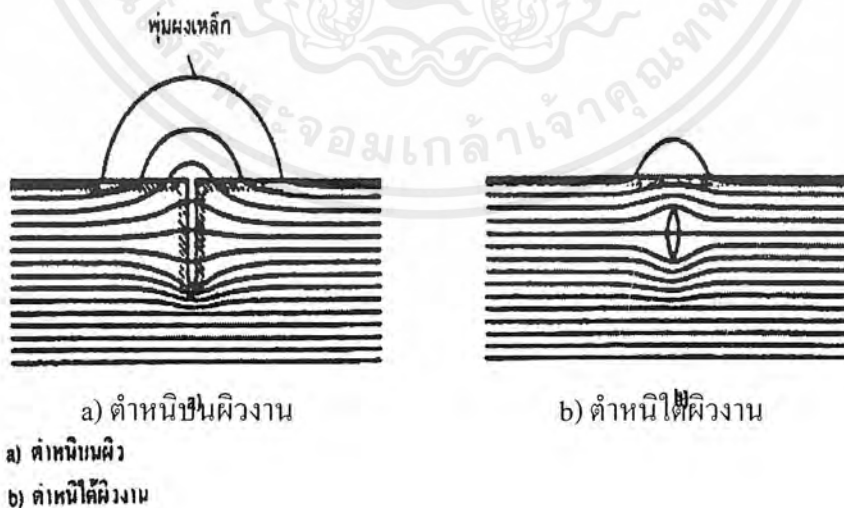
รูปที่ 2.12 ผงเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 แท่งแม่เหล็กแต่ละท่อนกลายเป็นไดโพลแม่เหล็กอันใหม่เสมอ

2.5.1 การตรวจสอบหาตำแหน่งของผิวงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดสนามแม่เหล็ก ตามกฎของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และจะเหนี่ยวนำขึ้นทดสอบที่เป็นเหล็กด้วย ดังนั้นเมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไป บริเวณที่เป็นตำแหน่งจะเกิดการเบี่ยงเบนของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดเป็นพุ่มเหล็กอย่างเห็นได้ชัด



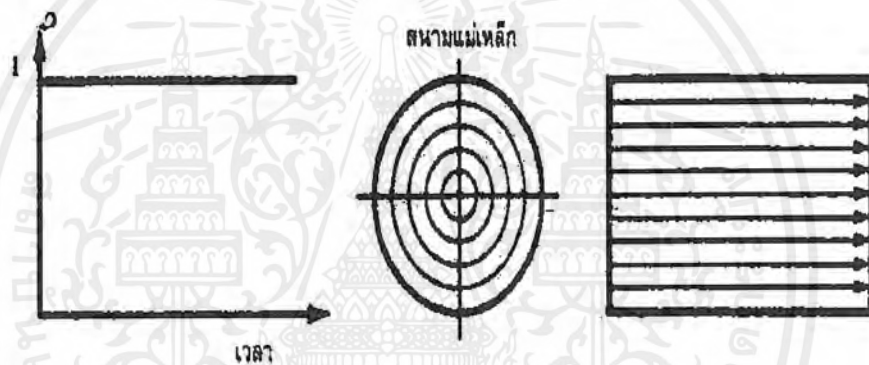
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของรอยตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

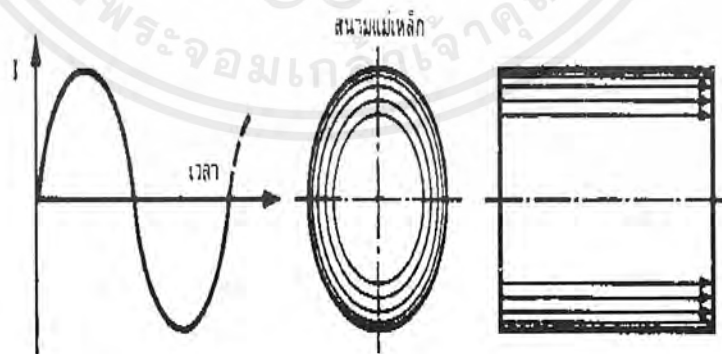
เงื่อนไขการทดสอบ

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตรง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นเมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กเพียงพอ ก็สามารถตรวจหาตำแหน่งใต้ผิวชั้นงานได้ถึงระยะหนึ่งที่ไม่ลึกจนเกินไปได้

ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผิวหนัง(Skin Effect) มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่า เกิดขึ้นบนผิวชั้นทดสอบทำให้การแสดงผลการปรากฏของตำแหน่งบนผิวชั้นทดสอบเกิดไวขึ้น

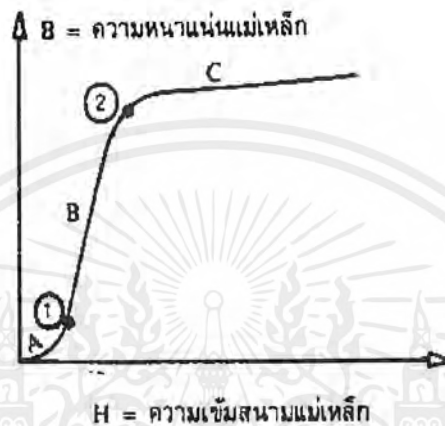


รูปที่ 2.15 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้า ตรง



รูปที่ 2.16 เกิดสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากบริเวณผิวชั้นทดสอบจากกระแสไฟฟ้าสลับ

สิ่งที่ช่วยเหนี่ยวนำขึ้นทดสอบให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้นั้นจะมีสิ่งเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้
คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแม่เหล็ก(Magnetic Induction) B และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) H



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และ H

เมื่อชิ้นงานที่เหนี่ยวนำเป็นแม่เหล็กได้ถูกเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่จำเป็นต่อการปรับแต่งให้ได้ค่าความหนาแน่นแม่เหล็ก B ให้สูงอย่างเหมาะสมได้ ซึ่งมันจะขึ้นอยู่กับความสามารถนำแม่เหล็กของชิ้นงานด้วย

A = เส้นโค้งจนถึงจุดที่ 1 ค่า H จะเป็นสัดส่วนต่อการเพิ่มค่า B

B = ระหว่างจุด 1 ถึงจุด 2 จะเกิดการนำแม่เหล็กในชิ้นทดสอบเหล็กได้สูงที่สุด

C = จากจุด 2 เป็นพื้นที่การอิ่มตัวของแม่เหล็ก เช่น เส้นโค้งเอียงจะแสดงถึงความต้านทานแม่เหล็กภายในเหล็กที่เป็นสัดส่วนต่อความต้านทานในอากาศ

B = ความหนาแน่นแม่เหล็ก (Magnetic Induction) หน่วยเป็น Tesla

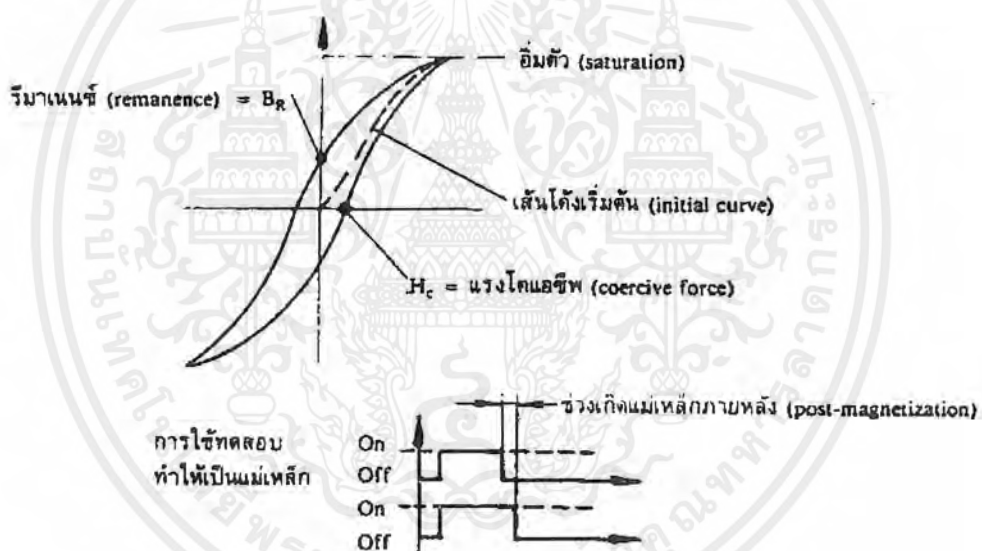
H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) หน่วยเป็น kA/m

โดยที่ $1 \text{ kA/m} = 10 \text{ A/cm}$ $\text{A/cm} = 1.256 \text{ Oe}$

ความเป็นแม่เหล็ก (Ferro Magnetic) ของชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. วัสดุแม่เหล็กอ่อน

จะใช้แรงแม่เหล็กค่อนข้างน้อย ค่ารีมานนซ์ (Remanence) ต่ำ ที่นำมาใช้ในการเกิดสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อปิดสวิตช์สนามแม่เหล็กในชั้นทดสอบจะหายไปหมด จัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการทำให้เป็นและลบล้างอำนาจแม่เหล็ก วัสดุประเภทนี้ไม่ได้หมายความรวมถึงวัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม ทำให้วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อนมีลักษณะแคบ แรงลบล้างแม่เหล็กมีค่าน้อยคืออยู่ในช่วง 0.004 - 0.088 แอมแปร์ต่อเซนติเมตร วัสดุแม่เหล็กอ่อนได้แก่ โลหะผสม Fe-4%Si ที่นำมาทำเป็นแกนหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวัสดุใหม่เรียกว่า แก้วโลหะ (metallic Glass) ก็จัดเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปทำเป็นแม่เหล็กประสิทธิภาพสูงในอุปกรณ์ต่าง

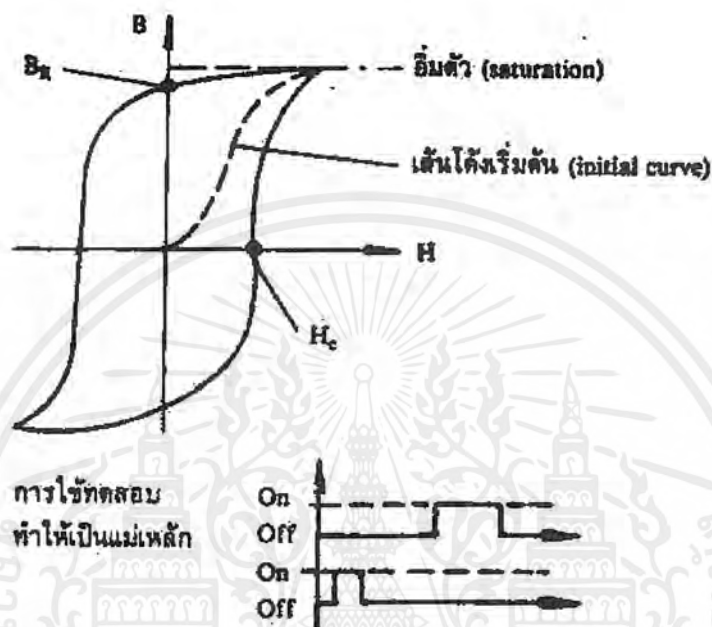


รูปที่ 2.18 วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อน

2. วัสดุแม่เหล็กแข็ง

ได้แก่ชั้นทดสอบเหล็กที่มี $C > 0.2\%$ ทำให้เกิดความเสียดทานมากต่อสนามแม่เหล็ก มีคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับวัสดุแม่เหล็กอ่อนคือต้องการสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสูงในการทำให้เป็นแม่เหล็ก การลบล้างสภาวะแม่เหล็กก็ทำได้ยาก ขนาดของวงฮิสเทอรีซิสจึงมีความกว้างมาก ค่ารีมานนซ์ (Remanence) จะสูงมาก ตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กแข็งได้แก่โลหะผสมอัลนิโค (Alnico Alloy) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ได้จากการผสมโลหะอลูมิเนียม นิเกิลและโคบอลต์เข้าด้วยกัน แรงลบล้างแม่เหล็กของโลหะผสมชนิดนี้สูงถึง 40-160 กิโลแอมแปร์ต่อเมตร อัลนิโคจึงเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีความสำคัญและใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กแข็ง

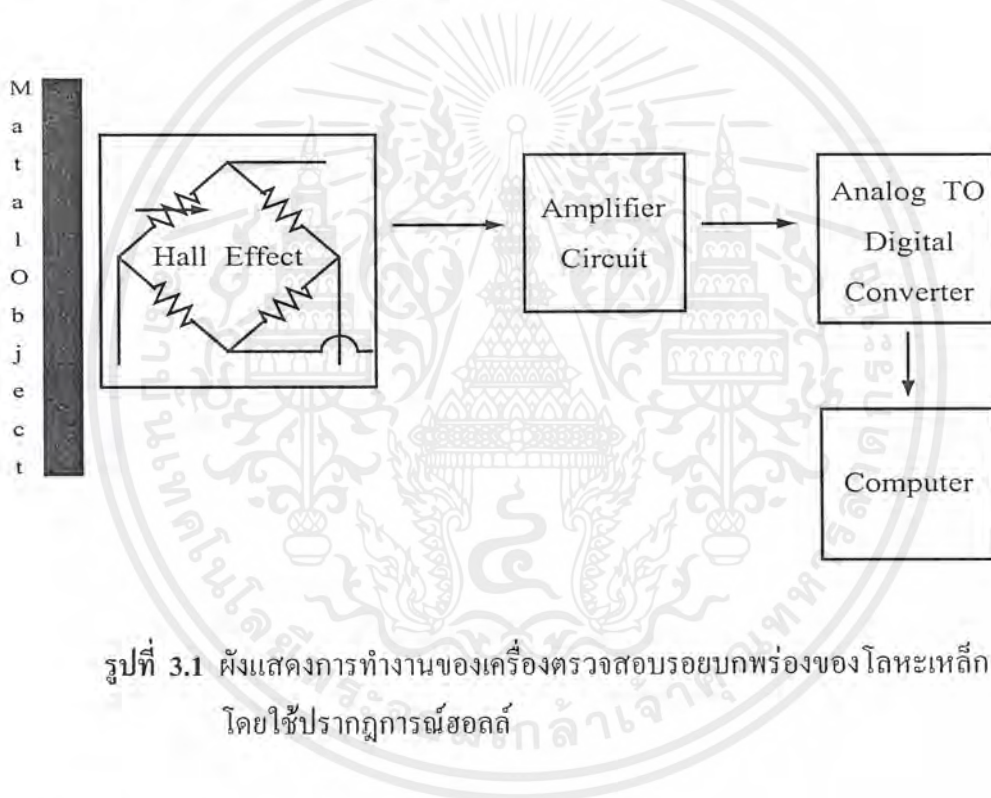
2.6 การเหนี่ยวนำของปรากฏการณ์ฮอลล์

KMZ10B ใช้ทำปรากฏการณ์การเป็นแม่เหล็ก โดยเปลี่ยนความต้านทานของมัน ณ จุดนั้นให้เป็นสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งภายในมันจะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน 4 ตัว ที่ถูกเชื่อมต่อจากแขนของ Wheatstone Bridge หนึ่งของบริดจ์ที่ไม่ได้สัดส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ในการบ่งบอกความเข้มของสนามแม่เหล็ก และบริดจ์นี้จะอยู่ในสถานะสมดุล นั่นคือ มีแรงดันตกคร่อมโวลต์มิเตอร์เท่ากับศูนย์ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้บริดจ์ไม่สมดุลและสามารถตรวจจับได้เมื่อเทียบกับศูนย์ เซ็นเซอร์ตัวนี้เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กมากและจะตรวจจับได้ดีเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ค่าของอุณหภูมิมีผลต่อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

ในส่วนของการออกแบบการสร้างเครื่องตรวจสอบร่องรอยของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ (The Metal Object Crack Detector Sing Hall Effect) นี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์



รูปที่ 3.1 ผังแสดงการทำงานของเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

3.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

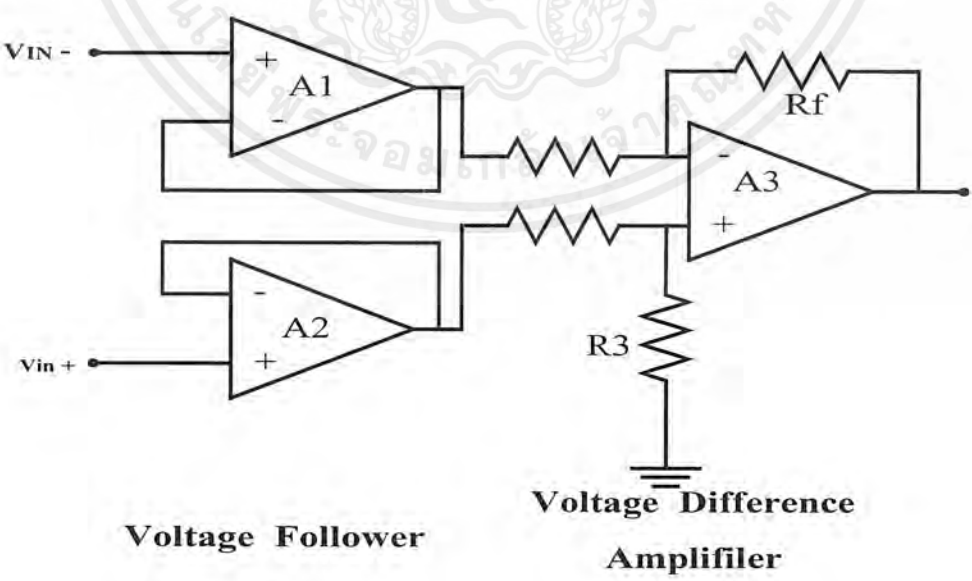
ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะมีการทำงานตามผังแสดงการทำงานดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังนี้ ตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีสนามแม่เหล็กถาวรติดอยู่กับตัวของ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเองแล้วจะทำการส่งสนามแม่เหล็กถาวรออกไปรอบตัวเองเมื่อมีชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กถาวรที่ตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กส่งออกไป ตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะทำการตรวจจับผลของสนามแม่เหล็กที่สะท้อนกลับมา ซึ่งภายในตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะเปรียบเสมือนวงจรวีสดิโรนบริดจ์ ซึ่งภายในวงจรจะมีขาของวงจรบริดจ์ขาหนึ่งที่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเองตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถตรวจจับได้แล้วจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้ออกมาเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณที่ได้มาทำการขยายสัญญาณ แต่เนื่องจากสัญญาณที่จากตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนมากดังนั้นจึงใช้วงจรขยาย Instrument Amplifier เพื่อลดสัญญาณรบกวน แล้วนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขยายส่งต่อไปให้กับวงจรแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และส่งต่อไปประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลทางจอภาพ

3.2 การออกแบบวงจรขยาย

ในโครงงานนี้ได้ใช้วงจรขยาย Instrument Amplifier เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่มากับสัญญาณเอาต์พุตของ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลให้มีความ แน่นอนมากขึ้น

Basic Instrumentation Amplifier นั่นคือ Voltage Differencing Amplifier แบบง่าย ๆ ซึ่งมี Voltage Follower Buffered Input อยู่ด้วยคุณคงจำได้ว่า Input Resistance ของ วงจรแรงดันตาม นั้นจะสูงมากอาจถึง Infinity ก็ได้ซึ่ง Impedances สูงมากขนาดนี้จะทำให้ไม่สามารถดึงกระแสไฟจาก Bridge Network ได้ซึ่งเมื่อเอา Galvanometer Leg ออกจาก Bridge Calculation สิ่งที่เราต้องการคำนวณก็คือ Difference Voltage



รูปที่ 3.2 Basic Instrumentation Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

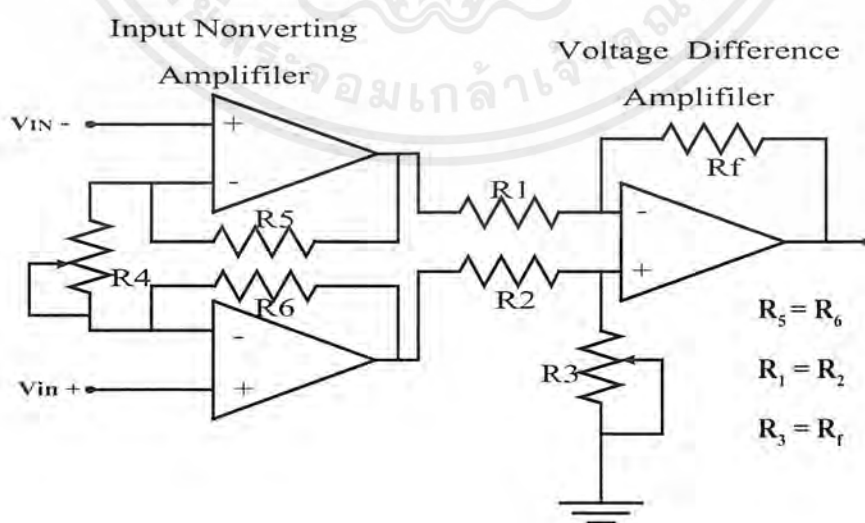
รูปที่ 3.2 แสดง Basic Instrumentation Amplifier สังเกตดูจะเห็นว่ามีส่วนอยู่สองส่วนคือ ส่วนของ Input ซึ่งประกอบด้วยวงจรเดินตามสองวงจร ซึ่งตัวหนึ่งมี Gain และอีกส่วนหนึ่งคือ ส่วน Out put ซึ่งประกอบด้วย Basic Voltage Differencing Amplifier ซึ่งอาจจะมี Gain เรา อาจเพิ่ม Gain ให้กับ Input Stage ได้โดยการเปลี่ยนวงจรแรงดันตามเป็น Noninverting Amplifier ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3. สังเกตดูจะเห็นว่า Noninverting Amplifier Input Stage นั้นถูก ออกแบบให้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยรีซิสเตอร์ R_4 ถูกสร้างขึ้นมาจากรีซิสเตอร์ที่มีค่าเท่ากันสอง ตัว ต่อแบบอนุกรมโดยมีขั้วกลางลงดินซึ่งทำให้เราสามารถคำนวณ Input Stage Gain ได้ดังต่อไปนี้

$$A_{v1} = \frac{R_5 + 1}{R_4 - 2}$$

$$A_{v1} = \frac{2R_5 + 1}{R_4}$$

ถ้า R_4 ถูกเชื่อมต่อไว้ที่ 500 โอห์ม

$$A_{v1} = \frac{2 \times 5k + 1}{500}$$



รูปที่ 3.3 การเพิ่ม Gain เข้าไปใน Instrument Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถคำนวณหา Difference Amplifier Gain ได้ดังนี้

$$A_{v2} = \frac{10 \text{ } k}{1 \text{ } k}$$

และเราก็สามารถคำนวณหา Gain ทั้งหมดของวงจรได้ดังนี้

$$A_{v2} = 10$$

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2}$$

$$A_v = 110$$

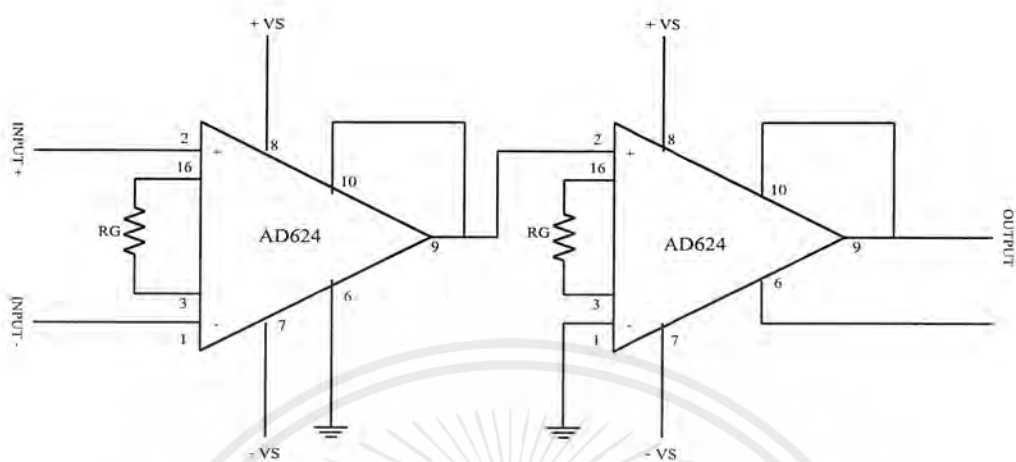
สังเกตจะเห็นว่า R_3 ในวงจรจะถูกแทนที่ด้วย Potentiometer ซึ่งการเพิ่มส่วนนี้เข้าไปใน วงจรจะช่วยให้เราสามารถปรับ CMRR ให้มีค่าเหมาะสมคัมค่าที่สุด การเปลี่ยนค่าความต้านทานเล็กน้อยนี้จะช่วยให้เกิดสมดุลของระดับสัญญาณใน Input ทั้งสองตัว ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมี Common Mode Voltage Input ใน Noninverting Input Stage ซึ่ง Common Mode Signal นี้ก็คือเสียง (Noise) ซึ่งเราต้องการจะกำจัดออกไปการเพิ่ม Gain ใน Input Stage นี้จะช่วยปรับอัตราส่วนของสัญญาณกับเสียงแต่มันจะเพิ่มออฟเซตขึ้นอีกสองตัวในวงจร

ซึ่งการเพิ่มเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหาอีกประการหนึ่งกับออฟเซต คือ Drift คือแนวโน้มของ Output Voltage ของออฟเซตแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ การแปรเปลี่ยนเหล่านี้มีสาเหตุมาจาก Imbalance ภายในตัวออฟเซตเอง ถ้าวงจรของเราต้องใช้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ เราจะต้องเลือกใช้ออฟเซตที่มี Drift ต่ำ

จากปัญหาในการใช้ออฟเซตเป็นตัวยกยดดังกล่าวดังนั้นในการออกแบบวงจรขยายของโครงการจึงได้ใช้ Instrumentation Amplifier ที่เป็นไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD 624 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปที่สามารถที่จะเลือกอัตราการขยายได้โดยการต่อขาที่ 3 ร่วมกับขาต่าง ๆ โดยที่ถ้าต่อขาที่ 3 ร่วมกับขา 11 อัตราการขยายจะเท่ากับ 500 เท่า ขาที่ 3 ร่วมกับขาที่ 12 อัตราการขยายเท่ากับ 200 เท่า ขาที่ 3 ร่วมกับขาที่ 13 อัตราการขยายเท่ากับ 100 เท่า และถ้าต่อขาที่ 3 ร่วมกับขาที่ 16 จะสามารถที่จะหาอัตราขยายได้โดยใช้ค่าความต้านทานมาต่อรวม ดังนั้นในโครงการนี้ใช้การขยายสอง Stage โดยใน Stage อัตราการขยายเท่ากับ 50 เท่า และใน Stage ที่สองอัตราการขยายเท่ากับ 20 เท่า ซึ่งลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีสูตรในการคำนวณค่า R_G ดังนี้

$$R_G = \frac{40 \text{ } k}{G - 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรขยายสัญญาณ

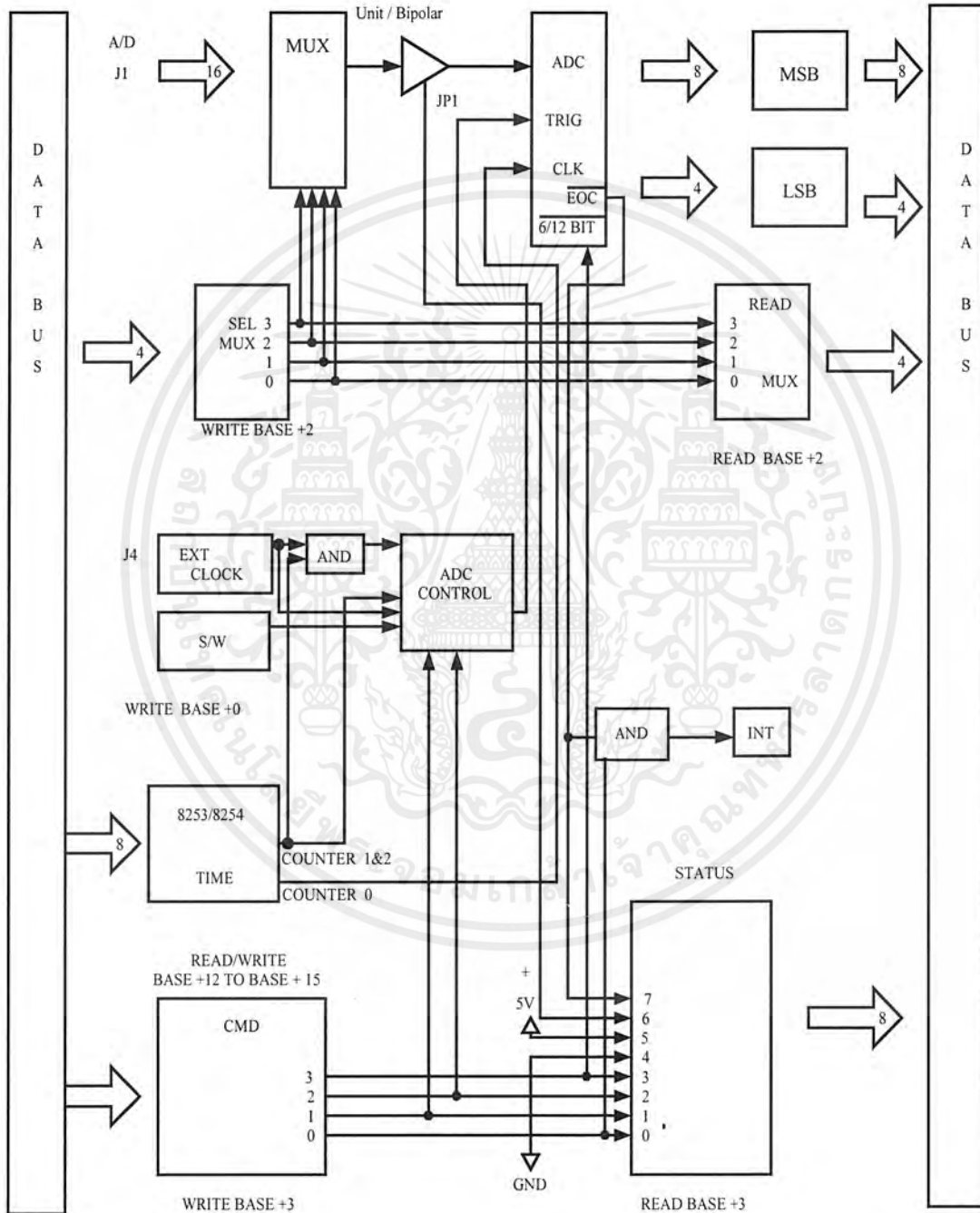
3.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog To Digital Converter Circuit)

ในโครงการนี้ได้ใช้การประมวลผลทางแอนะล็อกร่วมกับการประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงได้เลือกใช้การ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลรุ่น PA – CP12 ซึ่งมีการทำงานในรูป และคุณสมบัติดังนี้

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

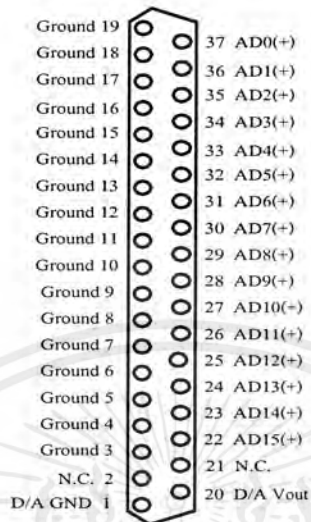
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการต่อ Connector DB – 25 มีรายละเอียดดังรูป 3.6



รูปที่ 3.5 การทำงานของการ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC)

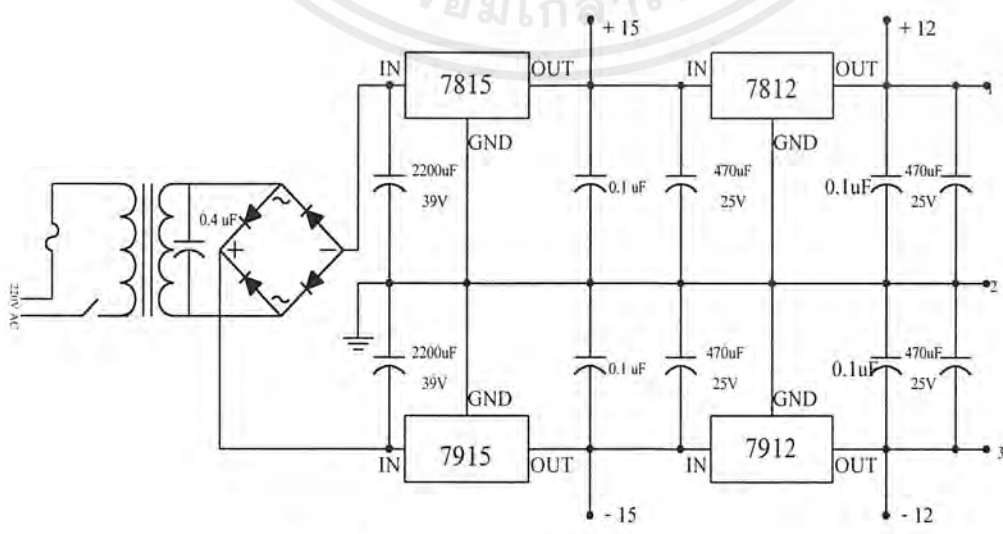
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การต่อสัญญาณจากการวัดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (ADC)

3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในโครงงานนี้ใช้ IC กระตุก 78XX และ 79XX ซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน ในโครงงานนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 ชุด ชุดแรกใช้รักษาระดับแรงดัน -15V และ +15V ใช้ IC เบอร์ 7815 และ 7915 ชุดที่สองใช้ระดับแรงดัน -12V และ +12V ใช้ IC เบอร์ 7812 และ 7912 ซึ่งมีลักษณะวงจรงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ซอฟต์แวร์

ในส่วนของซอฟต์แวร์ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนรับข้อมูลจากการ์ดแปลง สัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และส่วนแสดงผล

3.5.1 ส่วนรับข้อมูลจากการ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ในส่วนนี้ประกอบด้วยสองส่วน คือ

ก) ส่วนกำหนดความเร็วในการสุ่ม

ในส่วนนี้ จะทำหน้าที่กำหนดอัตราความเร็วในการสุ่มสัญญาณ ที่เข้ามาทางขา AD และ ADI

ข) ส่วนรับข้อมูล

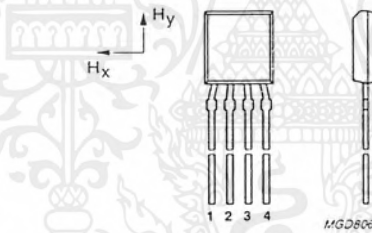
ในส่วนนี้ จะทำหน้าที่เปลี่ยนอินเทอร์รัพต์เวกเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ให้มาชี้ที่โปรแกรมที่เขียนขึ้น เนื่องจากได้ออกแบบให้รับข้อมูลได้ทุกครั้งที่มีสัญญาณเข้ามาที่ขา IRQ5 ซึ่งเป็นขาอินเทอร์รัพต์ฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์

3.5.2 ส่วนแสดงผล ในส่วนนี้จะแสดงผลให้ผู้ใช้งานได้เห็นขนาดของชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ และจะทำหน้าที่ พล็อตค่าจากการ์ดแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แสดงออกทางจอเครื่องคอมพิวเตอร์ และส่วนควบคุมการทำงานของพลอตเตอร์ในส่วนนี้ จะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของพลอตเตอร์ เพื่อให้ พลอตเตอร์ เคลื่อนในแนวแกน X และแกน Y ไปตามขนาดของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากที่ได้สร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องตรวจสอบหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้ไอซีซึ่งเป็น ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นตัวตรวจจับเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กตามการออกแบบในบทที่ 3 ไปแล้ว เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและทดสอบเครื่องต้นแบบ โดยการทดลองและทดสอบเครื่องได้แยกเป็นการทดสอบฮาร์ดแวร์ (Hard Ward) และทดสอบ โดยรวมทั้งระบบผลการทดลองสามารถวัดได้จากออสซิลโลสโคปและจอภาพแสดงผลของคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 Magnetic Sensor เบอร์ KMZ10B



รูปที่ 4.2 ฟลोटเตอร์ และลักษณะของการวางชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานที่ใช้ในการตรวจสอบ โดยขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดลองและการทดสอบฮาร์ดแวร์

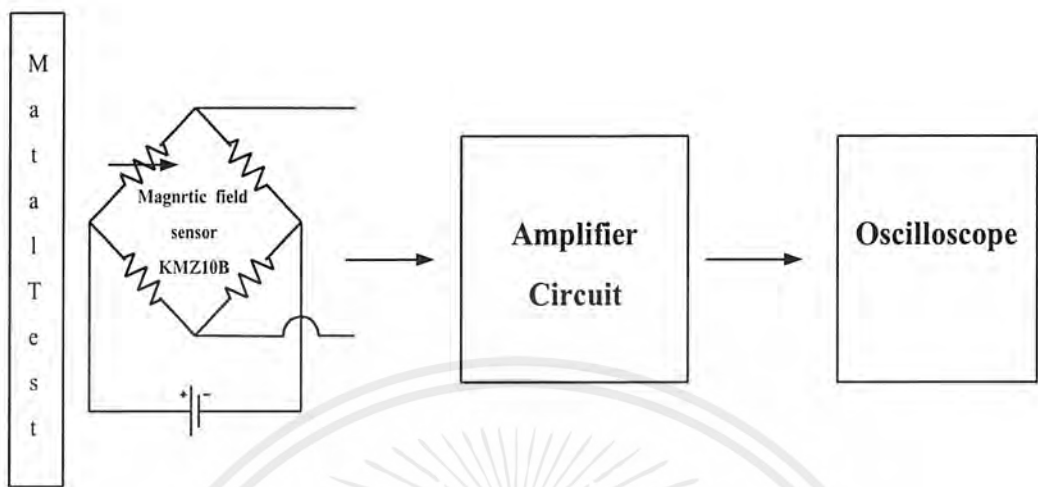
ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ IC ที่เป็น ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กสำเร็จรูปของบริษัท Philips เบอร์ KMZ10B เป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และได้ใช้ IC สำเร็จรูป Analog Devices ซึ่งเป็น Instrumentation Amplifier มาใช้ในวงจรขยายซึ่งมีลักษณะการต่อดังรูปที่ 4.2 และได้ทำการทดลองร่วมกับการเคลื่อนที่ไปของพลอตเตอร์ซึ่งจะใช้เป็นตัวในการเคลื่อนที่ของตัวตรวจจับ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Magnetic Sensor เบอร์ KMZ10B ที่ติดตั้งบนแกนของ X-Y ของ พลอตเตอร์ เรียบร้อยแล้ว
2. วงจรขยาย (Amplifier Circuit)
3. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบตามรูปที่ 4.5
4. ดิจิตอลมิเตอร์ (Digital MultiMeter)
5. ออสซิลโลสโคป

4.1.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. นำชิ้นงานที่ระดับความหนาต่างระดับกันที่จะทำการทดสอบซึ่งมีความหนาดังแต่ 2 mm ถึง 10 mm ซึ่งระดับความหนาที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 2 mm
2. เคลื่อนตัวตรวจจับไปที่ระดับความหนาของชิ้นงานแต่ละระดับ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อตัวตรวจจับเคลื่อนไปที่ระดับความหนาต่างระดับกัน
3. บันทึกผลการทดลอง
4. นำชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องที่จะทำการทดสอบมาทดสอบ
5. การเคลื่อนตัวตรวจจับเพื่อให้ผ่านไปที่รอยบกพร่องแต่ละรอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อตัวตรวจจับเคลื่อนที่ผ่านรอยบกพร่องแต่ละรอย
6. บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 4.3 การทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ

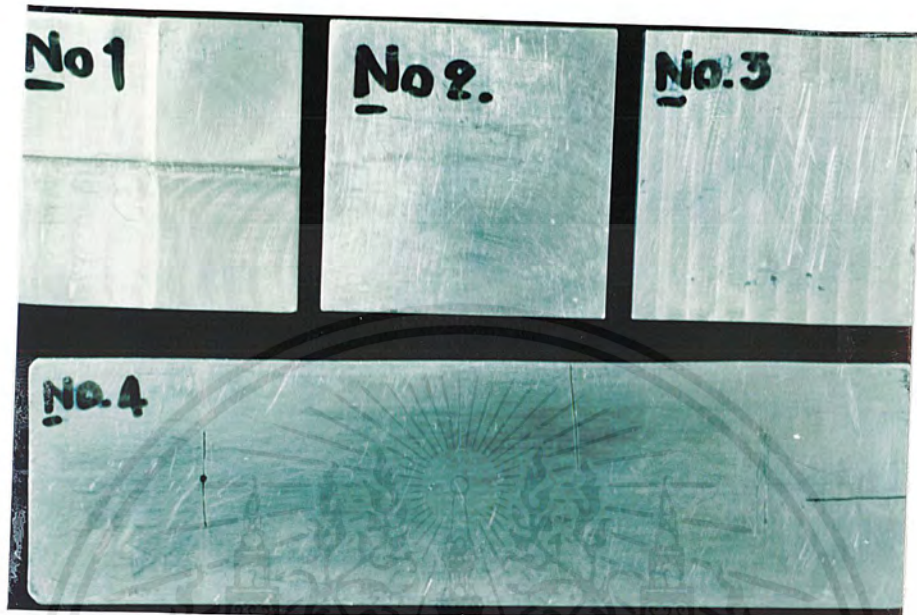
4.2 ผลการทดลองอาร์ดแวร์กับชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองชิ้นงานที่ระยะความห่างของตัว Sensor กับผิวของชิ้นงานระยะต่าง ๆ

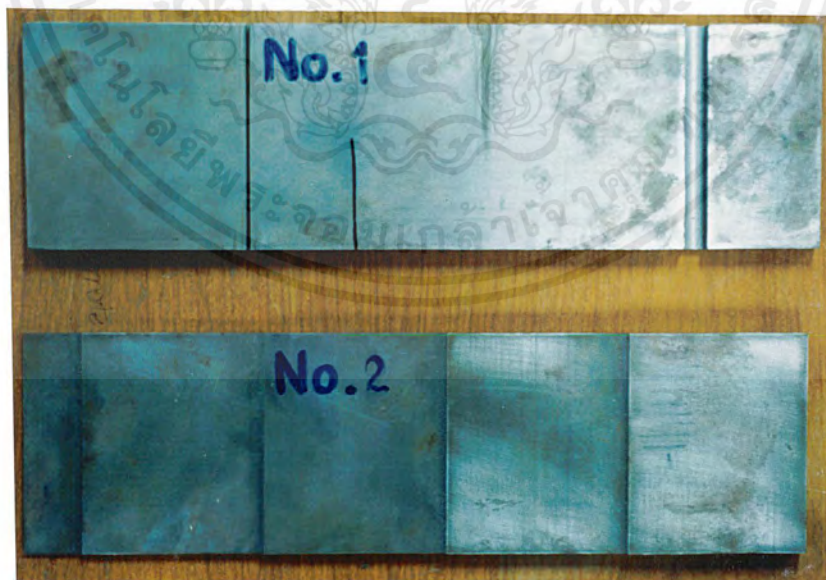
ระยะห่างของตัวSensor กับผิวของชิ้นงาน (mm)	แรงดัน Output (V)
2 mm	3.65
4 mm	1.23
6 mm	0.36
8 mm	- 0.15
10 mm	-0.32

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีรอบบกวร่องแบบต่าง ๆ

ลักษณะของรอบบกวร่อง	แรงดัน Output (V)
ลักษณะที่ 1 (ปกติ)	2.44
ลักษณะที่ 2	2.75
ลักษณะที่ 3	2.52
ลักษณะที่ 4	2.38
ลักษณะที่ 5	1.87

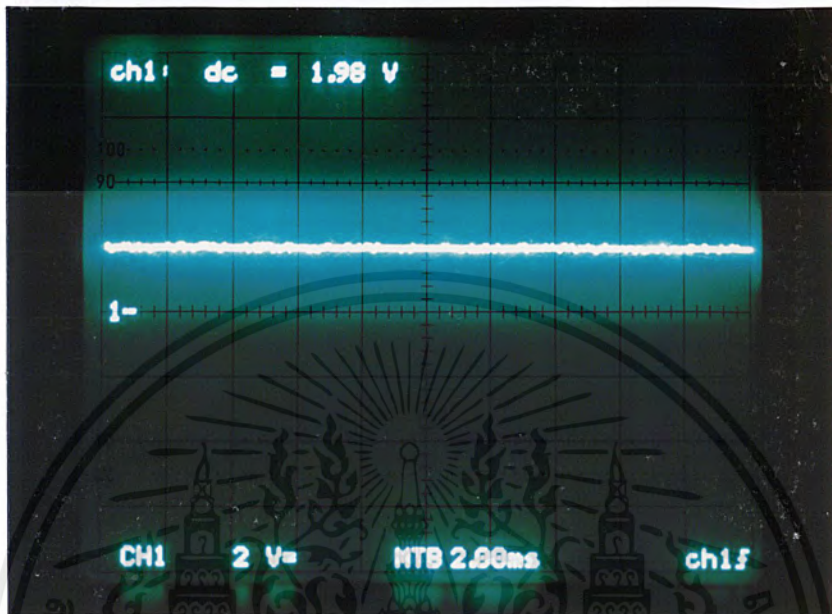


รูปที่ 4.4 ลักษณะของรอบบกร่องแบบต่างๆ

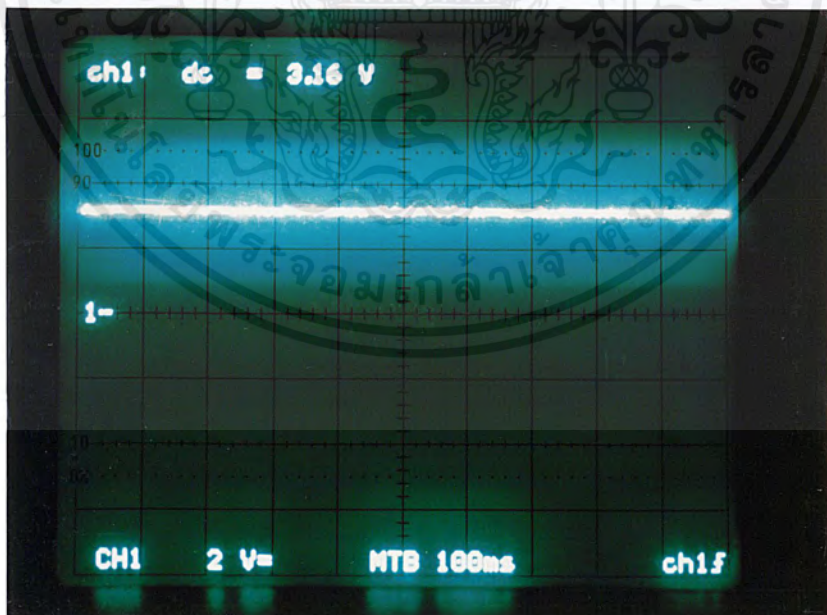


รูปที่ 4.5 ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนาน้อยที่สุด

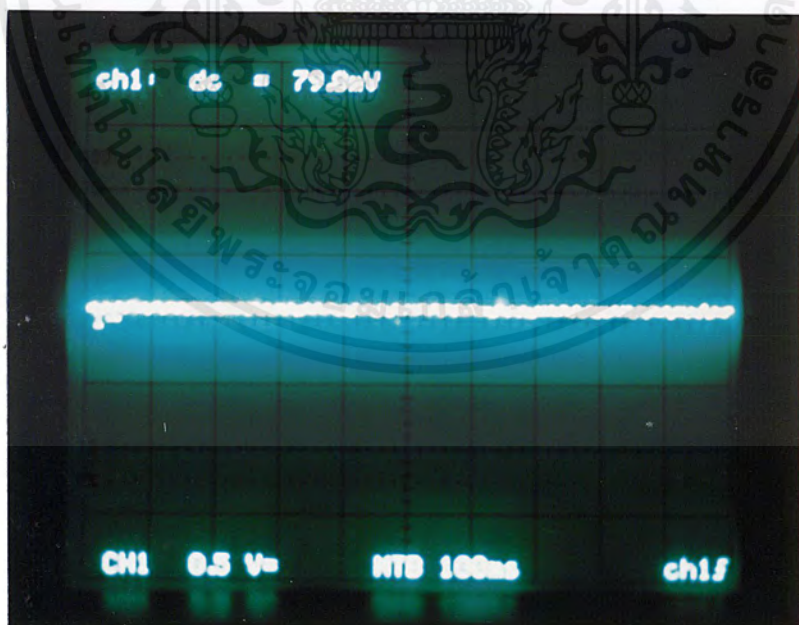


รูปที่ 4.7 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

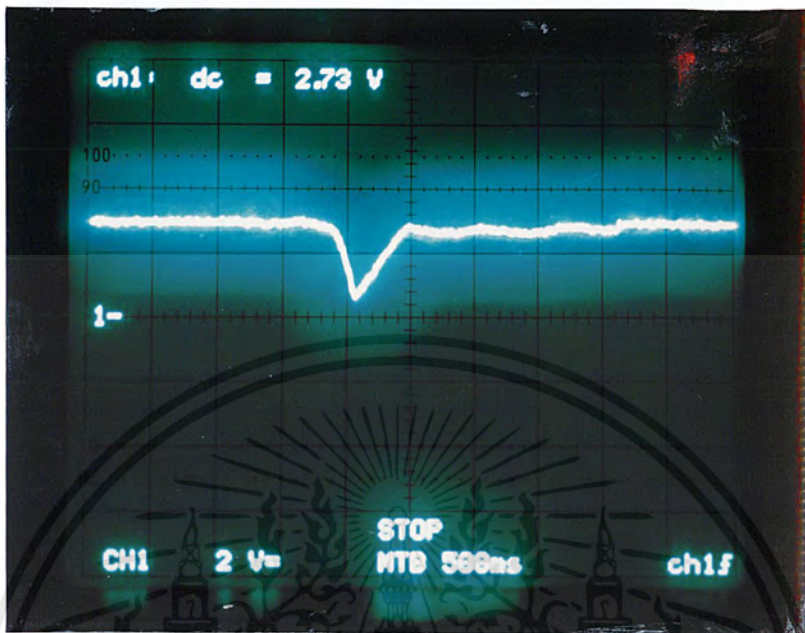


รูปที่ 4.8 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีความหนาต่างระดับกัน

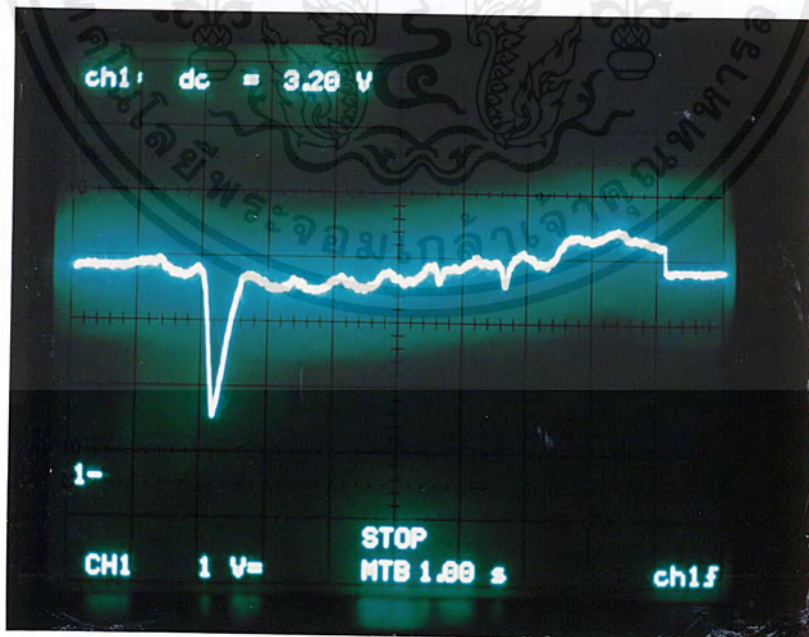


รูปที่ 4.9 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับที่ชิ้นงานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์ที่รอยบกพร่อง

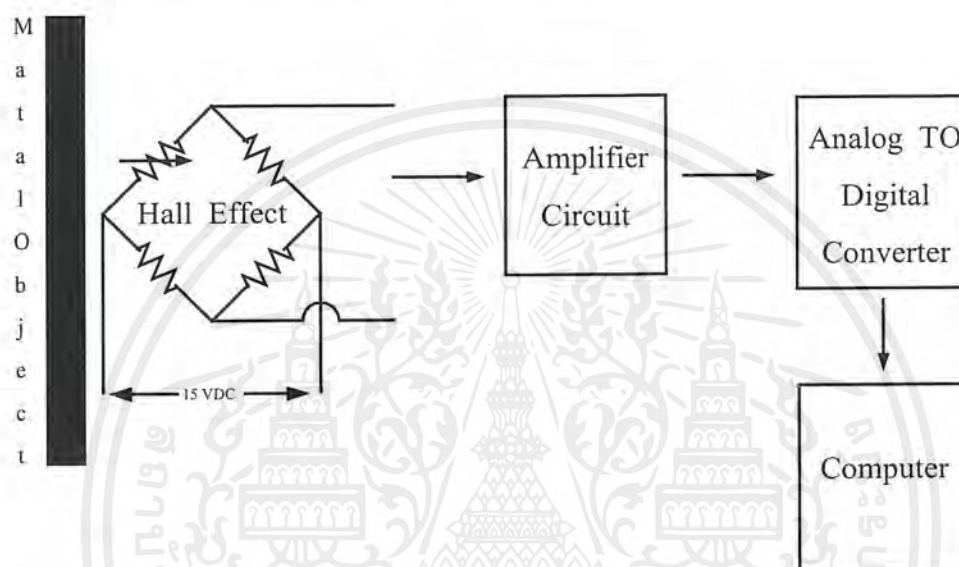


รูปที่ 4.11 ผลการทดลองฮาร์ดแวร์กับชิ้นงานที่มีรอยบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองทั้งระบบ

ในส่วนของการทดลองทั้งระบบนี้ เป็นการทดลองฮาร์ดแวร์ร่วมกับซอฟต์แวร์ ของเครื่องตรวจสอบหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยมีการทำงานดังรูปที่ 4.12



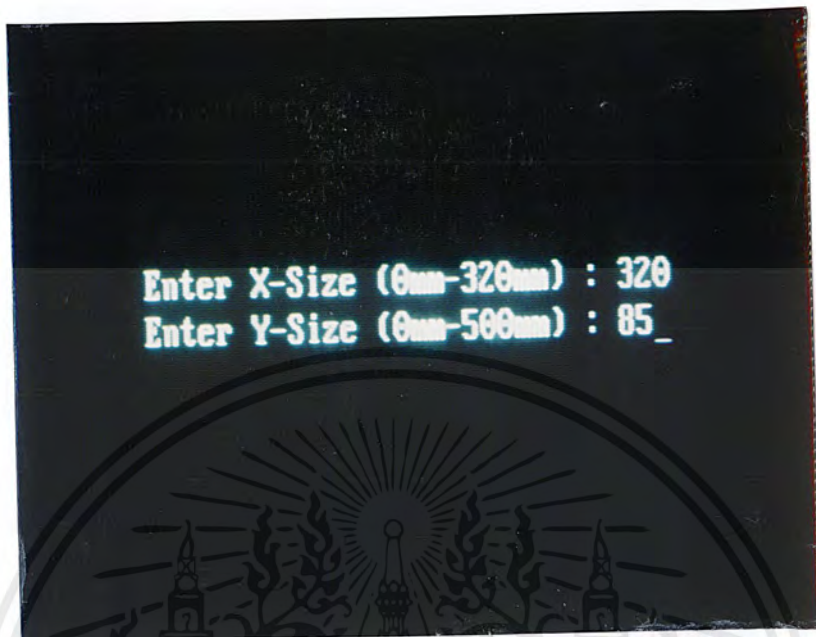
รูปที่ 4.12 การทดลองทั้งระบบของเครื่องตรวจสอบโลหะโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

ในส่วนของโปรแกรมนั้นใช้ Turbo C Version 2 ในการเขียนโปรแกรม เครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะดังนี้ Super TX 66MMX Pentium ใช้จอโมนิเตอร์สี พื้นที่เก็บข้อมูล 2 เมกกะไบต์

ในการทดลองส่วนซอฟต์แวร์ นั้นจะนำสัญญาณที่วัดได้จากการทดลองฮาร์ดแวร์มาทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งเป็นการคอนเวอร์ตเฟสเพื่อนำสัญญาณไปแสดงผลดังรูปที่ 4.11

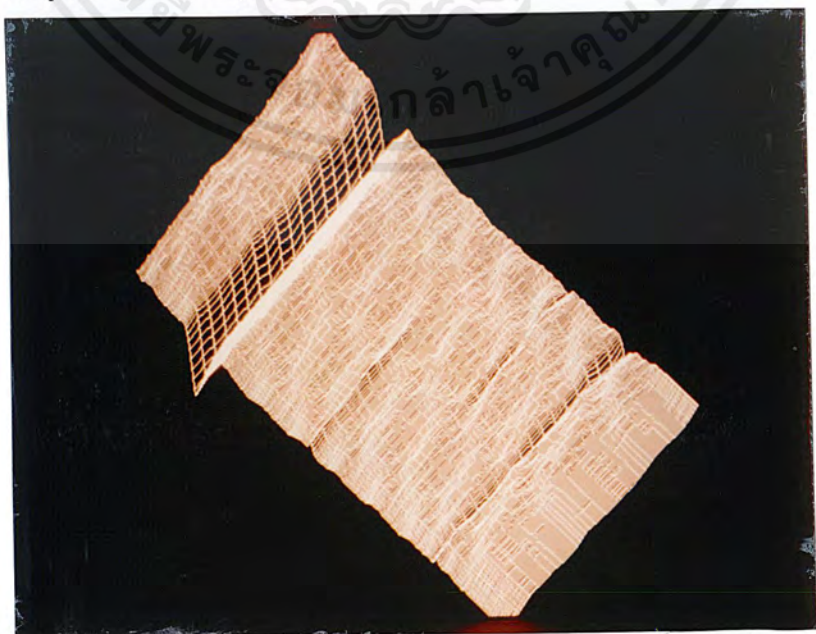
4.3.1 การทดลองใช้โปรแกรม

สามารถเข้าโปรแกรมได้โดยการเรียกไฟล์ AD.EXE เพื่อใช้โปรแกรมและสามารถเลือกขนาดความกว้างความยาวของชิ้นงานที่จะทดสอบได้ ซึ่งจะมีลักษณะหลังจากเรียกโปรแกรมมาแล้วดังรูปที่ 4.11

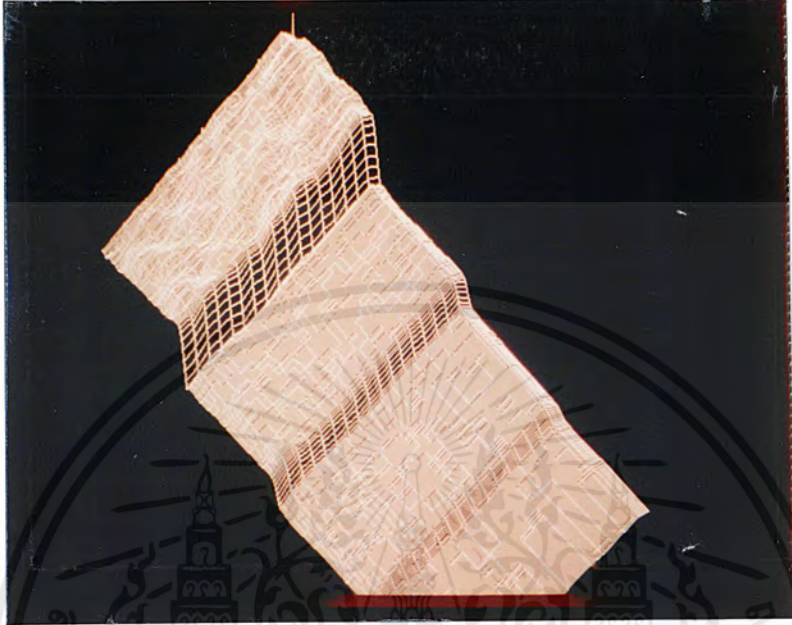


รูปที่ 4.13 ลักษณะของหน้าจอหลังจากเรียกโปรแกรม

การใช้งานโปรแกรมหลังจากเรียกโปรแกรมขึ้นมาแล้ว จะต้องป้อนขนาดของเหล็กโดยที่จะต้องไม่เกิน Limit ที่กำหนดไว้ โดยที่แกน Y สามารถป้อนได้ตั้งแต่ 0 – 320 mm และแกน X สามารถป้อนได้ตั้งแต่ 0 – 500 mm หลังจากป้อนเสร็จแล้วให้กดเป็น Enter 2 ครั้ง แล้วจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.14 ผลการทดลองการทดลองทั้งระบบกับชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 1. เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองทั้งระบบกับชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา

5.1 บทสรุป

การจัดทำเครื่องวัดรอยบกพร่องของโลหะเหล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในโลหะเหล็ก เพื่อที่จะใช้การเปลี่ยนแปลงของเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของโลหะเหล็ก เช่น ความหนา รอยบกพร่อง, รอยร้าว เป็นต้น โดยในโครงการนี้จะใช้ชิ้นงานที่เป็นโลหะที่มีขนาดความหนาตั้งแต่ 2 มิลลิเมตร ถึง 10 มิลลิเมตร สามารถตรวจหารอยบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน และตรวจระดับความหนาของโลหะที่ระดับต่าง ๆ ได้ ซึ่งในการตรวจระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะส่งผลต่อความสามารถในการตรวจจับ ของตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กถ้าระยะห่างของชิ้นงานกับ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กมีระยะกว้างขึ้นจะทำให้การตรวจสอบมีความแม่นยำและละเอียดน้อยลง แต่ถ้าระยะห่างของชิ้นงานกับ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแคบลง จะทำให้การตรวจสอบมีความ แม่นยำและมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งในโครงการนี้เราได้ใช้ตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเบอร์ KMZ10B ของบริษัท PHILIPS เป็นตัวตรวจจับ และได้นำ พลอตเตอร์ มาประยุกต์ใช้ติดตั้งตัว Sensor เพื่อใช้การเคลื่อนที่ของ พลอตเตอร์ ในทางแกน X แกน Y ในการเคลื่อนที่ตำแหน่งของตัว Sensor ในการตรวจหารอยบกพร่องของชิ้นงาน และชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นชิ้นงานที่มีรอยบกพร่องของผิวหน้าโลหะแบบต่าง ๆ และชิ้นงานที่มีระดับของความหนาไม่เท่ากัน เพื่อเป็นการจำลองรอยบกพร่องและความหนาของโลหะ ซึ่งเมื่อทำการเคลื่อน แกนของ พลอตเตอร์ เคลื่อนผ่านรอยบกพร่องที่ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบจะทำให้ค่าของแรงดันที่ได้มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจนในกรณีที่รอยบกพร่องมีความกว้างและความลึกมาก แต่รอย บกพร่องที่มีความกว้างไม่มากถึงแม้ว่าความลึกจะทะลุชิ้นงานก็ตามค่าของแรงดันที่ได้นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่ชัดเจน ส่วนในการตรวจสอบระดับความหนาของชิ้นงานทดสอบ ในโครงการนี้เราได้ติดตั้งตัว ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กไว้ที่ระดับความสูงคงที่ เมื่อเราตรวจสอบที่ระดับความหนาต่าง ๆ กัน เมื่อเราวัดที่ระดับความหนาของชิ้นทดสอบที่มีค่าของความหนามากที่สุดค่าของแรงดันที่ออกมาจะมีค่าสูงที่สุด และเมื่อเราลดระดับของความหนาของโลหะลดลงเรื่อย ๆ ก็จะทำให้แรงดันที่ออกมานั้นมีค่าลดลงด้วย และเมื่อเรานำแรงดันที่ออกมาของโลหะที่มีความหนาสูงสุดและระดับความหนาน้อยที่สุดมาเปรียบเทียบกับจะทราบว่าระดับของแรงดันที่ออกมาจะ

แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจากการทดลองนี้มีความเชื่อถือได้และเป็นไปตามหลักการที่ได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสนอไว้ แต่ก็ยังพบว่าโครงการที่ได้พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่ และเพื่อให้เห็นคุณลักษณะของเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กดังกล่าวข้างต้น จึงขอสรุปคุณลักษณะที่สำคัญไว้ดังนี้

1. สามารถหารอยบกพร่องของโลหะเหล็กได้
2. สามารถบอกความแตกต่างของความหนาของโลหะเหล็กได้
3. สามารถแสดงผลบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ได้
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานวัดความหนาของโลหะเหล็กที่ซับซ้อนขึ้นต่อไปได้

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

การจัดทำเครื่องวัดรอยบกพร่องและความหนาของโลหะเหล็ก ในปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พบปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

ด้านฮาร์ดแวร์ ไม่สามารถที่จะหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่นำมาใช้เป็น ตัวตรวจจับได้ละเอียดมากพอ การเคลื่อนที่ของ พลอตเตอร์ ยังมีการสั่นสะเทือนอยู่ และไม่สามารถหา คู่มือของ พลอตเตอร์ นำมาใช้ได้เพราะ พลอตเตอร์ ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นรุ่นเก่า ในการตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะเหล็กไม่สามารถที่จะบอกขนาดของรอยบกพร่องได้ และในการตรวจสอบความหนาของโลหะไม่สามารถที่จะระบุความหนาที่แน่นอนได้

ด้านซอฟต์แวร์ ต้องศึกษาโปรแกรมภาษาซี ตั้งแต่พื้นฐานทั้งหมด เพราะผู้จัดทำไม่มีความรู้เกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมมาก่อน คำสั่งที่ใช้ในการสั่งควบคุมการทำงานของ พลอตเตอร์

ส่วนของการทำปฏิยานิพนธ์ ข้อมูลที่จะนำมาพิมพ์ปฏิยานิพนธ์ส่วนใหญ่เป็นภาษาต่างประเทศจึงทำให้ลำบากในการเรียบเรียงสำนวน การจัดพิมพ์ปฏิยานิพนธ์ การจัดพิมพ์ปฏิยานิพนธ์มีความล่าช้าเนื่องจากการพิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์ไม่มีความชำนาญ และโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ประกอบ เช่น โปรแกรมที่ใช้ในการวาดรูปไม่เคยศึกษามาก่อน ทำให้เสียเวลาในการศึกษาและไม่มีความชำนาญ

5.3 แนวทางแก้ไข

ทำการหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจาก Internet และหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบโดยวิธีการที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก และนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน และสอบถามการใช้งานของ พลอตเตอร์ จากผู้ที่เคยใช้ พลอตเตอร์ รุ่นดังกล่าว ส่วนในด้านซอฟต์แวร์ศึกษาภาษาซีได้ไม่ยากนักเพราะมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาษาแอสแซมบลี และหาข้อมูลเกี่ยวกับ

“HPGL” เพื่อที่จะนำคำสั่งมาใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุม พลอตเตอร์ ด้านการเขียนปฏิยานิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิพนธ์พยายามแปลและจัดเรียบเรียงสำนวนให้ง่ายต่อการเข้าใจให้มากที่สุด ด้านการจัดพิมพ์
 ปริญญานิพนธ์ ศึกษาการใช้โปรแกรม “Vision, Microsoft Word, Autocad, Protel PCB”

5.4 แนวทางในการพัฒนา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้พยายามทำให้เครื่องวัดรอยบกพร่องของโลหะเหล็ก
 มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ด้วยระยะเวลาและงบประมาณที่มีอยู่จำกัด ประกอบกับ
 ความรู้และประสบการณ์ของผู้จัดทำในการทำงานยังไม่มากเพียงพอ จึงทำให้เครื่องยังมีข้อจำกัด
 และสมควรที่จะได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นได้อีกดังต่อไปนี้

1. ควรเพิ่มการ Caribrate ให้มีความละเอียดและมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น
2. ควรปรับปรุงให้ในการทดสอบมีการเคลื่อนชิ้นงานแทนที่จะเป็นการเคลื่อนตัว
 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก
3. ควรปรับปรุงให้สามารถตรวจสอบหารอยบกพร่องที่อยู่ในเนื้อโลหะเหล็กได้
4. ควรปรับปรุงให้สามารถบอกขนาดหรือรูปร่างของรอยตำหนิได้
5. การวัดความหนาควรปรับปรุงให้สามารถระบุความหนาได้
6. ซอฟต์แวร์ควรที่จะให้มีฟังก์ชันในการทำงานเพิ่มขึ้น

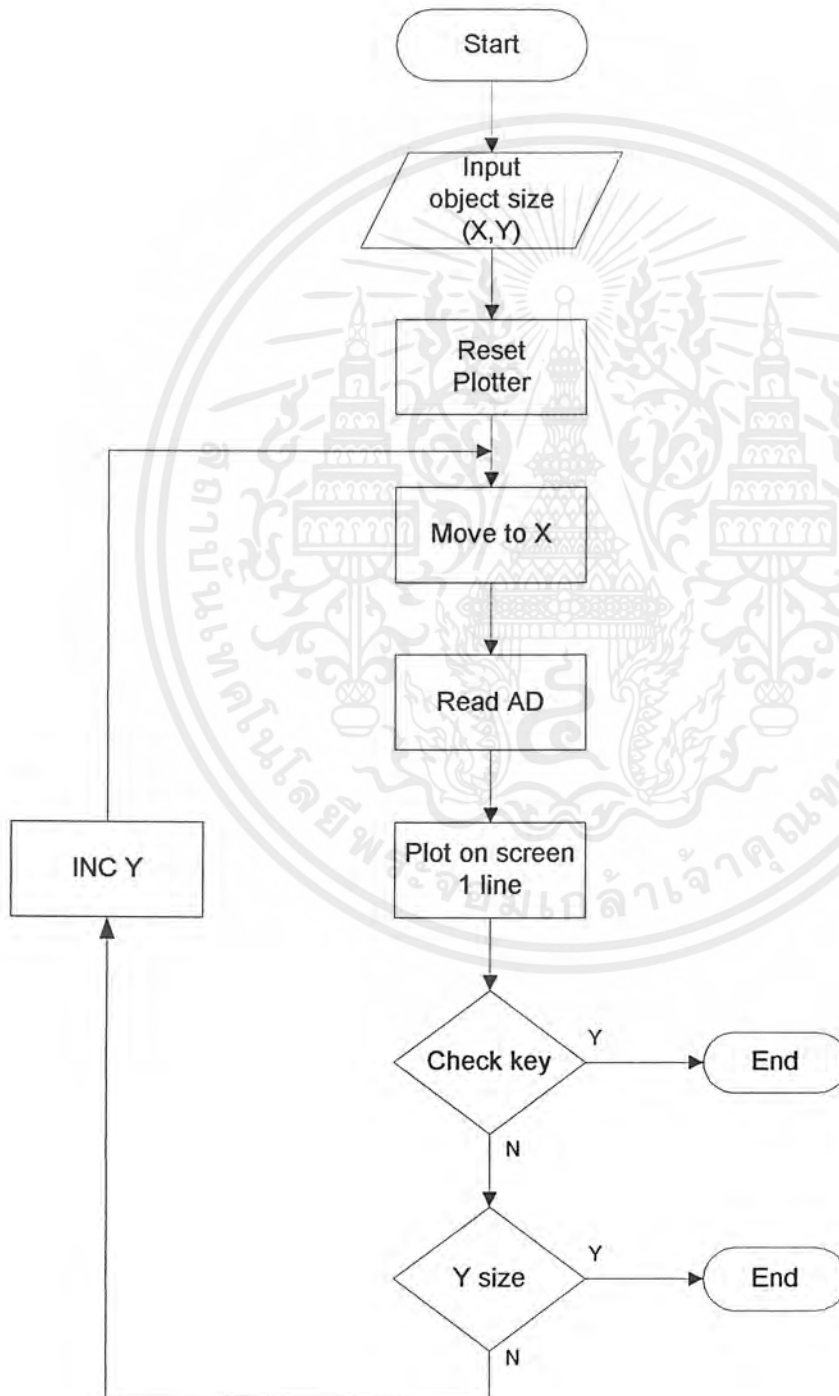


ภาคผนวก ก

ผังการทำงานและโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flow Chart



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจสอบโลหะโดยใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <graph.h>

char buf[256];
int idx=0, idx1=0, irq, base=0x300, x, y, f, linecount, xpost, ypost;
int xsize, ysize;
unsigned int d1[2000], d2[2000], counter;

void (__interrupt __far *old_intvect)();

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    _outp (base+15, 0xb4);
    _outp (base+14, cl1l);
    _outp (base+14, cl1h);
    _outp (base+15, 0x74);
    _outp (base+13, cl2l);
    _outp (base+13, cl2h);
}

void __interrupt __far int_routine ()
{
    short  dmsb, dlsb;

    dmsb = _inp(base+1);
    dlsb = _inp(base+0);

    if (idx<1000)
    {
        d1[idx]=(dmsb<<4)+(dlsb>>4);
        idx++;
    }

    _outp (base+2, 1);          /* Select CH */

    if (irq>8)
        _outp (0xa0, 0x20);
        _outp (0x20, 0x20);

    counter++;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

main()
{
    int  num, old1, old2, a, b, c, d;
    int  clockrate;

    system ("cls");
    printf ("\n\n\n\n\n\n\n\n\n\n\t\tEnter X-Size (0mm-320mm) : ");scanf ("%d", &xsize);
    printf ("\t\tEnter Y-Size (0mm-500mm) : ");scanf ("%d", &ysize);
    xsize*=40;
    ysize*=40;

    plot ("SP1;LT-1;VS5;PA;");
    plot ("Pd0,0;");

    irq=5;
    clockrate=50;          /* Determine Sampling rate */
    idx=idx1=0;

    _outp (base+15, 0x34);
    _outp (base+12, 0x36);
    _outp (base+12, 0x0);

    set_clock (clockrate);

    if (irq<8)
        num=irq+8;
    else
        num=irq+0x68;

    old_intvect= dos_getvect (num);

```



```

_dos_setvect (num, int_routine);

old1=_inp (0x21);
old2=_inp (0xa1);
if (irq<8)
    _outp (0x21, old1 & !(1 < irq));
else
{
    _outp (0x21, old1 & !(1 < 2));
    _outp (0xa1, old2 & !(1 < (irq-8)));
}

_outp (base+2, 0);
_outp (base+3, 0x05);

_setvideomode (_MAXCOLORMODE);
_setcolor (12);
xpost=200;
ypost=10;
_moveto (xpost, ypost);
x=0;
b=210;
f=0;
printf ("Please wait until ploter set position to start : ");
getch ();
_clearscreen (_GCLEARSCREEN);
counter=0;
linecount=0;
c=0;
d=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while (!kbhit ())
{
    if (f==0)
    {
        sprintf (buf, "PD%d,%d;", x,xsize);
        plot (buf);
        idx=0;
        idx1=0;
        f=1;
    }
    if (idx>=(xsize/40))
    {
        for (d=0; d<400; d++)
            d2[d]=d1[d];
        xpost-=10;
        sprintf (buf, "PD%d,0;",x);
        plot (buf);
        x+=200;
        sprintf (buf, "PD%d,0;",x);
        plot (buf);
        counter=0;
        while (counter<((xsize/40)+50));
        idx1=0;
        idx=0;
        f=0;
        linecount++;
        c=0;
        delay (10000);
        _moveto (xpost, (b-d1[0]/16)+ypost);
        b+=10;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    if (idx1<idx)
    {
        for (a=idx1; a<idx; a++,c++)
        {
            _lineto (c+xpost, (b-d1[a]/16)+c);
            if (linecount!=0)
            {
                _lineto (c+xpost+10, (b-10-d2[a]/16)+c);
                _lineto (c+xpost, (b-d1[a]/16)+c);
            }
        }
        idx1=idx;
    }
    if (x>ysize)
        break;
}

plot ("Pd0,0;");
_outp (base+3, 0x00);
_dos_setvect (num, old_intvect);
_outp (0x21, old1);
_outp (0xa1, old2);
getch ();
getch ();
_setvideomode (3);
}

```

```

/*****

```

```

/* Send data to ploter */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****

```

```

plot(char *xx)

```

```

{

```

```

    int    z;

```

```

    z=0;

```

```

    for (;;)

```

```

    {

```

```

        if (xx[z]==0)

```

```

            break;

```

```

        _bios_printer(0,0,xx[z]);

```

```

        z++;

```

```

    }

```

```

}

```

```

/*****

```

```

/* Delay function */

```

```

/*****

```

```

delay(int count)

```

```

{

```

```

    int  a;

```

```

    for (a=0; a<count; a++);

```

```

}

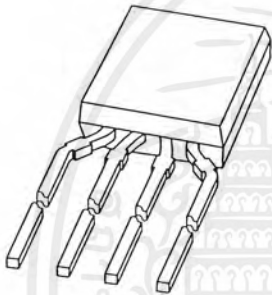
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATA SHEET



KMZ10B Magnetic field sensor

Product specification

1998 Mar 31

Supersedes data of 1996 Nov 08

File under Discrete Semiconductors, SC17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึง
Philips Semiconductors



PHILIPS

Magnetic field sensor

KMZ10B

DESCRIPTION

The KMZ10B is a sensitive magnetic field sensor, employing the magnetoresistive effect of thin-film permalloy. Its properties enable this sensor to be used in a wide range of applications for current and field measurement, revolution counters, angular or linear position measurement, proximity detectors, etc.

PINNING

PIN	SYMBOL	DESCRIPTION
1	+V _O	output voltage
2	GND	ground
3	-V _O	output voltage
4	V _{CC}	supply voltage

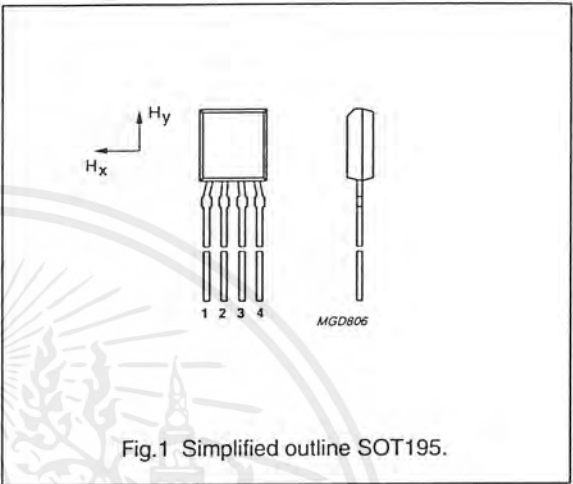


Fig.1 Simplified outline SOT195.

QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
V _{CC}	bridge supply voltage	–	5	12	V
H _y	magnetic field strength	–2	–	+2	kA/m
H _x	auxiliary field	–	3	–	kA/m
S	sensitivity	–	4	–	$\frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$
R _{bridge}	bridge resistance	1.6	–	2.6	kΩ
V _{offset}	offset voltage	–1.5	–	+1.5	mV/V

CIRCUIT DIAGRAM

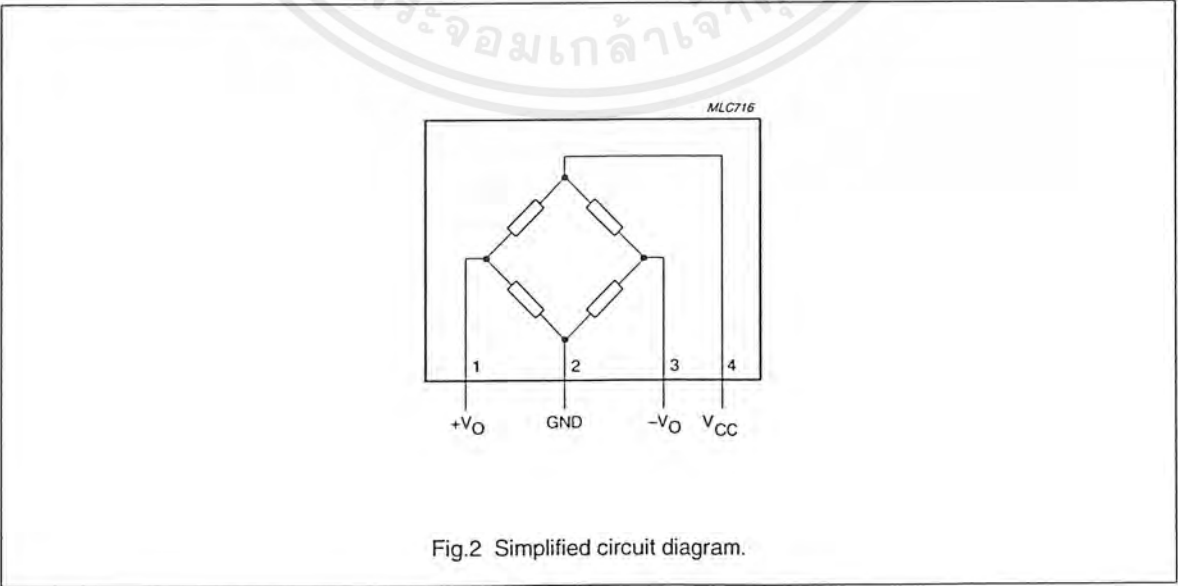


Fig.2 Simplified circuit diagram.

Magnetic field sensor

KMZ10B

LIMITING VALUES

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

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{CC}	bridge supply voltage		–	12	V
P _{tot}	total power dissipation	up to T _{amb} = 130 °C	–	120	mW
T _{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T _{bridge}	bridge operating temperature		–40	+150	°C

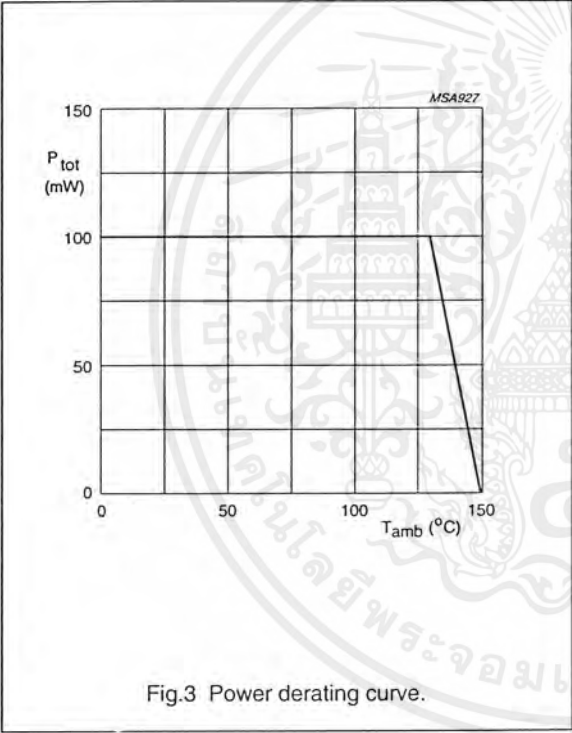


Fig.3 Power derating curve.

Magnetic field sensor

KMZ10B

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
R _{th ja}	thermal resistance from junction to ambient	180	K/W

CHARACTERISTICS

T_{amb} = 25 °C; H_x = 3 kA/m; note 1.

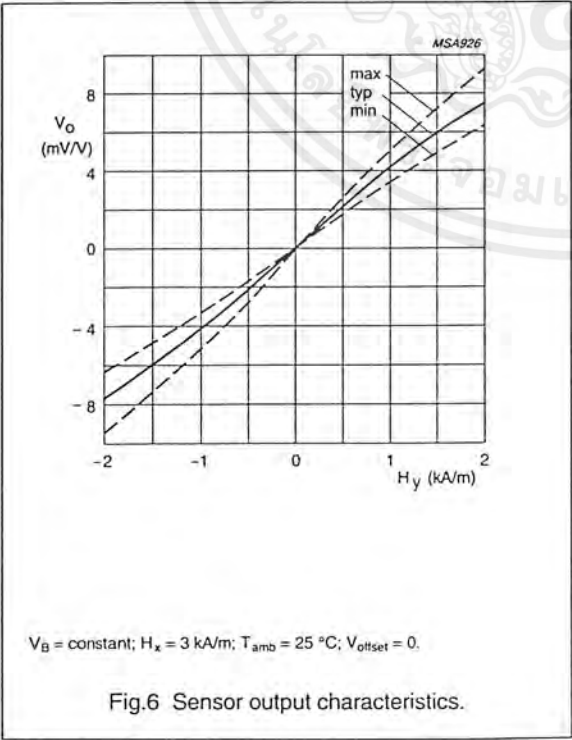
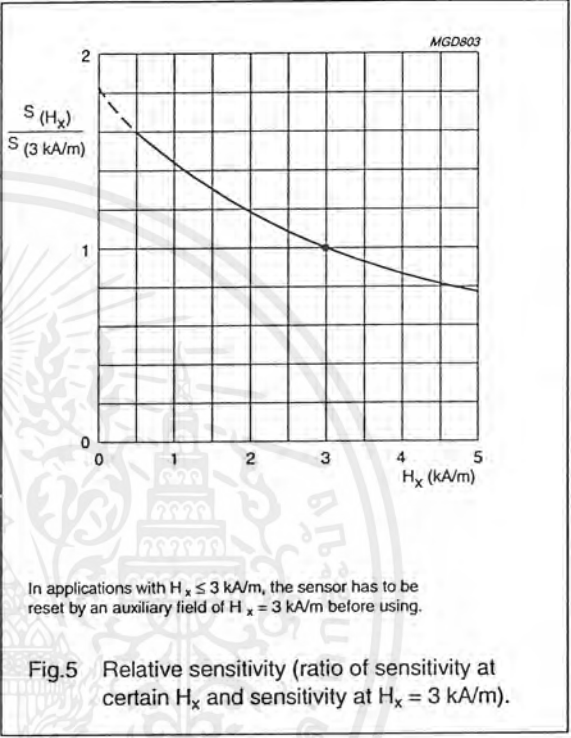
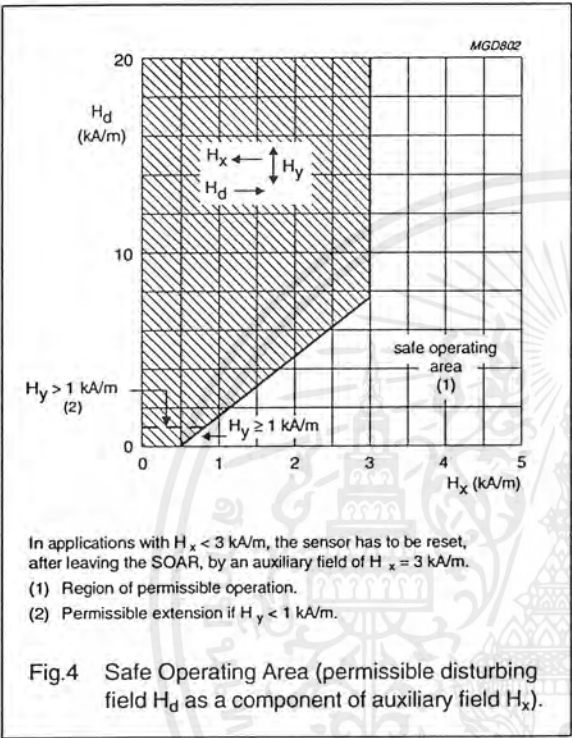
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
V _{CC}	bridge supply voltage		–	5	–	V
H _y	magnetic field strength		–2	–	+2	kA/m
S	sensitivity	open circuit, notes 2 and 3	3.2	–	4.8	$\frac{\text{mV/V}}{\text{kA/m}}$
TCV _O	temperature coefficient of output voltage	V _{CC} = 5 V; T _j = –25 to +125 °C	–	–0.4	–	%/K
		I _B = 3 mA; T _j = –25 to +125 °C	–	–0.1	–	%/K
R _{bridge}	bridge resistance		1.6	–	2.6	kΩ
TCR _{bridge}	temperature coefficient of bridge resistance	T _{bridge} = –25 to +125 °C	–	0.3	–	%/K
V _{offset}	offset voltage		–1.5	–	+1.5	mV/V
TCV _{offset}	offset voltage drift	T _j = –25 to +125 °C	–3	–	+3	$\frac{\mu\text{V/V}}{\text{K}}$
FL	linearity deviation of output voltage	H _y = 0 to ±1 kA/m	–	–	±0.5	%·FS
		H _y = 0 to ±1.6 kA/m	–	–	±1.7	%·FS
		H _y = 0 to ±2 kA/m	–	–	±2	%·FS
FH	hysteresis of output voltage		–	–	0.5	%·FS
f	operating frequency		0	–	1	MHz

Notes

1. In applications with H_x < 3 kA/m the sensor has to be reset before first operation by application of an auxiliary field H_x = 3 kA/m.
2. No disturbing field (H_d) allowed; for stable operation under disturbing conditions see Fig.4 (SOAR) and see Fig.5 for decrease of sensitivity.
3.
$$S = \frac{(V_O \text{ at } H_y = 1.6 \text{ kA/m}) - (V_O \text{ at } H_y = 0)}{1.6 \times V_{CC}}$$

Magnetic field sensor

KMZ10B



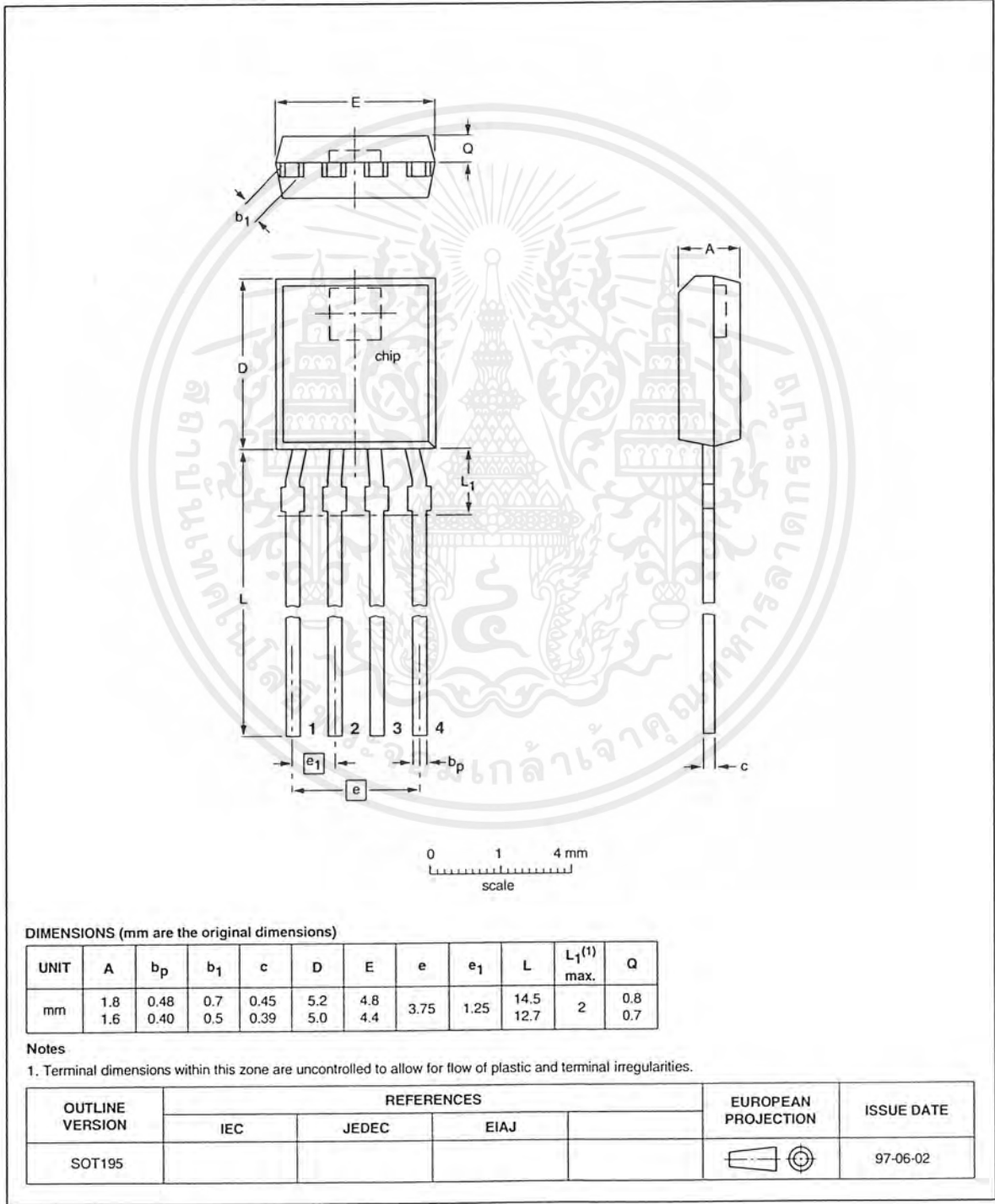
Magnetic field sensor

KMZ10B

PACKAGE OUTLINE

Plastic single-ended flat package; 4 in-line leads

SOT195



Magnetic field sensor

KMZ10B

DEFINITIONS

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

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

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

Philips Semiconductors – a worldwide company

Argentina: see South America

Australia: 34 Waterloo Road, NORTH RYDE, NSW 2113.
Tel. +61 2 9805 4455, Fax. +61 2 9805 4466

Austria: Computerstr. 6, A-1101 WIEN, P.O. Box 213, Tel. +43 160 1010.
Fax. +43 160 101 1210

Belarus: Hotel Minsk Business Center, Bld. 3, r. 1211, Volodarski Str. 6.
220050 MINSK, Tel. +375 172 200 733, Fax. +375 172 200 773

Belgium: see The Netherlands

Brazil: see South America

Bulgaria: Philips Bulgaria Ltd., Energoproject, 15th floor,
51 James Bourchier Blvd., 1407 SOFIA,
Tel. +359 2 689 211, Fax. +359 2 689 102

Canada: PHILIPS SEMICONDUCTORS/COMPONENTS,
Tel. +1 800 234 7381

China/Hong Kong: 501 Hong Kong Industrial Technology Centre,
72 Tai Chee Avenue, Kowloon Tong, HONG KONG,
Tel. +852 2319 7888, Fax. +852 2319 7700

Colombia: see South America

Czech Republic: see Austria

Denmark: Prags Boulevard 80, PB 1919, DK-2300 COPENHAGEN S,
Tel. +45 32 88 2636, Fax. +45 31 57 0044

Finland: Sinikalliontie 3, FIN-02630 ESPOO,
Tel. +358 9 615800, Fax. +358 9 61580920

France: 51 Rue Carnot, BP317, 92156 SURESNES Cedex,
Tel. +33 1 40 99 6161, Fax. +33 1 40 99 6427

Germany: Hammerbrookstraße 69, D-20097 HAMBURG,
Tel. +49 40 23 53 60, Fax. +49 40 23 536 300

Greece: No. 15, 25th March Street, GR 17778 TAVROS/ATHENS,
Tel. +30 1 4894 339/239, Fax. +30 1 4814 240

Hungary: see Austria

India: Philips INDIA Ltd, Band Box Building, 2nd floor,
254-D, Dr. Annie Besant Road, Worli, MUMBAI 400 025,
Tel. +91 22 493 8541, Fax. +91 22 493 0966

Indonesia: see Singapore

Ireland: Newstead, Clonskeagh, DUBLIN 14,
Tel. +353 1 7640 000, Fax. +353 1 7640 200

Israel: RAPAC Electronics, 7 Kehilat Saloniki St, PO Box 18053,
TEL AVIV 61180, Tel. +972 3 645 0444, Fax. +972 3 649 1007

Italy: PHILIPS SEMICONDUCTORS, Piazza IV Novembre 3,
20124 MILANO, Tel. +39 2 6752 2531, Fax. +39 2 6752 2557

Japan: Philips Bldg 13-37, Kohnan 2-chome, Minato-ku, TOKYO 108,
Tel. +81 3 3740 5130, Fax. +81 3 3740 5077

Korea: Philips House, 260-199 Itaewon-dong, Yongsan-ku, SEOUL,
Tel. +82 2 709 1412, Fax. +82 2 709 1415

Malaysia: No. 76 Jalan Universiti, 46200 PETALING JAYA, SELANGOR,
Tel. +60 3 750 5214, Fax. +60 3 757 4880

Mexico: 5900 Gateway East, Suite 200, EL PASO, TEXAS 79905,
Tel. +9-5 800 234 7381

Middle East: see Italy

Netherlands: Postbus 90050, 5600 PB EINDHOVEN, Bldg. VB,
Tel. +31 40 27 82785, Fax. +31 40 27 88399

New Zealand: 2 Wagener Place, C.P.O. Box 1041, AUCKLAND,
Tel. +64 9 849 4160, Fax. +64 9 849 7811

Norway: Box 1, Manglerud 0612, OSLO,
Tel. +47 22 74 8000, Fax. +47 22 74 8341

Philippines: Philips Semiconductors Philippines Inc.,
106 Valero St. Salcedo Village, P.O. Box 2108 MCC, MAKATI,
Metro MANILA, Tel. +63 2 816 6380, Fax. +63 2 817 3474

Poland: Ul. Lukiska 10, PL 04-123 WARSZAWA,
Tel. +48 22 612 2831, Fax. +48 22 612 2327

Portugal: see Spain

Romania: see Italy

Russia: Philips Russia, Ul. Usatcheva 35A, 119048 MOSCOW,
Tel. +7 095 755 6918, Fax. +7 095 755 6919

Singapore: Lorong 1, Toa Payoh, SINGAPORE 1231,
Tel. +65 350 2538, Fax. +65 251 6500

Slovakia: see Austria

Slovenia: see Italy

South Africa: S.A. PHILIPS Pty Ltd., 195-215 Main Road Martindale,
2092 JOHANNESBURG, P.O. Box 7430 Johannesburg 2000,
Tel. +27 11 470 5911, Fax. +27 11 470 5494

South America: Al. Vicente Pinzon, 173, 6th floor,
04547-130 SÃO PAULO, SP, Brazil,
Tel. +55 11 821 2333, Fax. +55 11 821 2382

Spain: Balmes 22, 08007 BARCELONA,
Tel. +34 3 301 6312, Fax. +34 3 301 4107

Sweden: Kottbygatan 7, Akalla, S-16485 STOCKHOLM,
Tel. +46 8 5985 2000, Fax. +46 8 5985 2745

Switzerland: Allmendstrasse 140, CH-8027 ZÜRICH,
Tel. +41 1 488 2741 Fax. +41 1 488 3263

Taiwan: Philips Semiconductors, 6F, No. 96, Chien Kuo N. Rd., Sec. 1,
TAIPEI, Taiwan Tel. +886 2 2134 2865, Fax. +886 2 2134 2874

Thailand: PHILIPS ELECTRONICS (THAILAND) Ltd.,
209/2 Sanpavuth-Bangna Road Prakanong, BANGKOK 10260,
Tel. +66 2 745 4090, Fax. +66 2 398 0793

Turkey: Talatpasa Cad. No. 5, 80640 GÜLTEPE/ISTANBUL,
Tel. +90 212 279 2770, Fax. +90 212 282 6707

Ukraine: PHILIPS UKRAINE, 4 Patrice Lumumba str., Building B, Floor 7,
252042 KIEV, Tel. +380 44 264 2776, Fax. +380 44 268 0461

United Kingdom: Philips Semiconductors Ltd., 276 Bath Road, Hayes,
MIDDLESEX UB3 5BX, Tel. +44 181 730 5000, Fax. +44 181 754 8421

United States: 811 East Arques Avenue, SUNNYVALE, CA 94088-3409,
Tel. +1 800 234 7381

Uruguay: see South America

Vietnam: see Singapore

Yugoslavia: PHILIPS, Trg N. Pasica 5/v, 11000 BEOGRAD,
Tel. +381 11 625 344, Fax. +381 11 635 777

For all other countries apply to: Philips Semiconductors,
International Marketing & Sales Communications, Building BE-p, P.O. Box 218,
5600 MD EINDHOVEN, The Netherlands, Fax. +31 40 27 24825

Internet: <http://www.semiconductors.philips.com>

© Philips Electronics N.V. 1998

SCA58

All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.

The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent- or other industrial or intellectual property rights.

Printed in The Netherlands

115106/00/03/pp8

Date of release: 1998 Mar 31

Document order number: 9397 750 03639

Let's make things better.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึง

Philips
Semiconductors



PHILIPS



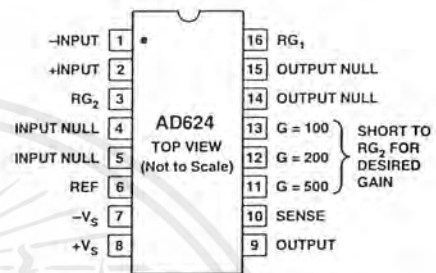
Precision Instrumentation Amplifier

AD624

FEATURES

Low Noise: 0.2 μV p-p 0.1 Hz to 10 Hz
 Low Gain TC: 5 ppm max ($G = 1$)
 Low Nonlinearity: 0.001% max ($G = 1$ to 200)
 High CMRR: 130 dB min ($G = 500$ to 1000)
 Low Input Offset Voltage: 25 μV , max
 Low Input Offset Voltage Drift: 0.25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max
 Gain Bandwidth Product: 25 MHz
 Pin Programmable Gains of 1, 100, 200, 500, 1000
 No External Components Required
 Internally Compensated

CONNECTION DIAGRAM



FOR GAINS OF 1000 SHORT RG_1 TO PIN 12
 AND PINS 11 AND 13 TO RG_2

PRODUCT DESCRIPTION

The AD624 is a high precision, low noise, instrumentation amplifier designed primarily for use with low level transducers, including load cells, strain gauges and pressure transducers. An outstanding combination of low noise, high gain accuracy, low gain temperature coefficient and high linearity make the AD624 ideal for use in high resolution data acquisition systems.

The AD624C has an input offset voltage drift of less than 0.25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, output offset voltage drift of less than 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMRR above 80 dB at unity gain (130 dB at $G = 500$) and a maximum nonlinearity of 0.001% at $G = 1$. In addition to these outstanding dc specifications, the AD624 exhibits superior ac performance as well. A 25 MHz gain bandwidth product, 5 V/ μs slew rate and 15 μs settling time permit the use of the AD624 in high speed data acquisition applications.

The AD624 does not need any external components for pre-trimmed gains of 1, 100, 200, 500 and 1000. Additional gains such as 250 and 333 can be programmed within one percent accuracy with external jumpers. A single external resistor can also be used to set the 624's gain to any value in the range of 1 to 10,000.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD624 offers outstanding noise performance. Input noise is typically less than 4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz.
2. The AD624 is a functionally complete instrumentation amplifier. Pin programmable gains of 1, 100, 200, 500 and 1000 are provided on the chip. Other gains are achieved through the use of a single external resistor.
3. The offset voltage, offset voltage drift, gain accuracy and gain temperature coefficients are guaranteed for all pretrimmed gains.
4. The AD624 provides totally independent input and output offset nulling terminals for high precision applications. This minimizes the effect of offset voltage in gain ranging applications.
5. A sense terminal is provided to enable the user to minimize the errors induced through long leads. A reference terminal is also provided to permit level shifting at the output.

REV. B

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.

© Analog Devices, Inc., 1996

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD624—SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

Model	AD624A			AD624B			AD624C			AD624S			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN													
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			
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	%
$G = 100$			± 0.25			± 0.15			± 0.1			± 0.25	%
$G = 200, 500$			± 0.5			± 0.35			± 0.25			± 0.5	%
Nonlinearity													
$G = 1$			± 0.005			± 0.003			± 0.001			± 0.005	%
$G = 100, 200$			± 0.005			± 0.003			± 0.001			± 0.005	%
$G = 500$			± 0.005			± 0.005			± 0.005			± 0.005	%
Gain vs. Temperature													
$G = 1$			5			5			5			5	ppm/ $^\circ\text{C}$
$G = 100, 200$			10			10			10			10	ppm/ $^\circ\text{C}$
$G = 500$			25			15			15			15	ppm/ $^\circ\text{C}$
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)													
Input Offset Voltage			200			75			25			75	μV
vs. Temperature			2			0.5			0.25			2.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset Voltage			5			3			2			3	mV
vs. Temperature			50			25			10			50	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply													
$G = 1$	70			75			80			75			dB
$G = 100, 200$	95			105			110			105			dB
$G = 500$	100			110			115			110			dB
INPUT CURRENT													
Input Bias Current			± 50			± 25			± 15			± 50	nA
vs. Temperature			± 50			± 50			± 50			± 50	pA/ $^\circ\text{C}$
Input Offset Current			± 35			± 15			± 10			± 35	nA
vs. Temperature			± 20			± 20			± 20			± 20	pA/ $^\circ\text{C}$
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 ¹													V
Max Differ. Input Linear (V_{DL})	± 10			± 10			± 10			± 10			V
Max Common-Mode Linear (V_{CLM})	$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D \right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D \right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D \right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D \right)$			V
Common-Mode Rejection dc to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance													dB
$G = 1$	70			75			80			70			dB
$G = 100, 200$	100			105			110			100			dB
$G = 500$	110			120			130			110			dB
OUTPUT RATING													
V_{OUT} , $R_L = 2\text{ k}\Omega$		± 10			± 10			± 10			± 10		V
DYNAMIC RESPONSE													
Small Signal -3 dB													
$G = 1$		1			1			1			1		MHz
$G = 100$		150			150			150			150		kHz
$G = 200$		100			100			100			100		kHz
$G = 500$		50			50			50			50		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%, 20 V Step													
$G = 1$ to 200		15			15			15			15		μs
$G = 500$		35			35			35			35		μs
$G = 1000$		75			75			75			75		μs
NOISE													
Voltage Noise, 1 kHz													
R.T.I.		4			4			4			4		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
R.T.O.		75			75			75			75		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
R.T.I., 0.1 Hz to 10 Hz													
$G = 1$		10			10			10			10		$\mu\text{V p-p}$
$G = 100$		0.3			0.3			0.3			0.3		$\mu\text{V p-p}$
$G = 200, 500, 1000$		0.2			0.2			0.2			0.2		$\mu\text{V p-p}$
Current Noise													
0.1 Hz to 10 Hz		60			60			60			60		pA p-p
SENSE INPUT													
R_{IN}	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12	k Ω
I_{IN}		30			30			30			30		μA
Voltage Range	± 10			± 10			± 10			± 10			V
Gain to Output													%

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ REV. B

AD624–Typical Characteristics

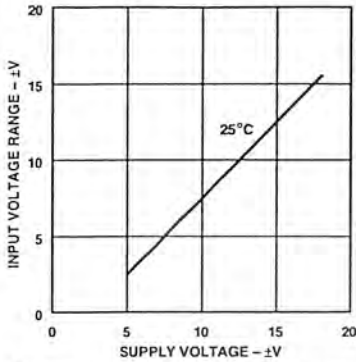


Figure 1. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, $G = 1$

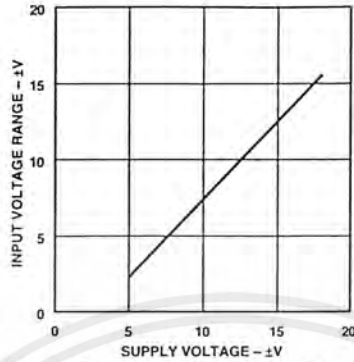


Figure 2. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

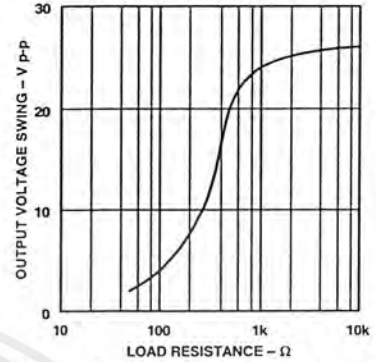


Figure 3. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

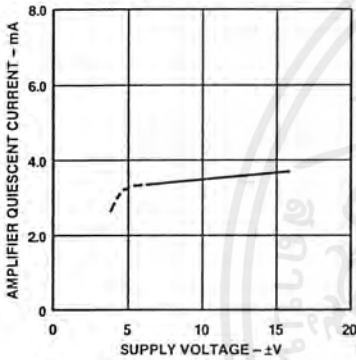


Figure 4. Quiescent Current vs. Supply Voltage

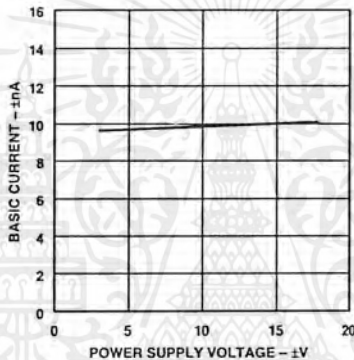


Figure 5. Input Bias Current vs. Supply Voltage

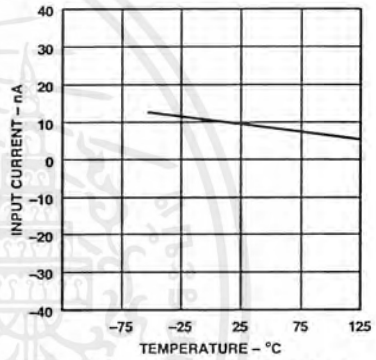


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

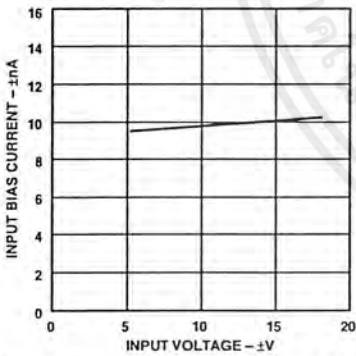


Figure 7. Input Bias Current vs. CMV

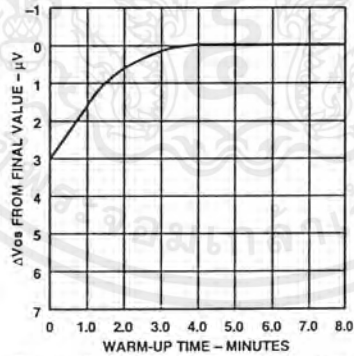


Figure 8. Offset Voltage, RTI, Turn On Drift

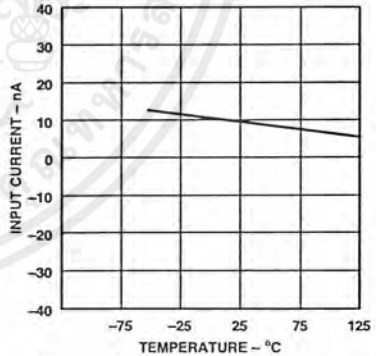


Figure 9. Gain vs. Frequency

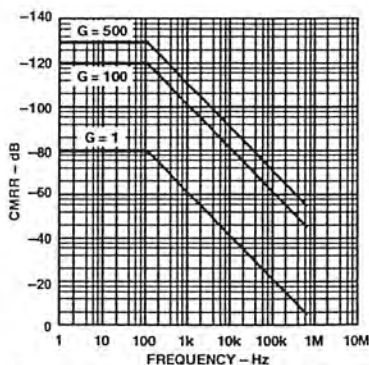


Figure 10. CMRR vs. Frequency RTI, Zero to 1k Source Imbalance

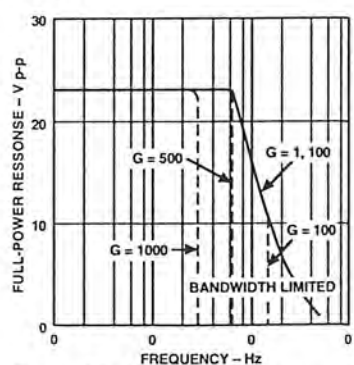


Figure 11. Large Signal Frequency Response

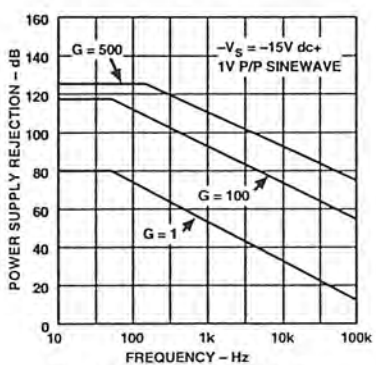


Figure 12. Positive PSRR vs. Frequency

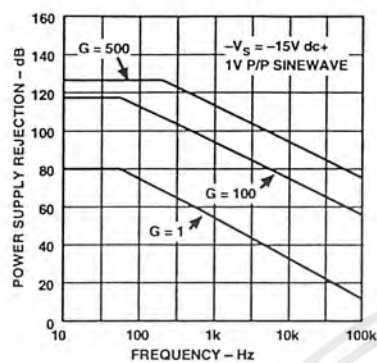


Figure 13. Negative PSRR vs. Frequency

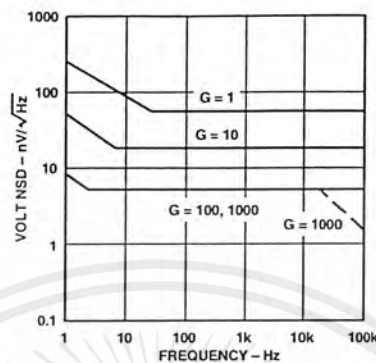


Figure 14. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

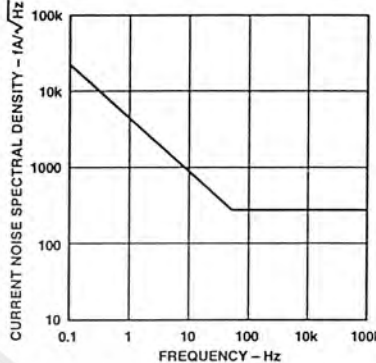


Figure 15. Input Current Noise

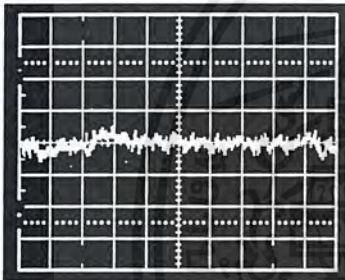


Figure 16. Low Frequency Voltage Noise, G = 1 (System Gain = 1000)

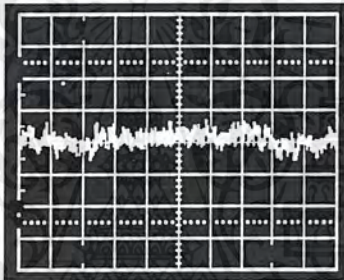


Figure 17. Low Frequency Voltage Noise, G = 1000 (System Gain = 100,000)

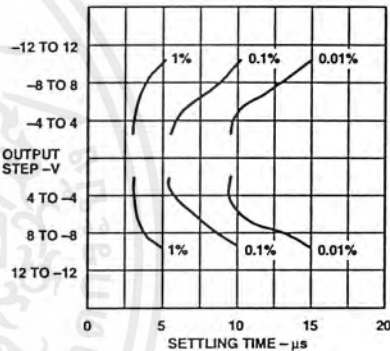


Figure 18. Settling Time, Gain = 1

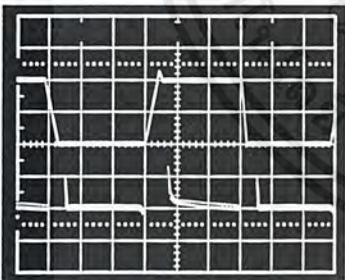


Figure 19. Large Signal Pulse Response and Settling Time, G = 1

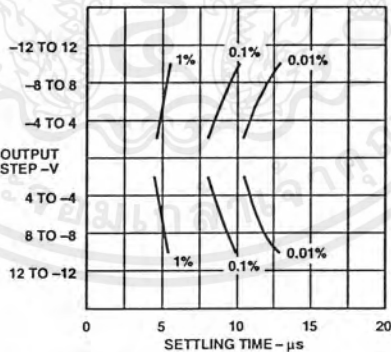


Figure 20. Settling Time Gain = 100

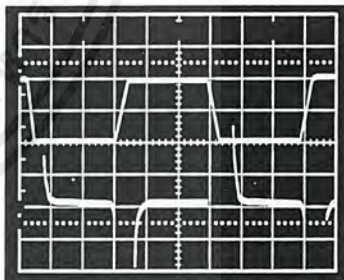


Figure 21. Large Signal Pulse Response and Settling Time, G = 100

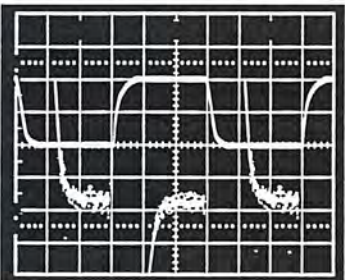


Figure 22. Range Signal Pulse Response and Settling Time, G = 500

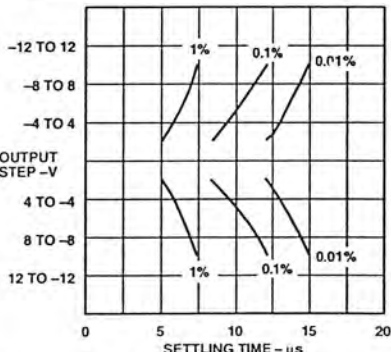


Figure 23. Settling Time Gain = 1000

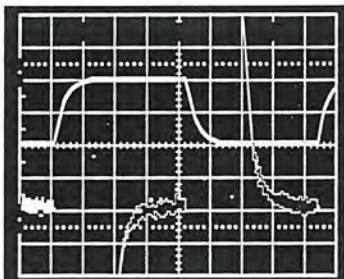


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time, G = 1000

AD624

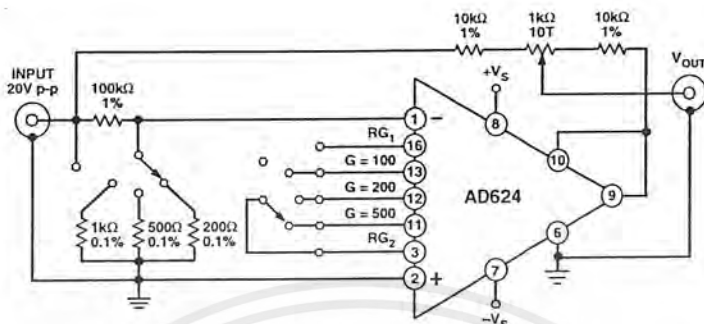


Figure 25. Settling Time Test Circuit

THEORY OF OPERATION

The AD624 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three-op-amp instrumentation amplifier. Monolithic construction and laser-wafer-trimming allow the tight matching and tracking of circuit components and the high level of performance that this circuit architecture is capable of.

A preamp section (Q1-Q4) develops the programmed gain by the use of feedback concepts. Feedback from the outputs of A1 and A2 forces the collector currents of Q1-Q4 to be constant thereby impressing the input voltage across R_G .

The gain is set by choosing the value of R_G from the equation,

Gain = $\frac{40k}{R_G} + 1$. The value of R_G also sets the transconductance of the input preamp stage increasing it asymptotically to the transconductance of the input transistors as R_G is reduced for larger gains. 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 3 ppm. Second, the gain bandwidth product which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25 MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of $4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at $G \geq 500$.

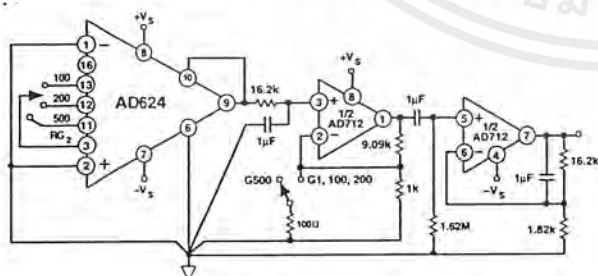


Figure 26. Noise Test Circuit

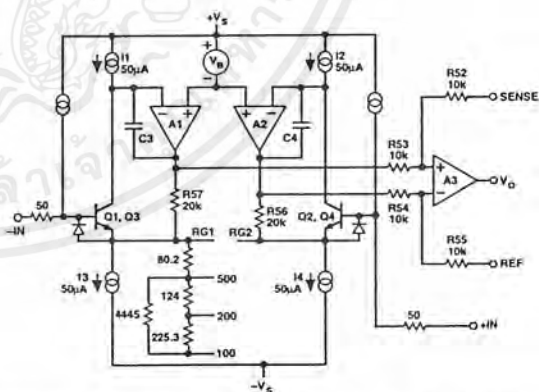
INPUT CONSIDERATIONS

Under input overload conditions the user will see $R_G + 100 \Omega$ and two diode drops ($\sim 1.2 \text{ V}$) between the plus and minus inputs, in either direction. If safe overload current under all conditions is assumed to be 10 mA, the maximum overload voltage is $\pm 2.5 \text{ V}$. While the AD624 can withstand this continuously, momentary overloads of $\pm 10 \text{ V}$ will not harm the device. On the other hand the inputs should never exceed the supply voltage.

The AD524 should be considered in applications that require protection from severe input overload. If this is not possible,

external protection resistors can be put in series with the inputs of the AD624 to augment the internal (50Ω) protection resistors. This will most seriously degrade the noise performance. For this reason the value of these resistors should be chosen to be as low as possible and still provide 10 mA of current limiting under maximum continuous overload conditions. In selecting the value of these resistors, the internal gain setting resistor and the 1.2 volt drop need to be considered. For example, to protect the device from a continuous differential overload of 20 V at a gain of 100, $1.9 \text{ k}\Omega$ of resistance is required. The internal gain resistor is 404Ω ; the internal protect resistor is 100Ω . There is a 1.2 V drop across D1 or D2 and the base-emitter junction of either Q1 and Q3 or Q2 and Q4 as shown in Figure 27, 1400Ω of external resistance would be required (700Ω in series with each input). The RTI noise in this case would be

$$\sqrt{4 KTR_{ext} + (4 nV/\sqrt{\text{Hz}})^2} = 6.2 nV/\sqrt{\text{Hz}}$$

Figure 27. Simplified Circuit of Amplifier; Gain Is Defined as $(R_{56} + R_{57})/(R_G) + 1$. For a Gain of 1, R_G Is an Open Circuit.

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 offset drift each have two components; input and output. 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:

$$\text{Total Error R.T.I.} = \text{input error} + (\text{output error/gain})$$

$$\text{Total Error R.T.O.} = (\text{Gain} \times \text{input error}) + \text{output error}$$

As an illustration, a typical AD624 might have a $+250 \mu\text{V}$ output offset and a $-50 \mu\text{V}$ input offset. In a unity gain configuration, the total output offset would be $200 \mu\text{V}$ or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be -4.75 mV or: $+250 \mu\text{V} + 100 (-50 \mu\text{V}) = -4.75 \text{ mV}$.

The AD624 provides for both input and output offset adjustment. This optimizes nulling in very high precision applications and minimizes offset voltage effects 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 AD624 includes high accuracy pretrimmed internal gain resistors. These allow for single connection programming of gains of 1, 100, 200 and 500. Additionally, a variety of gains including a pretrimmed gain of 1000 can be achieved through series and parallel combinations of the internal resistors. Table I shows the available gains and the appropriate pin connections and gain temperature coefficients.

The gain values achieved via the combination of internal resistors are extremely useful. The temperature coefficient of the gain is dependent primarily on the mismatch of the temperature coefficients of the various internal resistors. Tracking of these resistors is extremely tight resulting in the low gain TCs shown in Table I.

If the desired value of gain is not attainable using the internal resistors, a single external resistor can be used to achieve any gain between 1 and 10,000. This resistor connected between

Table I.

Gain (Nominal)	Temperature Coefficient (Nominal)	Pin 3 to Pin	Connect Pins
1	-0 ppm/°C	-	-
100	-1.5 ppm/°C	13	-
125	-5 ppm/°C	13	11 to 16
137	-5.5 ppm/°C	13	11 to 12
186.5	-6.5 ppm/°C	13	11 to 12 to 16
200	-3.5 ppm/°C	12	-
250	-5.5 ppm/°C	12	11 to 13
333	-15 ppm/°C	12	11 to 16
375	-0.5 ppm/°C	12	13 to 16
500	-10 ppm/°C	11	-
624	-5 ppm/°C	11	13 to 16
688	-1.5 ppm/°C	11	11 to 12; 13 to 16
831	+4 ppm/°C	11	16 to 12
1000	0 ppm/°C	11	16 to 12; 13 to 11

Pins 3 and 16 programs the gain according to the formula

$R_G = \frac{40k}{G-1}$ (see Figure 29). 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 R_{56} and R_{57} . Gain accuracy is determined by the tolerance of the external R_G and the absolute accuracy of the internal resistors ($\pm 20\%$). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of R_G and the temperature coefficient of the internal resistors ($-15 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ typ), and the temperature coefficient of the internal interconnections.

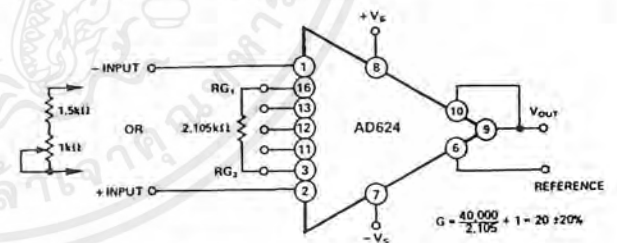


Figure 29. Operating Connections for $G = 20$

The AD624 may also be configured to provide gain in the output stage. Figure 30 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD624. The values of R_1 , R_2 and R_3 should be selected to be as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R_2 will precisely set the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R_1 and R_3 .

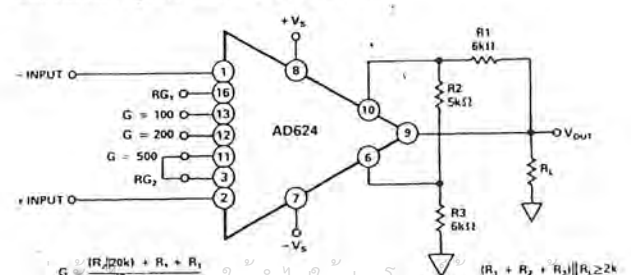


Figure 30. Gain of 2500

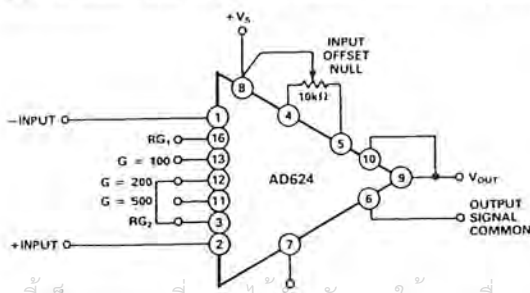


Figure 28. Operating Connections for $G = 200$

AD624

NOISE

The AD624 is designed to provide noise performance near the theoretical noise floor. This is an extremely important design criteria as the front end noise of an instrumentation amplifier is the ultimate limitation on the resolution of the data acquisition system it is being used in. There are two sources of noise in an instrument amplifier, the input noise, predominantly generated by the differential input stage, and the output noise, generated by the output amplifier. Both of these components are present at the input (and output) of the instrumentation amplifier. At the input, the input noise will appear unaltered; the output noise will be attenuated by the closed loop gain (at the output, the output noise will be unaltered; the input noise will be amplified by the closed loop gain). Those two noise sources must be root sum squared to determine the total noise level expected at the input (or output).

The low frequency (0.1 Hz to 10 Hz) voltage noise due to the output stage is 10 μV p-p, the contribution of the input stage is 0.2 μV p-p. At a gain of 10, the RTI voltage noise would be

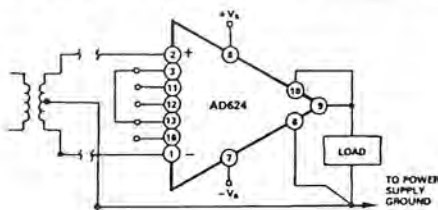
1 μV p-p, $\sqrt{\left(\frac{10}{G}\right)^2 + (0.2)^2}$. The RTO voltage noise would be

10.2 μV p-p, $\sqrt{10^2 + (0.2(G))^2}$. These calculations hold for applications using either internal or external gain resistors.

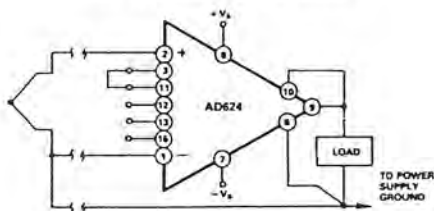
INPUT BIAS CURRENTS

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 a total error budget. The bias currents when multiplied by the source resistance imbalance appear as an additional 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 resistance.

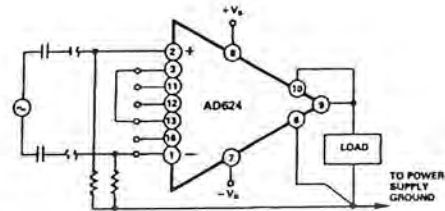
Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents will charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore,



a. Transformer Coupled



b. Thermocouple



c. AC Coupled

Figure 31. Indirect Ground Returns for Bias Currents

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. (see Figure 31).

COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed by 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 80 dB.

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 32 and 33 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.

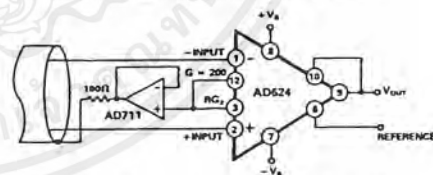


Figure 32. Shield Driver, $G \geq 100$

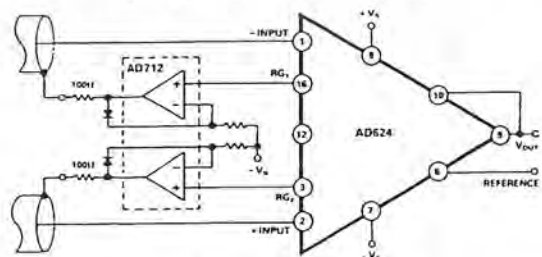


Figure 33. Differential Shield Driver

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

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 most 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 (see Figure 34).

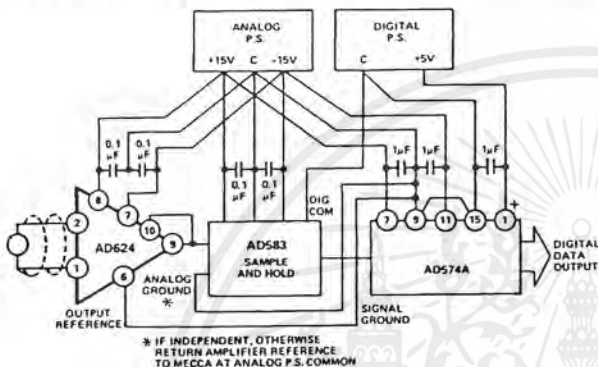


Figure 34. Basic Grounding Practice

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 $I_x R$ drops "inside the loop" and virtually eliminating this error source.

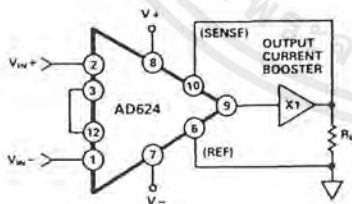


Figure 35. AD624 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 volt output swing into $2 \text{ k}\Omega$. In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 35 shows how a current booster may be connected "inside the loop" of an instrumentation amplifier to provide the required current without significantly degrading overall performance. The effects of nonlinearities, offset and gain inaccuracies of the buffer are reduced 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 $\pm 10 \text{ V}$. 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, from ground, to be shared between signal and reference offset.

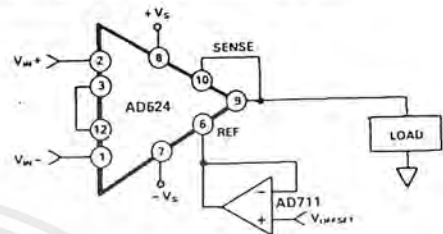


Figure 36. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

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, including those caused by PC layouts or other connection techniques, which appears between the reference pin and ground will increase the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the IA. Inadvertent thermocouple connections created in the sense and reference lines should also be avoided as they will directly affect the output offset voltage and output offset voltage drift.

In the AD624 a reference source resistance will unbalance the CMR trim by the ratio of $10 \text{ k}\Omega/R_{\text{REF}}$. For example, if the reference source impedance is 1Ω , CMR will be reduced to 80 dB ($10 \text{ k}\Omega/1 \Omega = 80 \text{ dB}$). An operational amplifier may be used to provide that low impedance reference point as shown in Figure 36. 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 37.

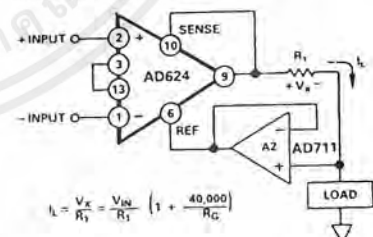


Figure 37. Voltage-to-Current Converter

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 38 shows the AD624 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

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 43 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.

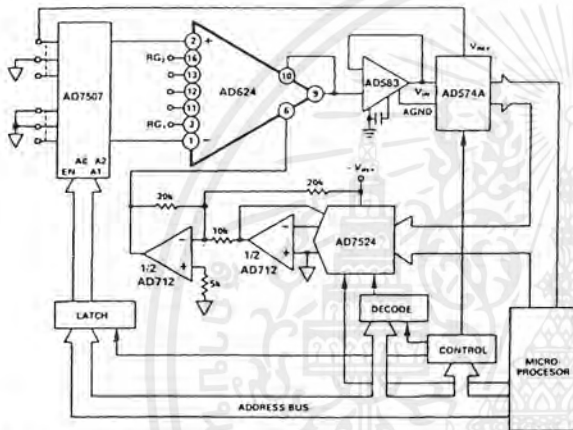


Figure 43. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

WEIGH SCALE

Figure 44 shows an example of how an AD624 can be used to condition the differential output voltage from a load cell. The 10% reference voltage adjustment range is required to accommodate the 10% transducer sensitivity tolerance. The high linearity and low noise of the AD624 make it ideal for use in applications of this type particularly where it is desirable to measure small changes in weight as opposed to the absolute value. The addition of an auto gain/auto tare cycle will enable the system to remove offsets, gain errors, and drifts making possible true 14-bit performance.

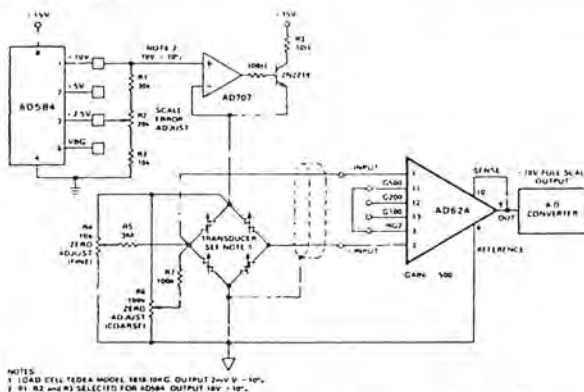


Figure 44. AD624 Weigh Scale Application

AC BRIDGE

Bridge circuits which use dc excitation are often plagued by errors caused by thermocouple effects, $1/f$ noise, dc drifts in the electronics, and line noise pickup. One way to get around these problems is to excite the bridge with an ac waveform, amplify the bridge output with an ac amplifier, and synchronously demodulate the resulting signal. The ac phase and amplitude information from the bridge is recovered as a dc signal at the output of the synchronous demodulator. The low frequency system noise, dc drifts, and demodulator noise all get mixed to the carrier frequency and can be removed by means of a low-pass filter. Dynamic response of the bridge must be traded off against the amount of attenuation required to adequately suppress these residual carrier components in the selection of the filter.

Figure 45 is an example of an ac bridge system with the AD630 used as a synchronous demodulator. The oscilloscope photograph shows the results of a 0.05% bridge imbalance caused by the 1 Meg resistor in parallel with one leg of the bridge. The top trace represents the bridge excitation, the upper middle trace is the amplified bridge output, the lower-middle trace is the output of the synchronous demodulator and the bottom trace is the filtered dc system output.

This system can easily resolve a 0.5 ppm change in bridge impedance. Such a change will produce a 6.3 mV change in the low-pass filtered dc output, well above the RTO drifts and noise.

The AC-CMRR of the AD624 decreases with the frequency of the input signal. This is due mainly to the package-pin capacitance associated with the AD624's internal gain resistors. If AC-CMRR is not sufficient for a given application, it can be trimmed by using a variable capacitor connected to the amplifier's RG_2 pin as shown in Figure 45.

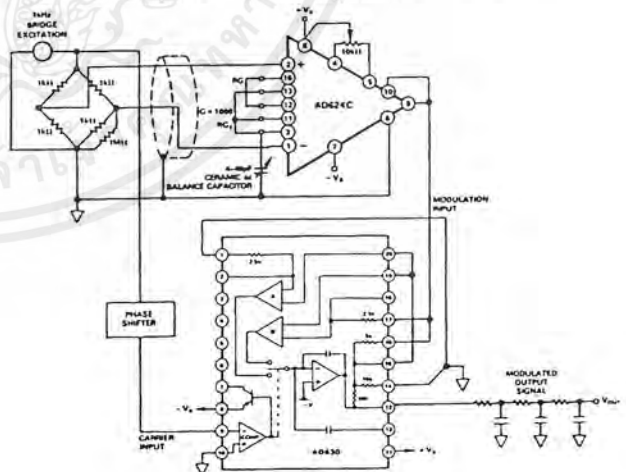


Figure 45. AC Bridge

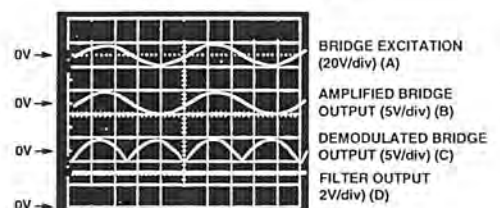


Figure 46. AC Bridge Waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก REV.B ทุกสิ่ง อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD624

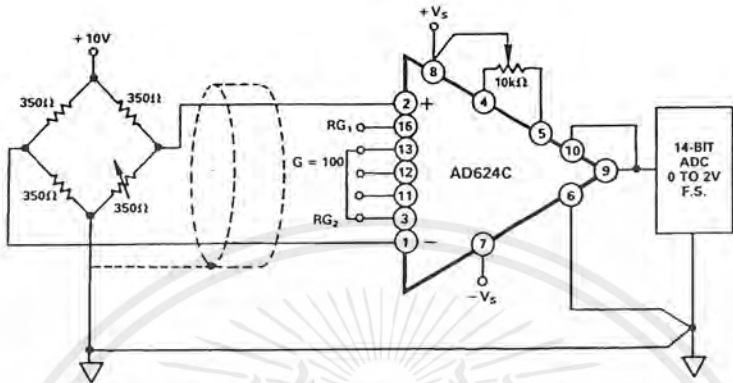


Figure 47. Typical Bridge Application

ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, we will now examine a typical case where an AD624 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 47 shows a differential transducer, unbalanced by $\approx 5\ \Omega$, supplying a 0 to 20 mV signal to an AD624C. 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 $+85^{\circ}\text{C}$. Therefore, the largest change in temperature ΔT within the operating range is from ambient to $+85^{\circ}\text{C}$ ($85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C}$.)

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 (20 ppm = 0.002%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the A to D output, the addition of an auto-gain/auto-zero cycle will remove all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This will also reduce errors to 0.002%.

Table II. Error Budget Analysis of AD624CD in Bridge Application

Error Source	AD624C Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 85^{\circ}\text{C}$	Effect on Resolution
Gain Error	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\% = 1000\text{ ppm}$	1000 ppm	1000 ppm	—
Gain Instability	10 ppm	$(10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 600\text{ ppm}$	—	600 ppm	—
Gain Nonlinearity	$\pm 0.001\%$	$\pm 0.001\% = 10\text{ ppm}$	—	—	10 ppm
Input Offset Voltage	$\pm 25\ \mu\text{V}$, RTI	$\pm 25\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = \pm 1250\text{ ppm}$	1250 ppm	1250 ppm	—
Input Offset Voltage Drift	$\pm 0.25\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$(\pm 0.25\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 15\ \mu\text{V}$ $15\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 750\text{ ppm}$	—	750 ppm	—
Output Offset Voltage ¹	$\pm 2.0\text{ mV}$	$\pm 2.0\text{ mV}/20\text{ mV} = 1000\text{ ppm}$	1000 ppm	1000 ppm	—
Output Offset Voltage Drift ¹	$\pm 10\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$(\pm 10\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C})(60^{\circ}\text{C}) = 600\ \mu\text{V}$ $600\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 300\text{ ppm}$	—	300 ppm	—
Bias Current–Source Imbalance Error	$\pm 15\text{ nA}$	$(\pm 15\text{ nA})(5\ \Omega) = 0.075\ \mu\text{V}$ $0.075\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 3.75\text{ ppm}$	3.75 ppm	3.75 ppm	—
Offset Current–Source Imbalance Error	$\pm 10\text{ nA}$	$(\pm 10\text{ nA})(5\ \Omega) = 0.050\ \mu\text{V}$ $0.050\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 2.5\text{ ppm}$	2.5 ppm	2.5 ppm	—
Offset Current–Source Resistance Error	$\pm 10\text{ nA}$	$(10\text{ nA})(175\ \Omega) = 1.75\ \mu\text{V}$ $1.75\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 87.5\text{ ppm}$	87.5 ppm	87.5 ppm	—
Offset Current–Source Resistance–Drift	$\pm 100\text{ pA}/^{\circ}\text{C}$	$(100\text{ pA}/^{\circ}\text{C})(175\ \Omega)(60^{\circ}\text{C}) = 1\ \mu\text{V}$ $1\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 50\text{ ppm}$	—	50 ppm	—
Common-Mode Rejection 5 V dc	115 dB	$115\text{ dB} = 1.8\text{ ppm} \times 5\text{ V} = 9\ \mu\text{V}$ $9\ \mu\text{V}/20\text{ mV} = 444\text{ ppm}$	450 ppm	450 ppm	—
Noise, RTI (0.1 Hz–10 Hz)	0.22 μV p-p	$0.22\ \mu\text{V}\text{ p-p}/20\text{ mV} = 10\text{ ppm}$	—	—	10 ppm
Total Error			3793.75 ppm	5493.75 ppm	20 ppm

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า and applications, refer to the *Instrumentation Amplifier Application Guide*, available free from Analog Devices. ผลิตโดย Analog Devices และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ผศ. ศุภสโรช หมั่นสิทธิ. วัสดุศาสตร์เชิงฟิสิกส์. ศูนย์สื่อส่งเสริมกรุงเทพ.
- มานพ ตันตระกูล. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- S.Mandayam, L. Udpa, S S. Upda and W. Lord, "Invariance transformation for magnetic flux leakage signals", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.32, No. 3, pp. 1577-1580, May
- S.Mandayam, L. Udpa, S S. Upda and W. Lord, "Monte Carlo methode for modeling magnetostatic NDE phenomena:A feasibility study", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, No. 3, pp. 1425-1428, May 1996
- S.Mandayam, L. Udpa, S S. Upda, Y. S. Sum, "A fast iterative finite element model for electrodynamic and magnetrostrictive vibration absorbers", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 30, No.5, pp. 3300-3303, September
- Phillips co.th, "Data handbook semiconductors"

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์

นายกิตติพงษ์ ขวัญแข่ง

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2521

สถานที่เกิด

จังหวัดพัทลุง

ภูมิลำเนาเดิม

121/4 ถ.อภัยบริรักษ์ ต.คูหาสวรรค์ อ.เมือง
จ.พัทลุง 93000

ที่อยู่ปัจจุบัน

243/49 ม.6 ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี
20230

โทรศัพท์

(038) 763195

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนวัดแหลมจองถนน

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนพัทลุง

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิคพัทลุง

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

โรงเรียนเทคโนโลยีช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพ

ปริญญาตรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

ผลงานที่ได้รับ

-

ทุนการศึกษา

-

คติพจน์

ตนเป็นที่พึ่งแห่งตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์

นายปรีชา เข้มมุกดา

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516

สถานที่เกิด

จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ภูมิลำเนาเดิม

31 ม.2 ถ.เสรีไทย แขวง-เขต คันนายาว

กรุงเทพฯ 10230

ที่อยู่ปัจจุบัน

31 ม.2 ถ.เสรีไทย แขวง-เขต คันนายาว

กรุงเทพฯ 10230

โทรศัพท์

(02) 5175974

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนคันนายาว (ธารินทร์เจริญสงเคราะห์)

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนเตรียมอุดมอ่อนน้อมเกล้า

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี

ปริญญาตรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการควบคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมวิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

ผลงานที่ได้รับ

-

ทุนการศึกษา

-

คติพจน์

คนดีชอบแก้ไข คนชั่วไรชอบแก้ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นางสาวรัตติกา ธนูสา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
ภูมิลำเนาเดิม	27/1 ถ.ศรีอภัย 1 ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000
ที่อยู่ปัจจุบัน	27/1 ถ.ศรีอภัย 1 ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000
โทรศัพท์	(043) 740291
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลมหาสารคาม
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนผดุงนารีมหาสารคาม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
ทุนการศึกษา	-
คติพจน์	ชีวิตสำคัญยิ่ง ความรักมีค่ากว่า หากเพื่ออิสระไร้ สละได้ทั้งสองสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้