

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็ก

DC CURRENT MEASUREMENT BY MAGNETIC SENSOR



T119168



สมุจเฉท ม่วงทอง

สาธิต จิตต์รัตนานันท์

สุรสิทธิ์ จินดารัตน์

เลขหมู่.....**119168**
เลขทะเบียน.....**๕๖** S.ค. 2554
วัน,เดือน,ปี.....

b.12616031
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็ก

DC CURRENT MEASUREMENT BY MAGNETIC SENSOR

ผู้จัดทำ

1. นายสมจเลท ม่วงทอง รหัสนักศึกษา 50011631
2. นายสาธิต จิตตรัตนนานันท์ รหัสนักศึกษา 50011661
3. นายสุรสิทธิ์ จินดารัตน์ รหัสนักศึกษา 50011764



(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดกระแสไฟตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็ก

นายสมุจเจท ม่วงทอง 50011631
นายสาธิต จิตรัตน์นันท์ 50011661
นายสุรสิทธิ์ จินดารัตน์ 50011764
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

รายงานการวิจัยชิ้นนี้นำเสนอการสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟตรง โดยการประยุกต์ใช้งานจากเซนเซอร์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Devices) ชนิดหนึ่ง การประยุกต์ เซ็นเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์วัดกระแสไฟตรงอาศัยหลักการกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำนั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถใช้เซ็นเซอร์แม่เหล็กตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ แล้วนำสัญญาณที่ได้จากการวัดแปลงกลับไปเป็นกระแสไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งซึ่งข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลจากกระแสที่วัดจากแอมป์มิเตอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยข้อดีของอุปกรณ์วัดกระแสไฟตรงที่สร้างจากเซนเซอร์แม่เหล็ก คือ สามารถวัดกระแสไฟได้โดยไม่ต้องไปเกี่ยวข้องกับระบบที่ทำการวัด

DC Current Measurement By Magnetic Sensor

Mr.Samudchad	Muangthong	50011631
Mr.Satit	Jittaruttananun	50011661
Mr.Surasit	Chindarat	50011764
Assoc.Prof.Dr.Toempong	Phetchakul	Advisor
Academic Year 2010		

ABSTRACT

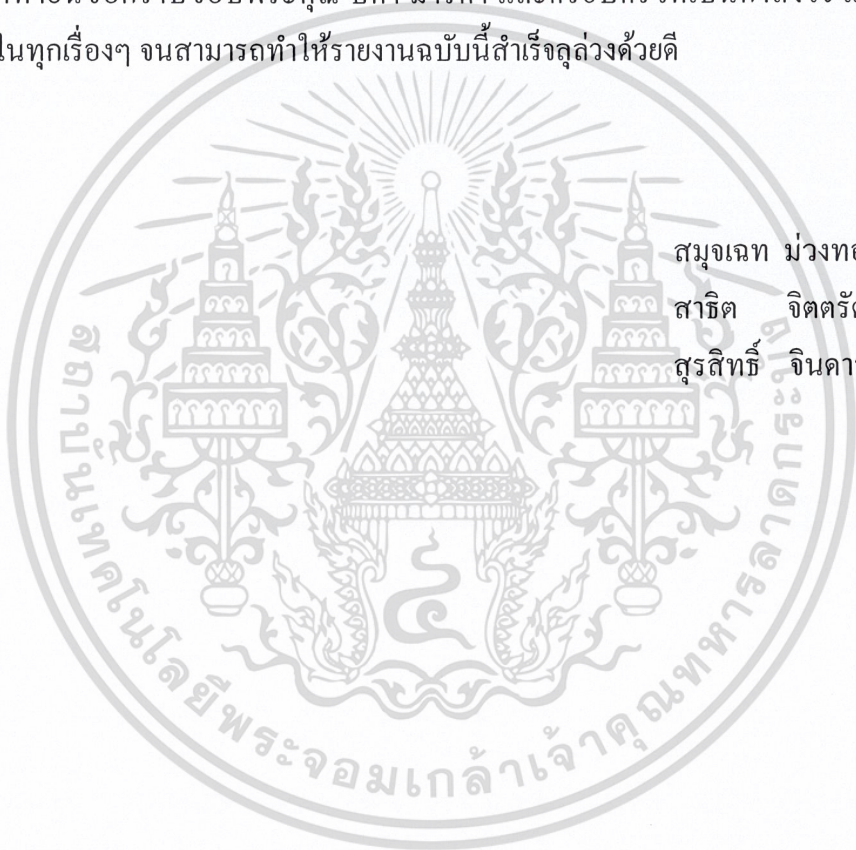
This project presents the design of device for measuring DC current by the application of magnetic sensor which is Hall device type. We apply magnetic sensor by using Ampere's Law to create DC current meter. When the current flow through, the conductor wire will have an inductance of magnetic field. We detect this change and convert the measured signal into current again. The result of the experiment is compared with the measured current from amp meter for analysis. The advantage of the DC current measuring instrument from magnetic sensor is that DC current can be measured without relating to the measured system.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ พี่ปริญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ จนสามารถทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



สมุจเจท ม่วงทอง
สาริต จิตร์ตนาพันธ์
สุรสิทธิ์ จินดารัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ฮอลล์และแกนเฟอร์ไรต์	4
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)	6
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์	6
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	12
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับแกนเฟอร์ไรต์	15
2.3 กฎของแอมแปร์ (Ampere's law)	18
บทที่ 3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์	20
3.1 ส่วนตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor)	21
3.1.1 เซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Sensor)	21
3.1.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)	23
3.2 ส่วนขยายสัญญาณ (Amplifier)	25
3.3 ส่วนประมวลผล (Processing)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **IV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ส่วนแสดงผล (Display)	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	35
4.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรง	35
4.2 การวัดผลการทดลอง	36
4.2.1 วิธีการวัดสนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำรอบเส้นลวดตัวนำ ด้วยเกาส์มิเตอร์	36
4.2.2 วิธีการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร	37
4.2.3 วิธีการแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าตรง	38
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	39
4.3.1 ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำที่กระแสไฟฟ้า ค่าต่างๆ	39
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ในเส้นลวด	40
4.3.3 เปรียบเทียบกระแสที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น กับแอมป์มิเตอร์ทั่วไป	42
บทที่ 5 สรุป	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก	47

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ	4
2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก	6
2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ไปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	9
2.5 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	12
2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	13
2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง	14
2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง	14
2.9 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก	15
2.10 (ก)สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ภายในแกนเฟอร์ไรต์ (ข)ค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามระยะ	15
2.11 การตัดแกนเฟอร์ไรต์เป็นช่องเสียบ (ก)การตัดที่ต้องการ (ข)การตัดที่ไม่ต้องการทาง	16
2.12 การประกอบเซนเซอร์แม่เหล็กเข้ากับแกนเฟอร์ไรต์กรณีกระแสไหลผ่าน เส้นลวดตัวนำสูง	17
2.13 การประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆแกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นในกรณีที่กระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำมีค่าน้อย	17
2.14 สนามแม่เหล็กเนื่องจากตัวนำยาวที่มีกระแสไฟฟ้า	18
2.15 สนามแม่เหล็กในตัวนำชนิดต่างๆ	18
3.1 การเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำและการนำ เซ็นเซอร์แม่เหล็กวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น	20
3.2 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรเครื่องวัดกระแสไฟตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็ก	21
3.3 ไดอะแกรมโครงสร้างภายในของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Effect Sensor เบอร์ A1302)	22
3.4 โครงสร้างภายนอกของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Effect Sensor เบอร์ A1302)	22
3.5 การเคลื่อนที่ของกระแสพาหะเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก	23
3.6 การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ตามหลักการ ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.7 การประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆแกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	24
3.8 ภาพถ่ายของการประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆแกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	24
3.9 การประกอบฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์เข้ากับแกนเฟอร์ไรต์	25
3.10 IC เบอร์ INA121P ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ	26
3.11 โครงสร้างภายในของ IC เบอร์ INA121P	26
3.12 รายละเอียดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA128	27
3.13 ภาพถ่ายของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega128	30
3.14 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล	31
3.15 ภาพถ่ายของจอแสดงผลของ Nokia LCD 5110	32
3.16 ตำแหน่งของ MSB และ LSB ของข้อมูลขนาด 8 บิต	32
3.17 รูปแบบการทำงานของแอดเดรสแบบแนวตั้ง	33
3.18 รูปแบบการทำงานของแอดเดรสแบบแนวนอน	33
4.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรง	35
4.2 รูปถ่ายแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรง	36
4.3 การวัดสนามแม่เหล็กภายในแกนเฟอร์ไรต์ด้วยเกาส์มิเตอร์ (Gauss meter)	37
4.4 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร	38
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้า	38
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า ที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำ	40
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{Out} , $V_{Machine}$) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำ	42
4.8 รูปถ่ายเปรียบเทียบกระแสที่จ่ายจากเครื่องจ่ายกระแสกับกระแสที่วัดได้จากเครื่องวัดกระแส ที่สร้างขึ้น (ก), (ข) เมื่อจ่ายกระแสเท่ากับ 0.05 A และ (ค), (ง) เมื่อจ่ายกระแสเท่ากับ 0.10 A	44

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ	5
3.1 ฟังก์ชันพิเศษของ ขา PORTB (PB0-PB7)	29
3.2 ฟังก์ชันพิเศษของ ขา PORTF (PF0-PF7)	30
3.3 หน้าี่การทำงานของขาสัญญาณของจอแสดงผล LCD	34
4.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำที่กระแสไฟฟ้าระหว่าง 0 – 40 A	39
4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป	41
4.3 ค่ากระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดกระแสกับค่ากระแสที่ป้อนให้แก่เส้นลวดตัวนำ	43



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแสง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ การพัฒนาโครงสร้างและการทำงานเพื่อนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, โมสเฟต ฯลฯ โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องมือวัดทางไฟฟ้ามีมากมายหลากหลายชนิดเช่น เกาส์มิเตอร์ มัลติมิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้ถูกนำไปใช้งานต่างๆขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน สำหรับแอมป์มิเตอร์ถือเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้า โดยความสามารถในย่านการวัดของแอมป์มิเตอร์แต่ละชนิด จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องนั้นๆ แอมป์มิเตอร์โดยทั่วไปสามารถที่จะนำไปใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับได้ โดยย่านการทำงานของมิเตอร์จะแบ่งออกเป็นสองช่วงใหญ่ๆคือ สำหรับการใช้วัดกระแสสูงๆเช่น แคมป์มิเตอร์ และสำหรับใช้ในการวัดกระแสค่าต่ำๆเช่น แอมป์มิเตอร์ มัลติมิเตอร์ แต่ข้อเสียของแอมป์มิเตอร์โดยทั่วไปคือ เวลาที่วัดกระแสจำเป็นต้องต่ออนุกรมกับวงจรที่ทำการวัด ซึ่งจะต้องนำมิเตอร์แทรกเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของวงจร ทำให้อาจเกิดความเสียหายต่อระบบได้หรือในกรณีของวงจรที่ไม่สามารถต่อแอมป์มิเตอร์อนุกรมเข้าไปได้ทำให้ไม่สามารถวัดกระแสที่จุดๆนั้นได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้แอมป์มิเตอร์เข้ามาช่วยในการวัด แต่ข้อเสียของแอมป์มิเตอร์คือมีราคาสูง

ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการสร้างเครื่องวัดกระแสจากเซนเซอร์แม่เหล็กชนิด ฮอลล์เซนเซอร์ (Hall sensor) โดยใช้กฎของแอมแปร์ที่ว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นรอบๆตัวนำนั้น ทำให้สามารถนำเซนเซอร์ไปวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆสายไฟได้ จากกฎของแอมแปร์ที่กล่าวมาทำให้สามารถวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้เซนเซอร์แม่เหล็ก แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าค่าต่ำๆสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบสายไฟมีค่าต่ำ ทำให้เซนเซอร์แม่เหล็กทำงานได้ไม่ดีนัก ทำให้มีการประยุกต์ใช้แกนเฟอร์ไรต์เพื่อเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กให้เซนเซอร์แม่เหล็กตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เอาท์พุตจากเซนเซอร์นำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นแสดงผลทางจอแสดงผล-ผล ข้อดีของเครื่องวัดกระแสที่สร้างขึ้นสามารถวัดกระแสที่มีค่าตั้งแต่ขนาดกลางถึงระดับสูงได้ โดยไม่ต้องเข้าไปยุ่งเกี่ยวกับระบบที่ทำการวัดและมีราคาถูกกว่าเครื่องวัดกระแสในห้องตลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป สามารถประยุกต์ใช้ติดตั้งไว้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆไป เพื่อคำนวณปริมาณของกระแสไฟฟ้าเครื่องนั้นๆออกมาได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเซนเซอร์แม่เหล็ก โครงสร้างแบบฮอลล์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
3. สร้างเครื่องวัดกระแสไฟตรงโดยประยุกต์ใช้จากเซนเซอร์แม่เหล็กชนิดฮอลล์เซนเซอร์
4. วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น
5. เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแอมป์มิเตอร์กับกระแสไฟฟ้าที่วัดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. เซนเซอร์แม่เหล็ก โครงสร้างแบบฮอลล์อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
2. เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดนำทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆเส้นลวดตัวนำนั้นตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งสามารถนำเซนเซอร์แม่เหล็กไปวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้
3. การนำแกนเฟอร์ไรต์มาคล้องเส้นลวดตัวนำ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำสามารถเลื้อยที่อยู่เฉพาะภายในเนื้อแกนเฟอร์ไรต์ ทำให้สามารถนำเซนเซอร์แม่เหล็กไปวัดการเปลี่ยนแปลงได้แม่นยำขึ้น
4. เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการพันแกนเฟอร์ไรต์ด้วยเส้นลวดตัวนำ ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กภายในแกนเฟอร์ไรต์ได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้เซนเซอร์แม่เหล็ก โดยเริ่มศึกษาจาก กฎของแอมป์แปร์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ทฤษฎีของแกนเฟอร์ไรต์ โครงสร้าง และหลักการทำงานของเซนเซอร์แม่เหล็ก รวมทั้งการออกแบบและการนำเซนเซอร์แม่เหล็ก ไปประยุกต์สร้างเป็นเครื่องวัดกระแสไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีของแอมป์แปร์
2. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. ศึกษาการทำงานของเซนเซอร์แม่เหล็ก
4. ศึกษาทฤษฎีของแกนเฟอร์ไรต์
5. ศึกษาทฤษฎีวงจรในการนำเซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องวัดกระแสไฟตรง.
6. ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์
7. ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์
8. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็ก

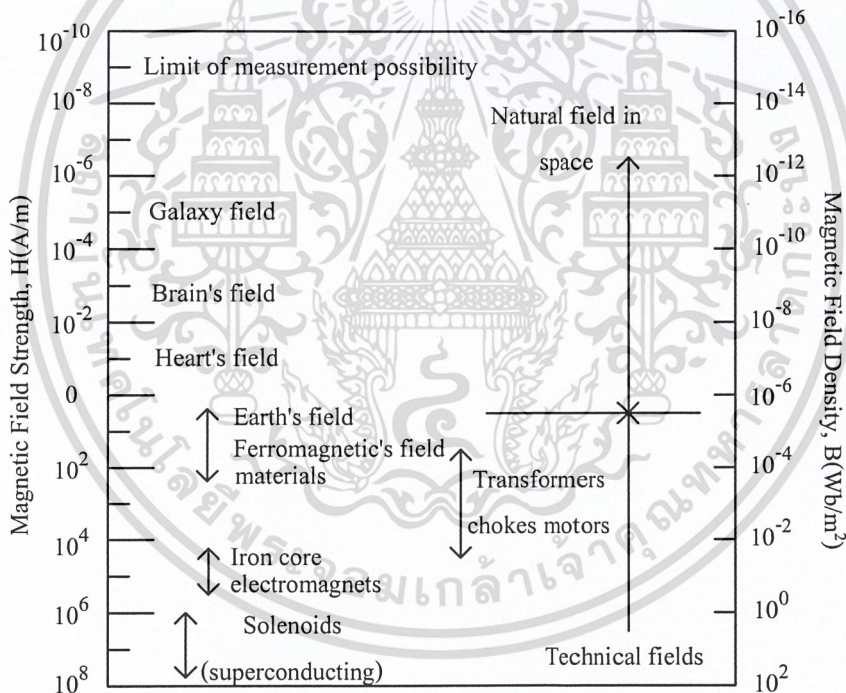


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ฮอลล์และแกนเฟอร์ไรต์

โดยปกติแล้วสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติเช่น ร่างกายของมนุษย์ บริเวณกล้ามเนื้อซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 2×10^{-5} A/m หรือบริเวณพื้นผิวของดวงอาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กประมาณ 600 A/m [1] สนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบร่างกายของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น สมองของมนุษย์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเวียนในระดับไมโครแอมป์, หัวใจ และ เส้นเอ็นกล้ามเนื้อซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กประมาณ 10^{-2} A/m อยู่ในร่างกายของมนุษย์ในรูปแบบที่ 2.1 แสดงระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 10^{-9} A/m จนถึง 10^8 A/m โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงสามารถเกิดได้จาก กระบวนการเทคนิคการสร้าง, สายส่งสัญญาณ, หม้อแปลงไฟฟ้า (10^1 - 10^5 A/m), วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (1 - 10^6 A/m) และขดลวดสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด (10^6 - 10^7 A/m)



รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ[2]

ความเข้มสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (H) แสดงหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m) โดยที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) มีหน่วยเป็น เทสลา (T) ซึ่งนิยามของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B คือเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) 1 เวเบอร์ ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉาก

กับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยแสดงได้โดย

$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_R^B H$$

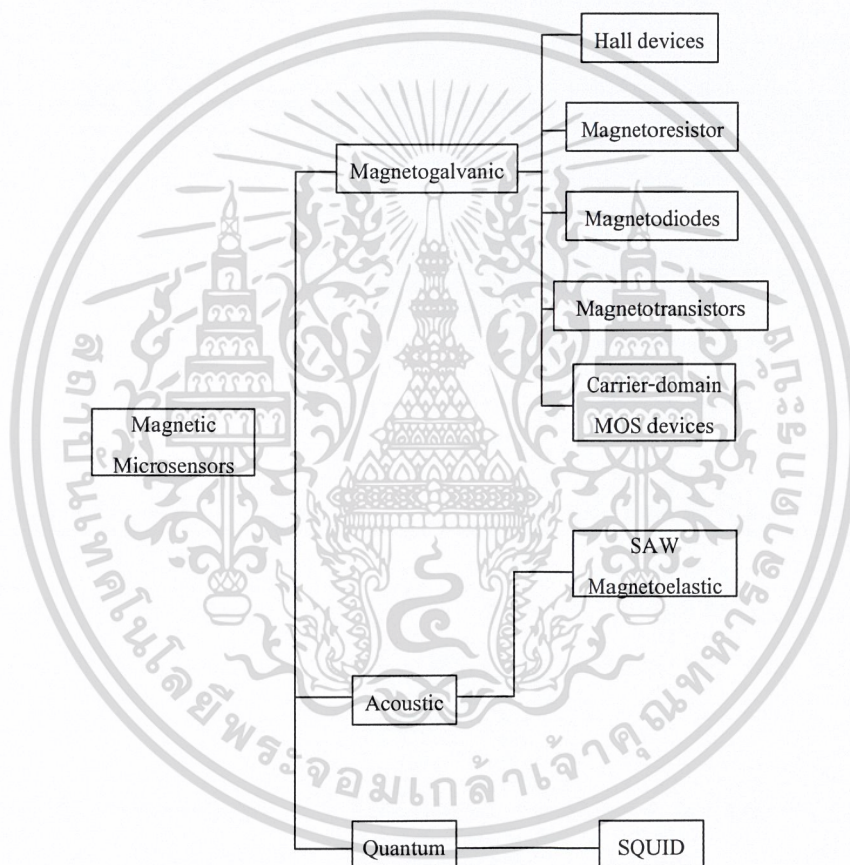
โดย μ^B คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ μ_0^B จะมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์ μ_r^B จะมีค่าประมาณ $\mu_r^B \gg 1$ ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูงแต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำคือประมาณ $\mu_r^B \cong 1$

การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็ก, การพัฒนาวัสดุแม่เหล็กและการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ แสดงได้ในตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กเริ่มจาก Joule ซึ่งค้นพบในปี 1842 จนถึง Josephson ที่ค้นพบในปี 1962 ซึ่งการค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้อย่างหลากหลาย

ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ[2]

Year	Effect	Description	Application
1842	Joule	Magnetostriction-change in of ferromagnet with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1846	-	Change in Young's modulus with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1847	Matteucci	Torsion of a ferromagnetic rod changes magnetisation.	Magnetoelastic sensor.
1856	Thomson	Change in electrical resistance with magnetic field.	Magneto resistive sensors.
1858	Wiedemann	A Torsion is created by a current carrying ferromagnetic rod when subjected to a longitudinal field	Torque and force measurement
1865	Villari	Magnetization effected by tensile or compressive strength.	Magnetoelastic sensors.
1879	Hall	Transverse voltage created across current-carrying crystal by magnetic field.	Magnetogalvanic sensors.
1903	Skin	Displacement of current to surface due to eddy current.	Position sensors. (distance, proximity)
1931	Sixtus	Pulse magnetisation by large	Wiegand and pulse-
	Tonks	Barkhausen jumps.	Wire sensors.
1962	Josephson	Quantum mechanical tunnelling effect between two superconducting layers.	Position sensors SQUID magnetometers.

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดไมโครเซนเซอร์ โดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะที่เคลื่อนที่ขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน รูปที่ 2.2 แสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจำแนกตามหลักการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์, ชนิดของอุปกรณ์ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งชนิดที่ใช้ฟิล์มที่บางและหนาของเซนเซอร์ SAW (Surface Acoustic Wave) นอกจากนี้แสดงถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีหลักการแตกต่างชนิดอื่นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กขนาดเล็กได้โดยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงมากคือ SQUID (Super Conducting Quantum Interference) [15]



รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก[2]

2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

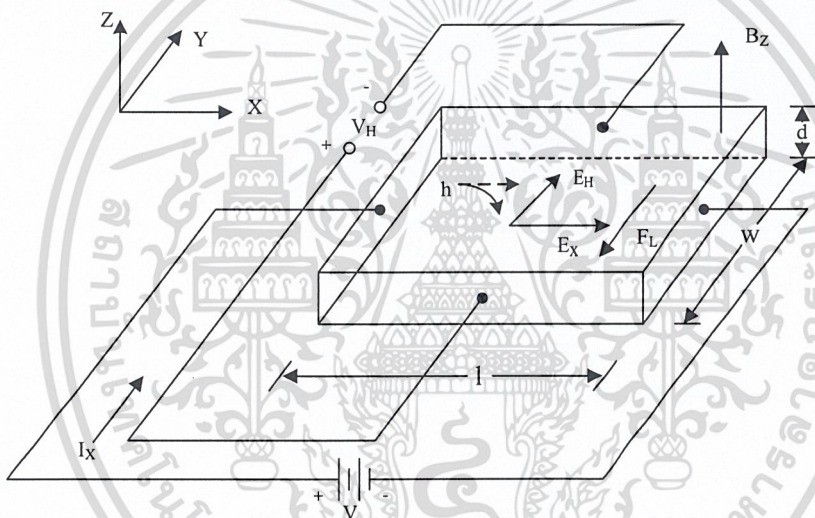
ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็กปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ได้อีกด้วย

แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูป 2.3 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [3]

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง $+x$ จะเกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (drift velocity) v_x ในทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์ กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

$$\overline{F_L} = e\overline{v} \times \overline{B} \quad (2.1)$$

โดยที่ $\overline{F_L}$ คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีทิศทางในแกน $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_H ในทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ $+y$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน (eE_H) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e.v_x.B_z \quad (2.3)$$

จาก $E_H = v_x.B_z \quad (2.4)$

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ

$$v_x = \frac{J_x}{p.e}$$

แทนค่า v_x ลงในสมการ (2.4) จะได้

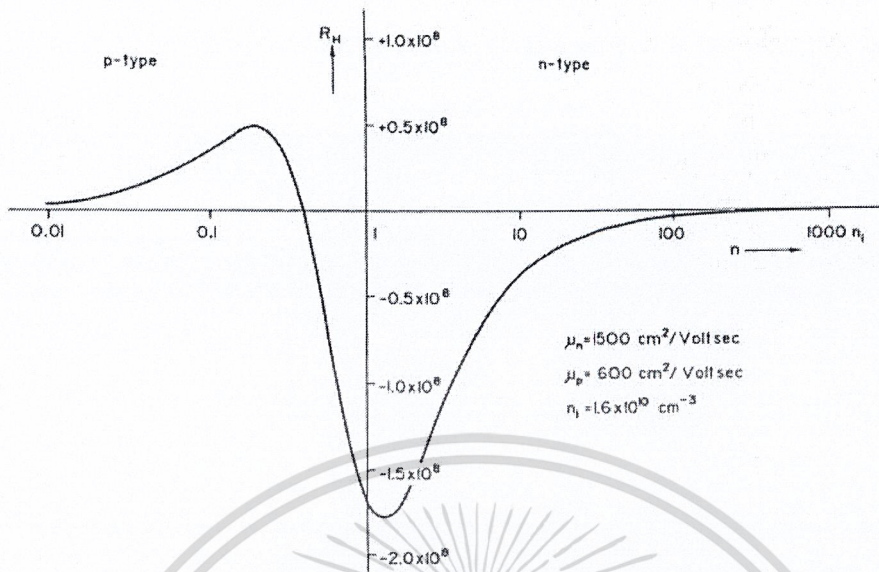
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_H}{J_x.B_z} = \frac{1}{p.e} = R_H \quad (2.5)$$

โดย R_H คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำชนิดคอนนิกชันทรินซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ โด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

จากรูป 2.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ w จะได้

$$V_H = E_H \cdot w \quad (2.6)$$

โดย V_H คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

โดยการแทนค่า $J_x = \frac{I}{w.d}$ และ $E_H = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$R_H = \frac{V_H}{w.I.B_z} \cdot w.d$$

หรือ

$$R_H = \frac{d.V_H}{I.B_z} = \frac{1}{p.e} \quad (2.7)$$

$$V_H = \frac{I.B_z}{p.e.d} \quad (2.8)$$

ความหนาแน่นของโฮล คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = \frac{1}{e.R_H} = \frac{I.B_z}{e.d.V_H} \quad (2.9)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w.d}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{w.d}{l} \quad (2.10)$$

จาก

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e.p.\mu_p}$$

ดังนั้นจะได้

$$\mu_p = \frac{1}{e.p.p} = \frac{1}{\rho} R_H \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแต่ละสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะ ได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น แรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H แสดงดังนี้

$$R_H = -\frac{1}{n.e} \quad (2.12)$$

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{I.B} = \frac{R_H \cdot G}{d} = \frac{G.r_n}{p.e.d} \quad (2.13)$$

จะเห็นว่า ค่าความไว ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เพลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแต่ละสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x แต่ทำมุม θ_H กับแกน +x ดังรูปซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x}$$

โดยการแทนค่า $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p.e}$ และ $J_x = \sigma \cdot E_x$ จะได้

$$\tan \theta_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p.e} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma \cdot B_z}{p.e}$$

หรือ
$$\tan \theta_H = \frac{\sigma \cdot B_z}{p.e} = p.e \cdot \mu_p \frac{B_z}{p.e} = \mu_p \cdot B_z$$

จะได้

$$\frac{\sigma}{p.e} = \mu_p$$

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{Hl} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.14)$$

และ
$$\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \mu_p \cdot B_z = \mu_{Hl} \cdot B_z$$

หรือ

$$\mu_H = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.15)$$

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และ μ_{Hl} คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{Hi} แสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (2.16)$$

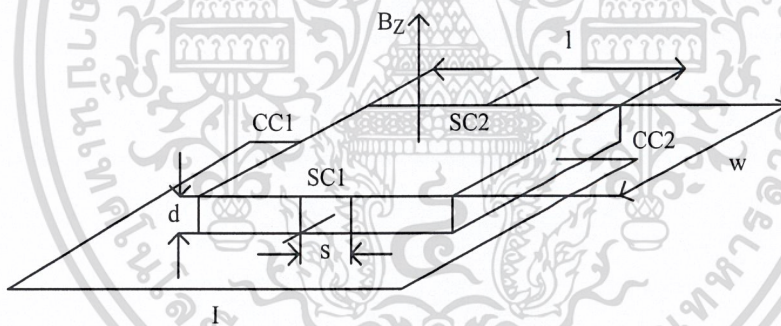
และ

$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (2.17)$$

โดย μ_{Hi} คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 ซึ่งแรงดันฮอลล์ (V_H) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.18)



รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวาง โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ [4]

$$V_H = \frac{R_H}{d} \cdot G \left(\frac{l}{w}, \frac{s}{w}, \frac{y}{l}, \theta_H \right) \cdot B_z \cdot I \quad (2.18)$$

โดยที่ R_H คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์, G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง, l คือ ความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์, B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง, s คือ ความกว้างของขั้วเซนเซอร์คอนแทค (SC), w คือ ความกว้างของอุปกรณ์และ l คือความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \frac{r_n}{q.n.t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (2.19)$$

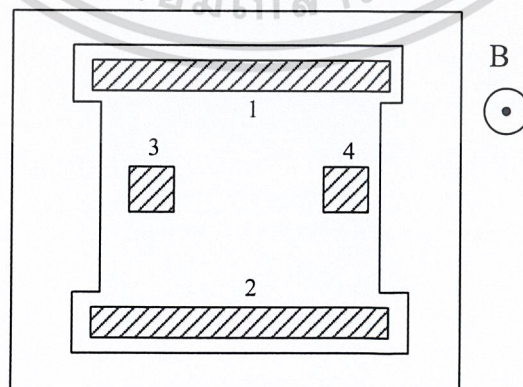
โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณดังสมการที่ (2.20)

$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.20)$$

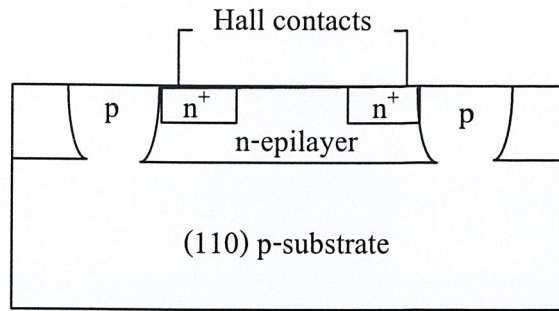
โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G=1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทกจะออกแบบที่ระยะ $l/2$ [4]

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคืออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [2] โดยรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงด้านบนและด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียล $5 - 10 \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเฟลทประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการอิมพลานเตชัน (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง[2]

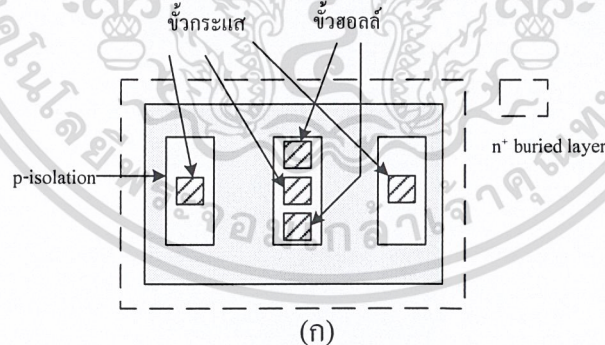
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



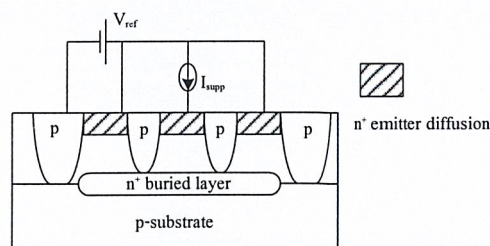
รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง [2]

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนก็ได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ 41 V/AT โดยมีระดับสัญญาณรบกวน $1 \times 10^{-5} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ที่ 40 Hz

อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ $2 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 2.9 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง (B_x, B_y, B_z) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลเซอร์ที่บางมากประมาณ 100 \AA ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ $500 - 1,000 \text{ V/AT}$ แต่มีข้อเสียคือจะมีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ



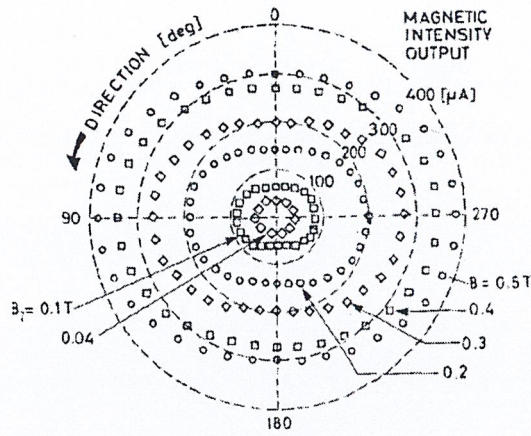
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



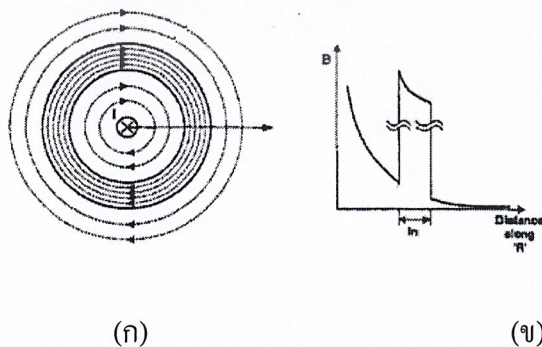
รูปที่ 2.9 เอาท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก[2]

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับแกนเฟอร์ไรต์

เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆสายไฟมีการกระจายอยู่ในอากาศอย่างสม่ำเสมอ และมีความหนาแน่นไม่มากพอที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับได้ ดังนั้น วิธีการเพิ่มความหนาแน่นของความเข้มสนามแม่เหล็กคือ นำแกนเฟอร์ไรต์มาคล้องรอบสายไฟตัวนำ ซึ่งแกนเฟอร์ไรต์เป็นวัสดุที่มีส่วน ผลสมของแม่เหล็กทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าเหล็ก รวมทั้งมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กที่สูง จากคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรต์ทำให้สนามแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่ในอากาศเข้ามาเคลื่อนที่ภายในส่วนของเนื้อแกนเฟอร์ไรต์ ดังรูปที่ 2.10ก ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.22

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi \cdot r} \quad (2.22)$$

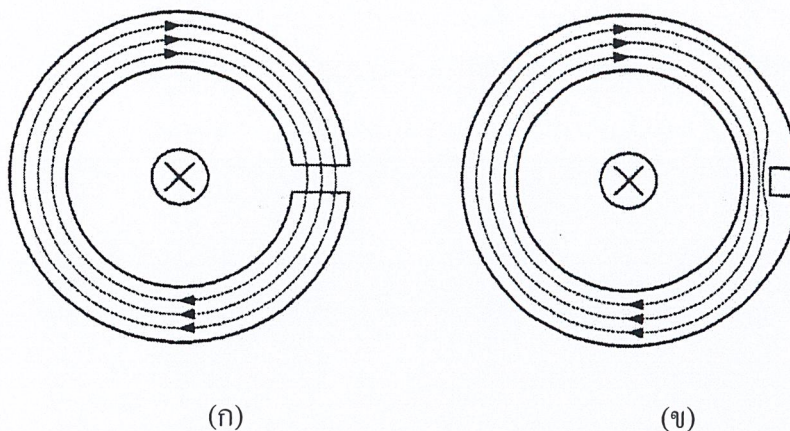
ดังรูปที่ 2.10ข สังเกตได้ว่าเมื่อระยะทางห่างจากลวดตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดจะมีค่าลดลง แต่สนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในแกนเฟอร์ไรต์จะมีค่าสูงขึ้นมาทันที จากนั้นจะมีค่าลดลงไปตามระยะทางที่ไกลออกไป



รูปที่ 2.10 (ก) สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ภายในแกนเฟอร์ไรต์ (ข) ค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตาม

ระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การตัดแกนเฟอร์ไรต์เป็นช่องเสียบ (ก) การตัดที่ต้องการ (ข) การตัดที่ไม่ต้องการ

แต่การจะวัดสนามแม่เหล็ก ต้องใส่เซนเซอร์เข้าไปวัดจนถึงเส้นแรงแม่เหล็ก สามารถทำได้โดยการตัดแกนเฟอร์ไรต์เป็นช่องเสียบ ในการตัด ต้องตัดแกนเฟอร์ไรต์ออกให้หมด ดังรูปที่ 2.11(ก) ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะข้ามผ่านรอยตัดเล็กๆ แต่ถ้าตัดแกนเฟอร์ไรต์ออกไม่หมดเส้นแรงแม่เหล็กจะหลีกเลี่ยงการกระโดดข้ามผ่านรอยบาก ดังรูปที่ 2.11(ข) การคำนวณสนามแม่เหล็กเมื่อความกว้างของรอยบาก (g) น้อยเมื่อเทียบกับรัศมีของแกนเฟอร์ไรต์ ($g \ll 2\pi r$) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.23

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi \cdot r + g\mu_r} \quad (2.23)$$

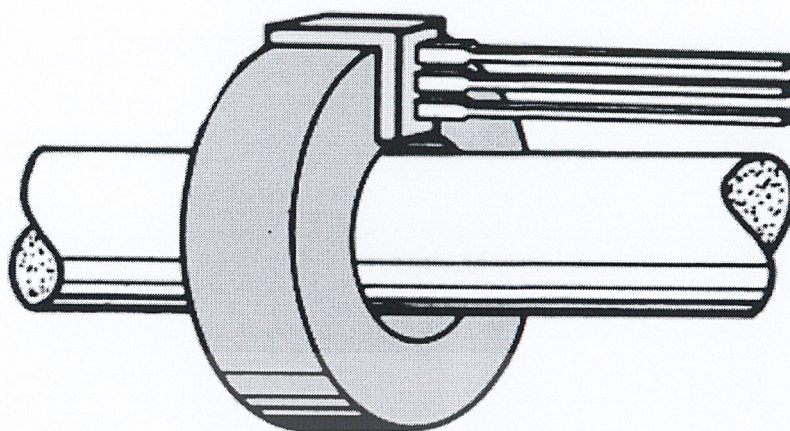
นอกจากนี้ ถ้า $g\mu_r \gg 2\pi r$ ในกรณีสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสูง สามารถคำนวณสนามแม่เหล็กได้โดยใช้สมการที่ 2.24

$$B = \frac{\mu_0 I}{g} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 ทำให้ทราบว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามกระแส (I) ที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ เมื่อกระแส (I) ที่ไหลในเส้นลวดตัวนำมีค่าสูงค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูง ในทางกลับกัน ถ้ากระแส (I) ที่ไหลในเส้นลวดตัวนำมีค่าต่ำสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ และเมื่อรอยบากมีค่ามากสนามแม่เหล็กที่ได้จะมีค่าน้อย เพราะฉะนั้นไม่ควรทำรอยบากให้มาก ควรทำรอยบากให้มีความกว้างพอดีกับเซนเซอร์ซึ่งทำให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้ร่วมกับแกนเฟอร์ไรต์ได้

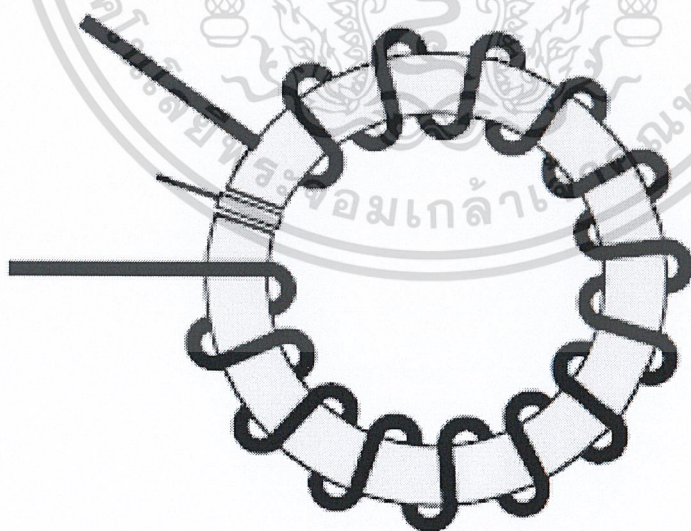
การประยุกต์นำแกนเฟอร์ไรต์ไปใช้ร่วมกับเซนเซอร์แม่เหล็กสามารถแบ่งได้ 2 กรณี โดยในกรณีที่กระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำมีค่ามากสามารถประยุกต์นำแกนเฟอร์ไรต์ไปใช้ร่วมกับเซนเซอร์แม่เหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการประกอบเซนเซอร์แม่เหล็กเข้ากับแกนเฟอร์ไรต์กรณีกระแสไหลผ่าน
เส้นลวดตัวนำสูง

กรณีที่กระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำมีค่าต่ำ ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ แต่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กโดยการประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆแกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



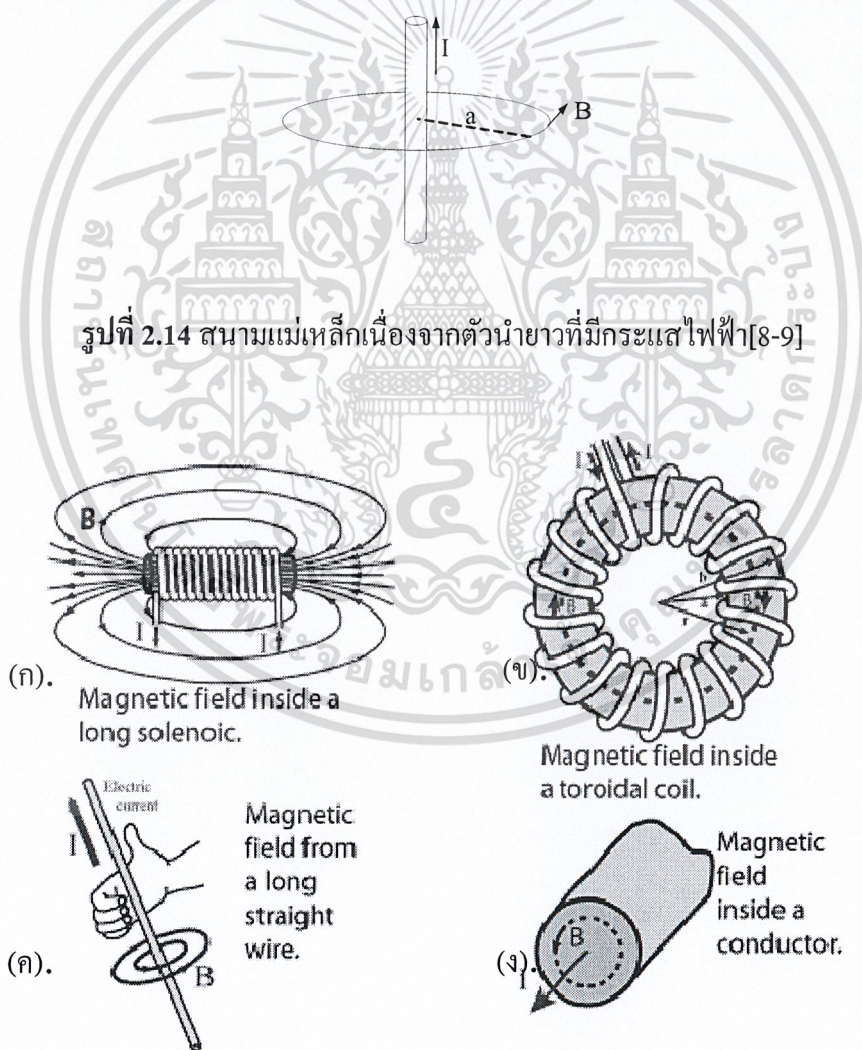
รูปที่ 2.13 แสดงการประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆแกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่
สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นในกรณีที่กระแสไหลผ่าน
เส้นลวดตัวนำมีค่าน้อย

2.3 กฎของแอมแปร์ (Ampere's law)

เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ ซึ่งกล่าวว่า “อินทิกรัลเชิงเส้นของ B รอบเส้นปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าตรงค่าสุทธิที่ถูกปิดล้อมโดยเส้นปิดนั้น” ซึ่งพิจารณาในกรณีของตัวนำยาวมากที่มีกระแสไฟฟ้า (I) จากลักษณะความสมมาตร การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กจะมีเส้นทางเป็นวงกลม ซึ่งมีตัวนำเป็นจุดศูนย์กลางดังในรูปที่ 2.15 และสามารถคำนวณขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.25

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot a} \quad (2.25)$$

เมื่อ B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่รัศมี a , μ_0 คือ ค่าความซึมซับได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m), I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ และ a คือ รัศมี



รูปที่ 2.15 แสดงสนามแม่เหล็กในตัวนำชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 แสดงสนามแม่เหล็กที่ในตัวนำชนิดต่างๆ โดย ก. แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในโซลินอยด์ ข. แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดรอยด์ ค. แสดงสนามแม่เหล็กจากสายไฟตรงยาว และทิศทางสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวาของแอมแปร์ ง. แสดงสนามแม่เหล็กในตัวนำ

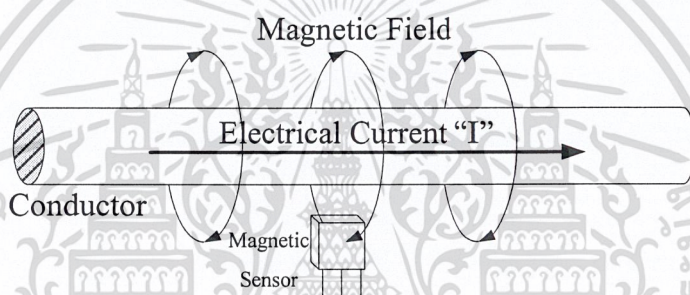


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วงจรถ่ายโอนสัญญาณ

การนำเซ็นเซอร์แม่เหล็กไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรงนั้น อาศัยหลักการของ แอมแปร์ ที่ว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆเส้นลวดตัวนำนั้น โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเส้นลวดตัวนำนั้น ซึ่งสามารถนำเซ็นเซอร์แม่เหล็กไปวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ แสดงดังรูปที่ 3.1

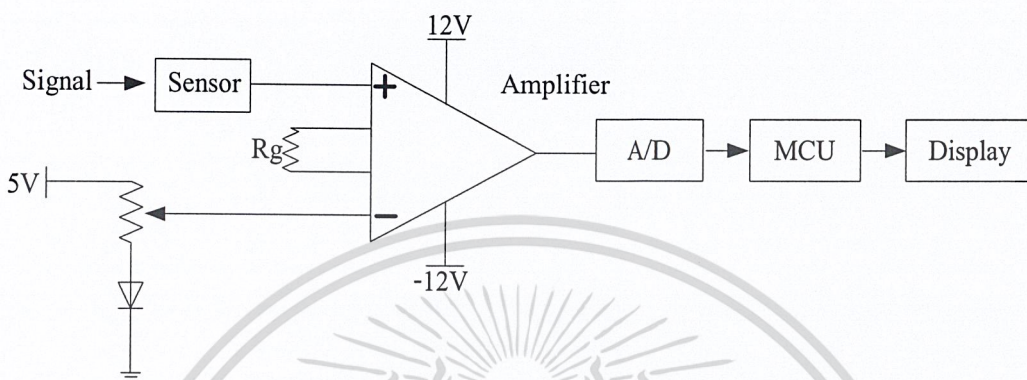


รูปที่ 3.1 การเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำและการนำเซ็นเซอร์แม่เหล็กวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

สำหรับการออกแบบวงจรถ่ายโอนสัญญาณที่ใช้ต่อร่วมกับเซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Hall Sensor) เพื่อสร้างเป็นเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตรงจากเซ็นเซอร์แม่เหล็กซึ่งประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนได้แก่

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Hall Sensor)
2. ส่วนขยาย (Instrument Amplifier)
3. ส่วนประมวลผล(microcontroller)
4. ส่วนแสดงผล (Display)

โดยสามารถแสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่องวัดกระแสได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Hall Sensor), วงจรขยาย (Amplifier), วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็น ดิจิตอล (A/D converter), ส่วนของการประมวลผล (MCU) และการแสดงผล (Display)



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรเครื่องวัดกระแสไฟตรงจากเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

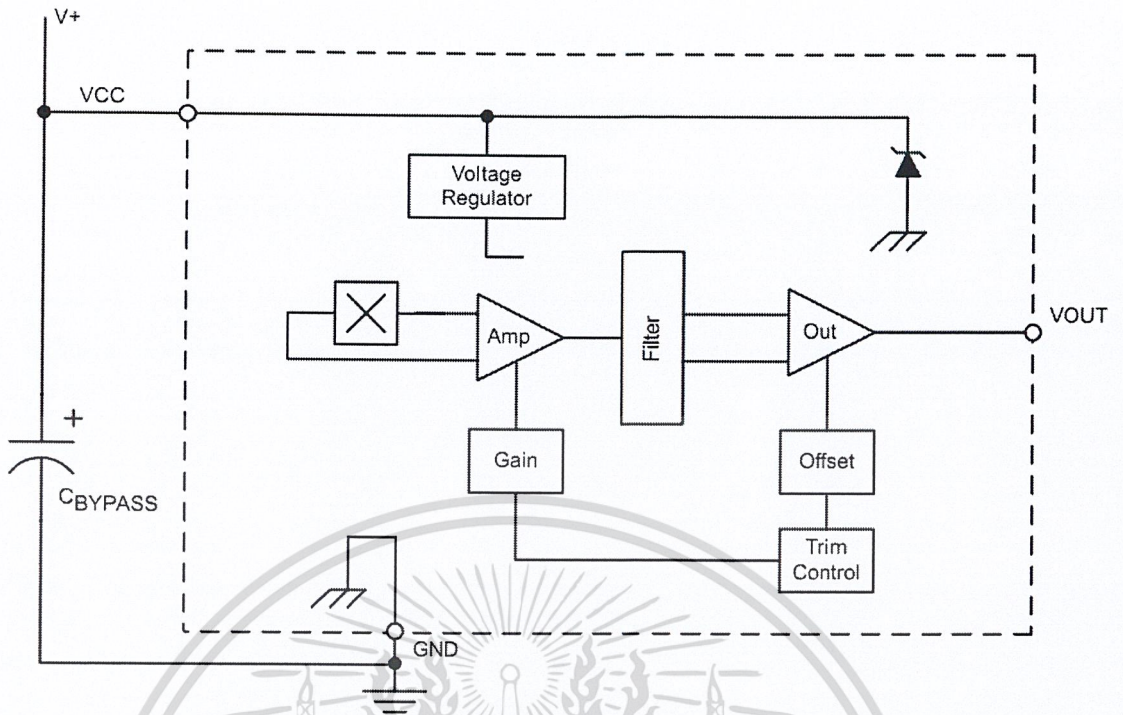
หลักการทำงานของวงจร

เมื่อเซ็นเซอร์แม่เหล็กตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เนื่องมาจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำที่คล้องผ่านแกนเฟอร์ไรต์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของขาเอาท์พุทของส่วนตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้น นำค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงเข้าสู่ส่วนขยายเพื่อขยายสัญญาณที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนประมวลผล เพื่อเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณจากสัญญาณอนาล็อก (Analog) เป็นสัญญาณดิจิตอล และประมวลผลเพื่อใช้ในการแสดงค่ากระแสไฟตรงที่ส่วนแสดงผล

3.1 ส่วนตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor)

3.1.1 เซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Sensor)

เซนเซอร์แม่เหล็กที่ใช้ คือ Hall Effect Sensors สำเร็จรูปเบอร์ A1302 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ วงจรรวมที่ประกอบด้วยส่วนย่อยต่างๆได้แก่ ส่วนแรงดันคงที่ (Voltage Regulator), ส่วนขยาย (Amplifier), ส่วนกรองความถี่ (Filter) แสดงดังรูปที่ 3.3

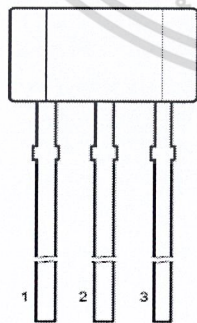


รูปที่ 3.3 โค้ดอะแกรมโครงสร้างภายในของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Effect Sensor เบอร์ A1302)

โครงสร้างภายนอกของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Effect Sensor A1302)

เซนเซอร์จะทำงานเมื่อได้รับแรงดันอินพุตเข้าที่ขา 1 ในช่วง 4.5-6 โวลต์ และได้ค่าแรงดันเอาต์พุต (Vout) ประมาณ 2.5V ซึ่งเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านค่าแรงดันเอาต์พุต (Vout) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นขึ้นกับค่าความเข้ม และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน

Package UA

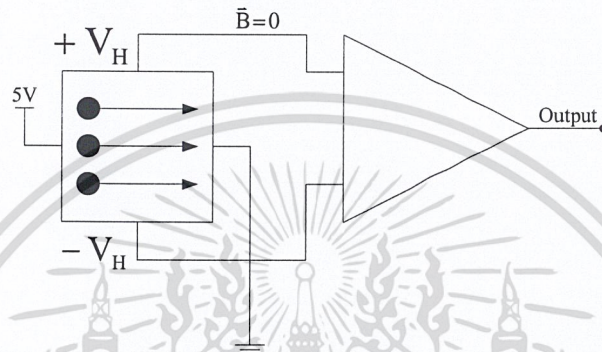


Symbol	Number
VCC	1
GND	2
Vout	3

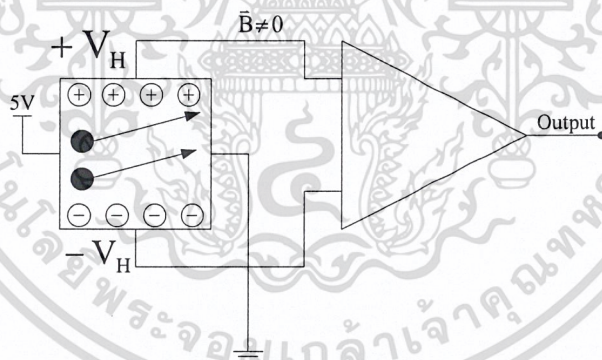
รูปที่ 3.4 โครงสร้างภายนอกของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Effect Sensor เบอร์ A1302)

หลักการทํางานพื้นฐานของเซนเซอร์แม่เหล็ก (Hall Sensor)

การทํางานของเซนเซอร์แม่เหล็กอาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก ตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของแรงดันฮอลล์ (V_{HALL}) แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงนี้ถูกนำไปใช้ตรวจจําปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่ของกระแสพาหะเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.6 การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

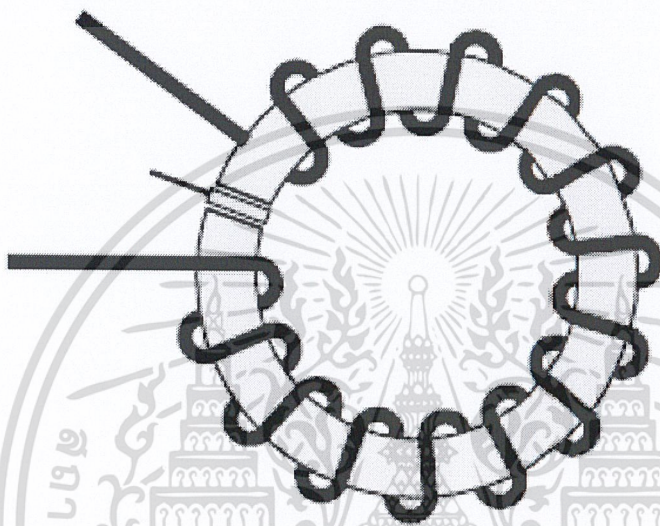
3.1.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

แกนเฟอร์ไรต์ คือ เป็นวัสดุทางแม่เหล็กที่มีส่วนประกอบของแร่เหล็กผสมรวมอยู่กับคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีค่า Permittivity สูงมากทำให้สนามแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.6(ก) ถูกนำมาประยุกต์ในการตรวจจําสนามแม่เหล็ก โดยทำหน้าที่เป็นตัวรวมเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายอยู่รอบๆ เส้นลวดตัวนำให้เคลื่อนที่โดยเฉพาะในแกนเฟอร์ไรต์ ทำให้สามารถนำ

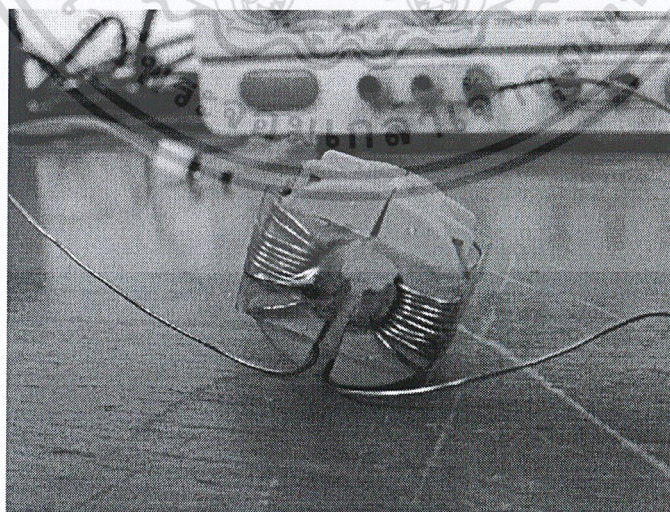
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ไปตรวจจับได้สะดวก และเป็นการเพิ่มความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กได้ด้วย อีกทางหนึ่ง เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทั่วไปไม่สามารถจ่ายกระแสที่มีค่าสูงได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย จึงประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆ แกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้นซึ่งสามารถเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นได้ ดังรูป ที่

3.7



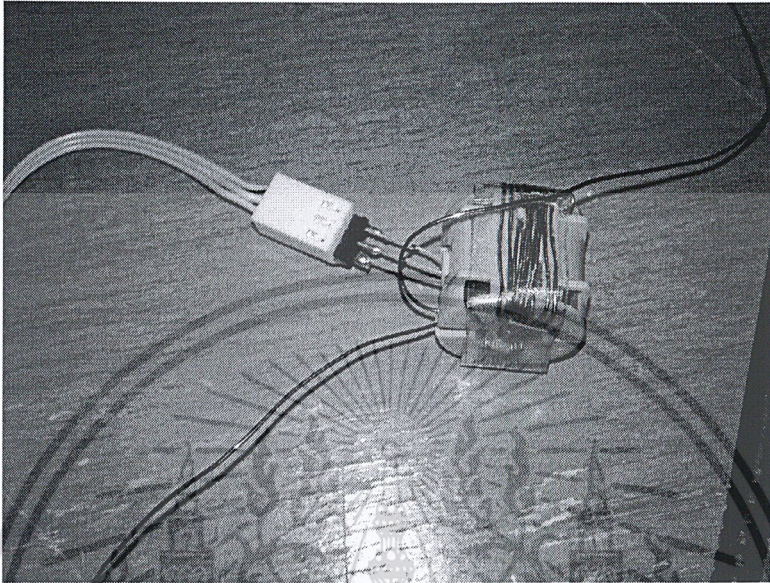
รูปที่ 3.7 การประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆ แกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของการประยุกต์ใช้การพันลวดตัวนำรอบๆ แกนเฟอร์ไรต์ในจำนวนรอบที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการประกอบฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์เข้ากับแกนเฟอร์ไรต์แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดยเชื่อมต่อ
เข้าตรงรอยบากของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 3.9 การประกอบฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์เข้ากับแกนเฟอร์ไรต์

3.2 ส่วนภาคขยายสัญญาณ (Amplifier)

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากเซ็นเซอร์ยังอยู่ในระดับที่ต่ำมาก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณก่อนเพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น ในที่นี้เลือกใช้งานวงจรขยายสัญญาณสำเร็จรูปคือ IC เบอร์ INA121P แสดงดังรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างการจัดเรียงขาของอุปกรณ์ โดย IC เบอร์นี้สามารถขยายสัญญาณได้ในช่วงที่กว้าง และมีสัญญาณรบกวนน้อย ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

ในการออกแบบวงจรขยายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป (Instrument Amplifier) ที่ต้องการอัตราขยาย (GAIN) = 20 เท่า จะสามารถคำนวณค่าความต้านทานภายนอก (R_G) ได้จากสมการดังนี้

$$\text{Gain} = 1 + \frac{50K\Omega}{R_G}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_G = \frac{50\text{K}\Omega}{\text{Gain} - 1}$$

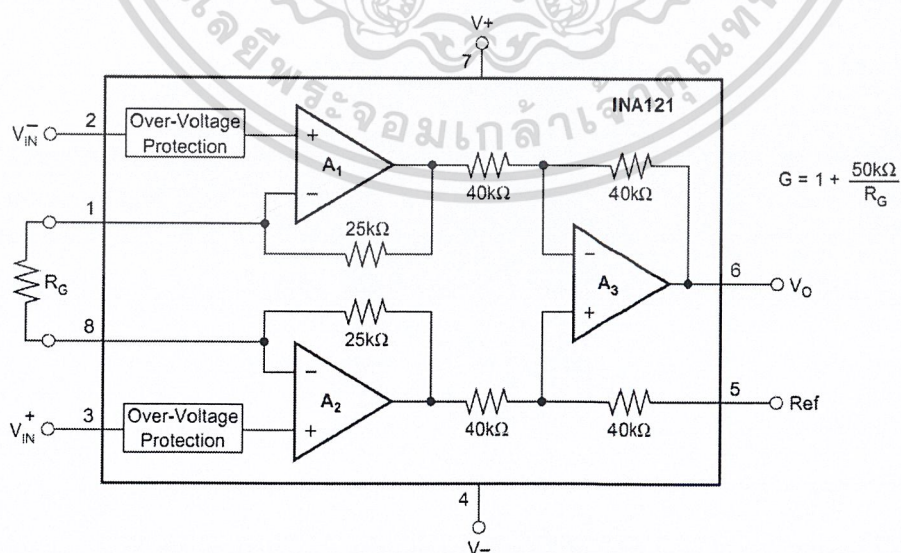
$$R_G = \frac{50\text{K}\Omega}{20 - 1} \approx 2.632\text{K}\Omega$$

Gain คืออัตราขยาย

R_G คือความต้านทานภายนอก



รูปที่ 3.10 IC เบอร์ INA121P ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ

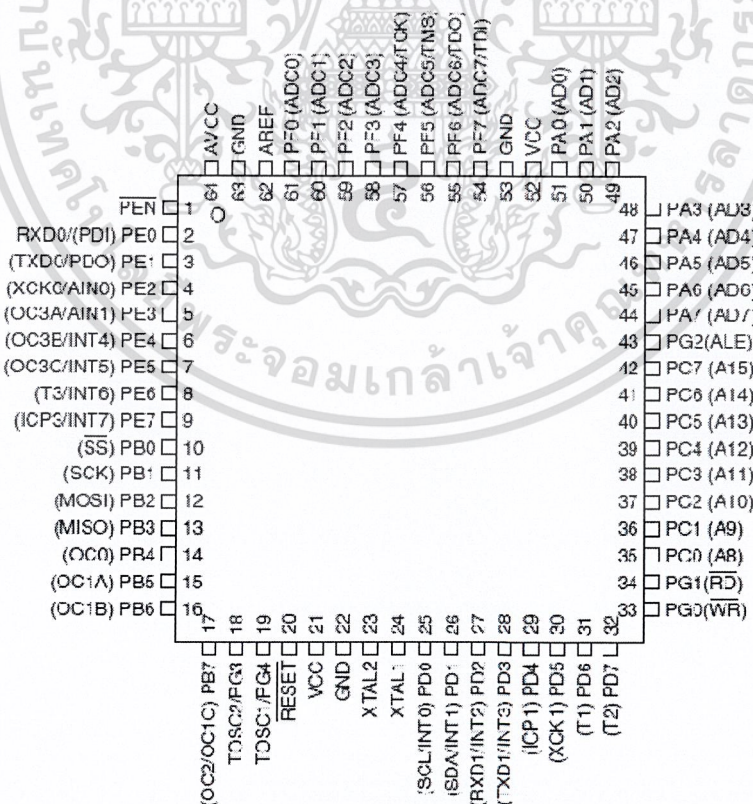


รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างภายในของ IC เบอร์ INA121P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ส่วนประมวลผล (Processing)

ในการประมวลผลสัญญาณจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) รุ่น AVR เบอร์ ATmega128 เป็นตัวประมวลผลดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมของคนทั่วไป ทำให้มีตัวอย่างโปรแกรมการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย โดยจะมีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลอยู่ภายในตัว ทำให้ประหยัดไม่ต้องซื้อ IC แปลงสัญญาณเพิ่มเติม และสามารถพัฒนาโปรแกรมได้ด้วยภาษาซี ET-BASE AVR ATmega128 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ของบริษัทAtmel ซึ่งบอร์ดนี้เลือกใช้ MCU เบอร์ ATmega128 ขนาด 64 Pin โดยในบอร์ด ET-BASE AVR ATmega128 นี้จะเน้นจะเน้นการใช้งานทรัพยากรของตัว MCU เองเป็นหลัก ซึ่งจะมีการต่อขาสัญญาณ I/O ออกมาจัดเรียงให้เป็นพอร์ต PA,PB,PC,PD,PE,PF และพอร์ต ET-CLCD เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน พร้อมทั้งพอร์ตสำหรับคาน์โทลด์โปรแกรม นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจรไคร์ฟเวอร์ RS-232 เข้าไปด้วยเพื่อให้สามารถใช้งานทางด้านพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.12 แสดงรายละเอียดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของบอร์ด

MCU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega128 ของ Atmel ซึ่งเป็น MCU ขนาด 8-Bit โดยเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบ XTAL ค่า 16 MHz ซึ่งคุณสมบัติเด่น ๆ ของ MCU ได้แก่

- มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 64 KBytes สำหรับ ATmega64 และ 128K Bytes สำหรับ ATmega128 และมี RAM 4 KBytes
- มีหน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 2K Bytes สำหรับ ATmega64 และ 4 K Byte สำหรับ ATmega128 ซึ่งสามารถลบและเขียนซ้ำได้กว่า 100,000 ครั้ง
- จำนวน I/O สูงสุดถึง 53 I/O Pins
- มีวงจรถ่ายส่ง SPI จำนวน 1 ช่อง , I2C จำนวน 1 ช่อง , Programmable Serial USARTs จำนวน 2 ช่อง
- มี ADC ขนาด 10-Bit จำนวน 8 ช่อง
- มี Timers/Counters 8-Bit จำนวน 2 ช่อง , Timers/Counters 16-Bit จำนวน 2 ช่อง , 8-Bit PWM 2 ช่อง , Watchdog Timer , Real Time Counter
- I/O PORT 10 PIN จำนวน 6 PORT ดังนี้ PA,PB,PC,PD,PE,PF
- พอร์ต ISP LOAD สำหรับโปรแกรม MCU (ต้องใช้ร่วมกับ JTAG-AVR ISP หรือเครื่องโปรแกรม ISP อื่นที่มีการจัดเรียงขาสัญญาณเหมือนกัน)
- วงจร Line Driver สำหรับพอร์ตสื่อสารอนุกรม RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถต่อทดลองการติดต่อสื่อสาร RS232• วงจรเชื่อมต่อจอแสดงผล LCD แบบ Character (ET-CLCD) พร้อม VR ปรับความสว่างของ LCD ซึ่งใช้การเชื่อมต่อวงจรกับ LCD แบบ 4 Bit Interface
- วงจร Regulate ขนาด +5V / 1A สำหรับใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรให้กับจอแสดงผล LCD และอุปกรณ์ I/O ต่างๆที่ใช้กับแหล่งจ่ายขนาด +5V พร้อม LED แสดงสถานะสีแดง
- ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 X 6 cm

รายละเอียดขาพอร์ต ATmega128

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega128 มีจำนวนขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิทัลทั้งสิ้น 53 ขาพอร์ตประกอบไปด้วยพอร์ต A ถึง F พอร์ตละ 8 บิต และพอร์ต G จำนวน 5 บิต โดยในแต่ละขาพอร์ตสามารถทำหน้าที่ได้มากกว่าหนึ่งหน้าที่ ในที่นี้จะอธิบายในส่วนขอพอร์ตที่ใช้งานเท่านั้น ขา PORTB (PB0-PB7)

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันพิเศษของ ขา PORTB (PB0-PB7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชันพิเศษ
PB7	OC2/OC1C (โมดูลเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM สำหรับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 หรือโมดูลเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM ช่อง C สำหรับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PB6	OC1B (โมดูลเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM ช่อง B สำหรับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PB5	OC1A (โมดูลเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM ช่อง A สำหรับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1)
PB4	OC0 (โมดูลเปรียบเทียบและสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM ช่อง B สำหรับไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 0)
PB3	MISO (ขาสัญญาณ อินพุตมาสเตอร์/เอาต์พุตสเลฟ สำหรับบัส SPI)
PB2	MOSI (ขาสัญญาณ เอาต์พุตสเลฟ/อินพุตมาสเตอร์ สำหรับบัส SPI)
PB1	SCK (ขาสัญญาณนาฬิกาสำหรับบัส SPI)
PB0	\overline{SS} (ขาสัญญาณอินพุตเลือกสเลฟ สำหรับบัส SPI)

ขา PORTB นอกจากจะใช้เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิทัลขนาด 8 บิตแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- ใช้เป็นขาพอร์ตสำหรับสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulator (PWM) 3 ช่องทางคือ A, B และ C ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ และใช้เป็นขาพอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกแบบอนุกรม (Serial Peripheral Interface) หรือที่นิยมเรียกว่าบัสแบบ SPI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

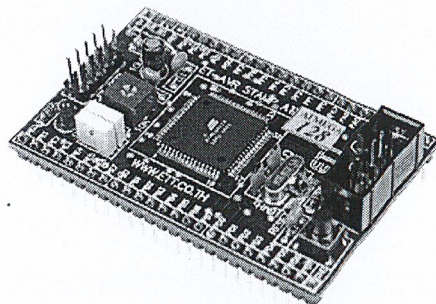
ขา PORTF (PF0-PF7)

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันพิเศษของ ขา PORTF (PF0-PF7)

ขาพอร์ต	ขาพอร์ตฟังก์ชันพิเศษ
PF7	ADC7/TDI (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 7 หรือขาทดสอบ JTAG สำหรับอินพุตข้อมูล)
PF6	ADC6/TDO (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 6 หรือขาทดสอบ JTAG สำหรับเอาต์พุตข้อมูล)
PF5	ADC5/TMS (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 5 หรือขาทดสอบ JTAG สำหรับเลือกโหมด)
PF4	ADC4/TCK (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 4 หรือขาทดสอบ JTAG สำหรับสัญญาณนาฬิกา)
PF3	ADC3 (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 3)
PF2	ADC2 (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 2)
PF1	ADC1 (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 1)
PF0	ADC0 (ขาอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่องที่ 0)

ขา PORTF นอกจากจะใช้เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิทัลขนาด 8 บิตแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- ขาพอร์ตสำหรับวงจร JTAG สำหรับการดีบักโปรแกรม
- ขาพอร์ตสำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต 8 ช่อง



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายของไมโครคอนโทรเลอร์รุ่น AVR เบอร์ ATmega128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital)

เนื่องจากว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากภาคขยายสัญญาณยังอยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อก (Analog) ดังนั้นจำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล (Digital) เสียก่อน เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประมวลผลได้ โดยหลักการของการแปลงสัญญาณอนาล็อกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 โดยสัญญาณอนาล็อกที่วัดได้จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ก่อนถูกแปลงด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในที่นี้มีอยู่แล้วในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ PORTF ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.14 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

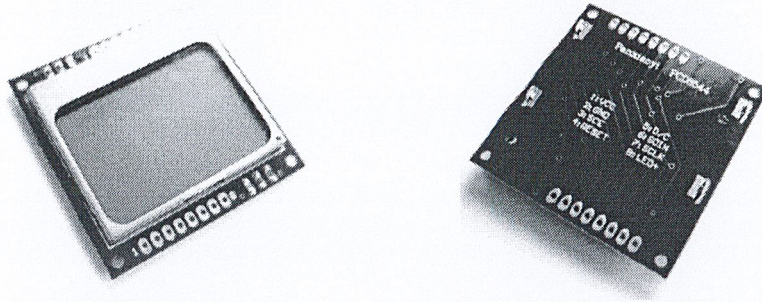
3.4 ส่วนแสดงผล (Display)

ส่วนของภาคแสดงผลจะใช้จอแสดงผลของ Nokia LCD 5110 แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นจอแสดงผลขนาดเล็กราคาถูกที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไป สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เป็นอย่างดี เขียนโปรแกรมควบคุมด้วยโมดูล SPI ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ซึ่งเป็นการสื่อสารข้อมูลอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 3-4 เส้น

คุณสมบัติของ LCD 5110

- หน้าจอแสดงผลความละเอียด 48x84 Dot
- ติดต่อสื่อสารแบบระบบบัสอนุกรม (Serial Bus Interface) ความเร็วสูงสุด 4.0 Mbits/S
- มีคอนโทรลเลอร์เบอร์ PCD8544 ภายในควบคุมการทำงาน
- มีหลอดไฟ Back Light
- ทำงานที่แรงดัน 2.7-5.0 โวลท์
- กินกำลังงานต่ำ เหมาะกับฟังก์ชันการใช้งานกับพวกแบตเตอรี่
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน -25 ถึง +70 องศาเซลเซียส

- มีคอนโทรลเลอร์เบอร์ PCD8544 ภายในควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายของจอแสดงผลของ Nokia LCD 5110

LCD 5110 เป็น LCD Graphic ขนาด 48x84 Dot ซึ่งมี Controller/Driver ภายใน คือ PCD8544 ทำหน้าที่ควบคุมการแสดงผล และการทำงานทั้งหมด

- การจัดการแอดเดรสของ LCD (Addressing)

ลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำที่แสดงผลบนหน้าจอ LCD (DRAM) จะจัดแบบเมตริก (Matrix) ประกอบด้วย แถว (Y Address) จำนวน 6 แถว ประกอบด้วย Y-Address 0 ถึง Y-Address 5 และทางด้านคอลัมน์ (X Address) จำนวน 84 คอลัมน์ ประกอบด้วย X-Address 0 ถึง X-Address 83 การเข้าถึงตำแหน่งการแสดงผลบนหน้าจอ LCD จะอาศัยความสัมพันธ์ของ X-Address และ Y-Address ประกอบกัน ส่วนข้อมูล (Data) ที่จะส่งไปแสดงผล จะมีขนาด 8 บิต (1 ไบต์) ซึ่งจะถูกวางในแนวตั้ง โดยบิต MSB จะอยู่ด้านข้าง และ LSB จะอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งของ MSB และ LSB ของข้อมูลขนาด 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ การเชื่อมต่อควบคุมจอแสดงผล LCD

การเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของ LCD จะเป็นแบบ อนุกรม โดยจะมี ขาสัญญาณต่างๆในการเชื่อมต่อดังนี้

ตารางที่ 3.3 หน้าที่การทำงานของขาสัญญาณของจอแสดงผล LCD

ชื่อขาสัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
1.Vcc	เป็นขาสัญญาณไฟเลี้ยงบวกใช้ได้ตั้งแต่ 2.7-5 VDC
2.GND	ขาสัญญาณกราวด์
3.SCE	ขาสัญญาณ Chip Enable ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของขาสัญญาณควบคุมต่างๆ
4.RESET	สัญญาณรีเซ็ตการทำงานของ LCD
5.D/C	เป็นขาสัญญาณที่ใช้กำหนดประเภทข้อมูล ระหว่าง ข้อมูล(Data) กับ คำสั่ง (Command)
6.SDIN	ขาสัญญาณข้อมูล (Serial Data Line)
7.SCLK	ขาสัญญาณนาฬิกา (Serial Clock Line)
8.LED	ขาสัญญาณควบคุมการทำงานของหลอดไฟ LED (Black Light)

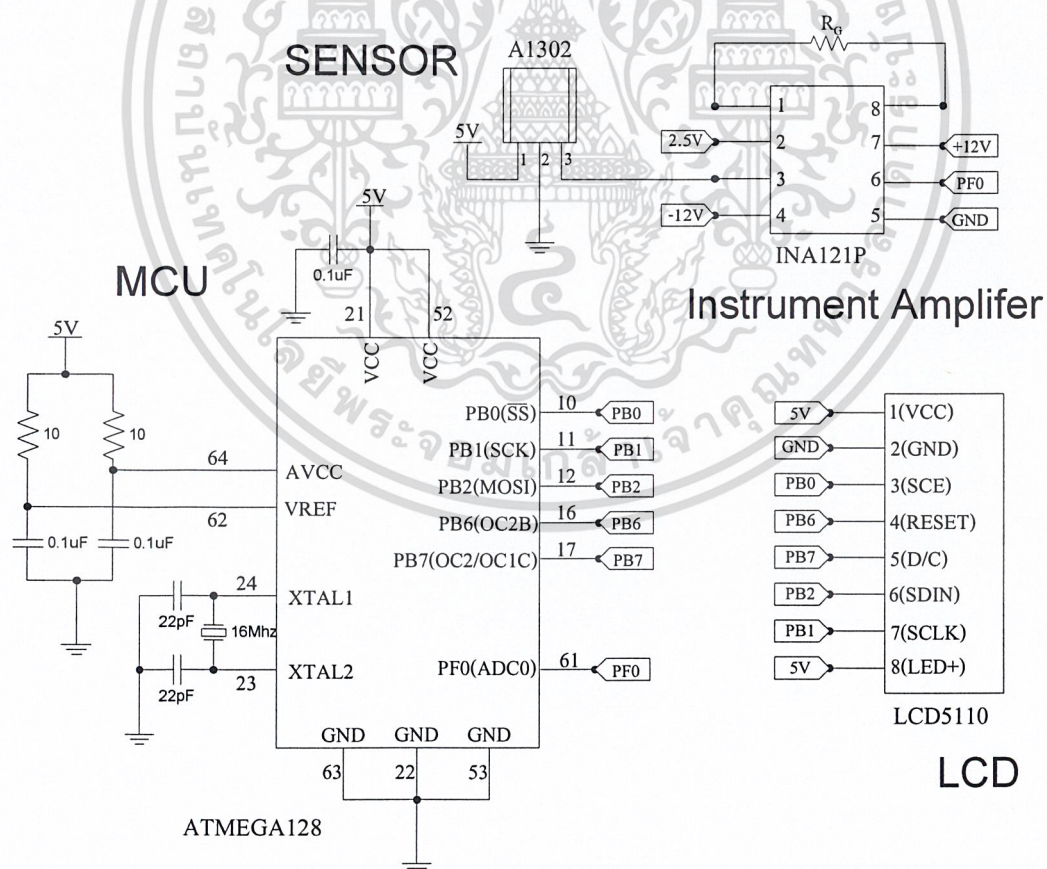
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการทดลอง การทำงานของเครื่องวัดกระแสไฟตรงจากเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบฮอลล์ โดยจะกล่าวถึงวิธีการทดลองและกระบวนการแปลงข้อมูลจากแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าตรง และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นเองกับแอมป์มิเตอร์ทั่วไป

4.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องวัดกระแสไฟตรง

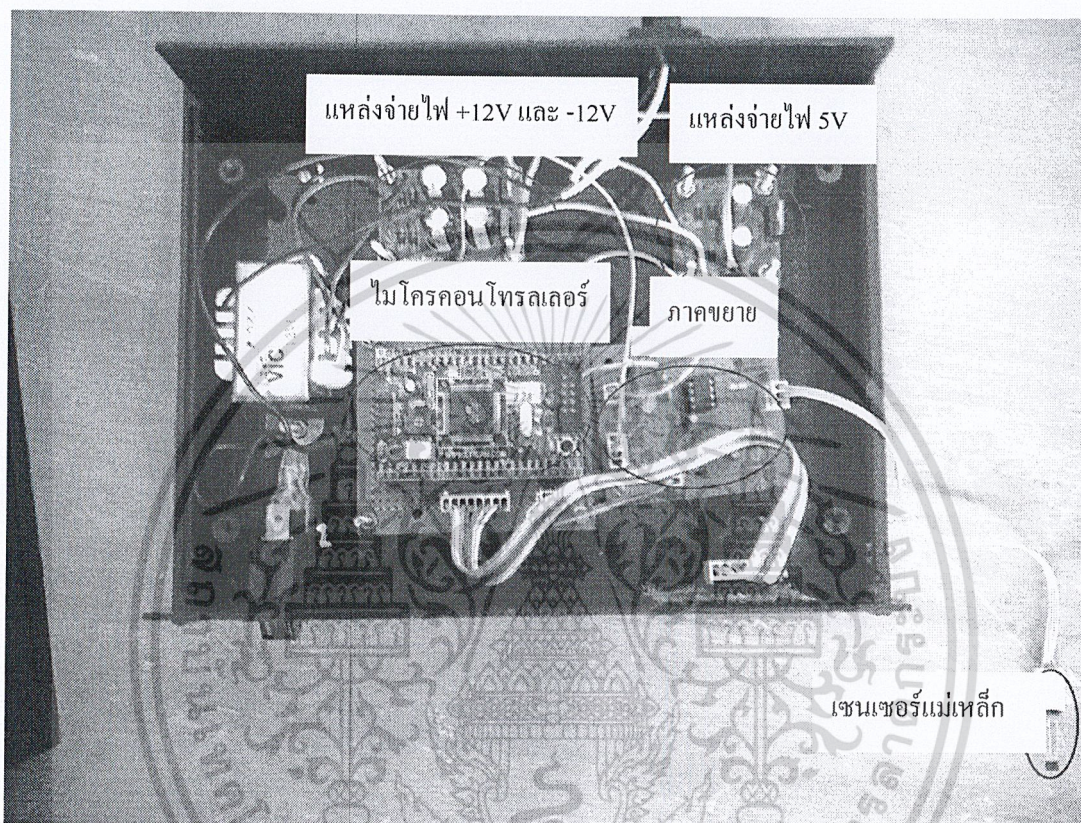
สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของเครื่องวัดกระแสไฟตรงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนของ 1.ฮอลล์เซ็นเซอร์ (ไอซีเบอร์ A1302) คือส่วนที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ สายไฟ 2. วงจรขยาย (ไอซีเบอร์ INA121P) คือส่วนที่ทำหน้าที่ในการขยาย -



รูปที่ 4.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของเครื่องวัดกระแสไฟตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์เพื่อให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น 3. หน่วยประมวลผล (ไอซีเบอร์ ATMEGA128) และ 4. ส่วนของการแสดงผล (LCD ของ NOKIA รุ่น 5110) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแสดงผลหรือโชว์ค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งรายละเอียดของส่วนต่าง ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3 โดยรูปถ่ายของเครื่องวัดกระแสไฟตรงแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้ตรง

4.2 การวัดผลการทดลอง

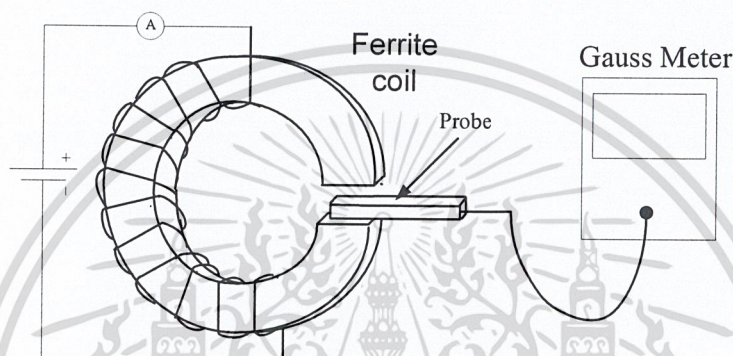
ในการวัดผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1).การวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเมื่อมีการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า (2).การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล และ (3).วิธีการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.1. วิธีการวัดสนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำรอบเส้นลวดตัวนำด้วยเกาส์มิเตอร์

การทดลองนี้เป็นการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำจากการให้กระแสไฟฟ้าให้แก่เส้นลวด เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

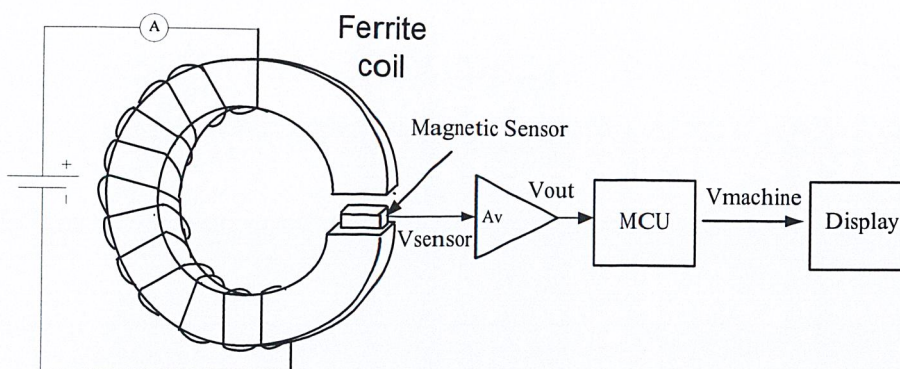
ในการทดลองจะทำการพันเส้นลวดตัวนำรอบแกนเฟอร์ไรต์ทั้งหมด 20 รอบเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้จะมีเส้นผ่านรัศมีเท่ากับ 1.02 cm และมีความกว้างของรอยบากเท่ากับ 1.57 mm ในการทดลองจะให้กระแสไหลผ่านเส้นลวดตั้งแต่ 0 – 2 A เนื่องจาก เราพันเส้นลวดรอบแกนเฟอร์ไรต์ทั้งหมด 20 รอบ ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้จะเป็น 20 เท่าของกระแสที่จ่ายให้แก่เส้นลวดตัวนำ โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ด้วยการใช้เกาส์มิเตอร์ สำหรับการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 4.3.1



รูปที่ 4.3 การวัดสนามแม่เหล็กภายในแกนเฟอร์ไรต์ด้วยเกาส์มิเตอร์ (Gauss meter)

4.2.2. วิธีการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร

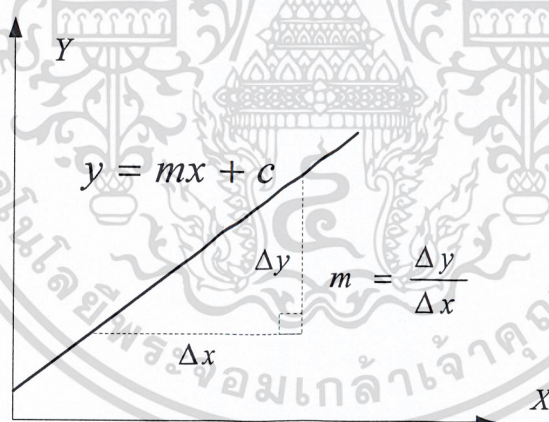
ในการทดลองจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของวงจรเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และความสะดวกในการนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล โดยในการทดลองจะเรียกแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่จุดต่างๆ ดังนี้ (1).แรงดันไฟฟ้า V_{Sensor} คือแรงดันไฟฟ้าที่วัดที่ขาเอาต์พุตของฮอลล์เซ็นเซอร์ (2).แรงดันไฟฟ้า V_{out} คือแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากขาเอาต์พุตของวงจรขยาย ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของสัญญาณ V_{Sensor} ตาม Gain ของวงจรขยายที่ตั้งไว้ และ (3).แรงดันไฟฟ้า V_{Machine} คือแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เรียบร้อยแล้ว ก่อนโชว์ค่าออกมาที่จอแสดงผล สำหรับตำแหน่งของแรงไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยในการทดลองจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) กับค่าแรงดันที่ได้จากเครื่อง (V_{Machine}) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลความผิดพลาดต่างๆ ต่อไป โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลแสดงในหัวข้อที่ 4.3.2



รูปที่ 4.4 การวัดแรงดัน ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร

4.2.3. วิธีการแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าตรง

เนื่องจากเซ็นเซอร์แม่เหล็กจะแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กออกมาในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นในขั้นตอนของการแสดงผลค่ากระแสที่วัดได้นั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องมีกระบวนการในการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ไปเป็นค่าของกระแส โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้า

นำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าของเส้นลวดตัวนำกับค่าแรงดันเอาต์พุตมาเขียนกราฟเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำ ต่อการเปลี่ยนค่าของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ โดยกราฟของผลการทดลองที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นดังรูปที่ 4.5 คือเมื่อให้กระแสเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการที่ 4.1

$$y = mx + c \quad (4.1)$$

$$V = mI + C \quad \text{หรือ} \quad I = (V - C)/m \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ y คือค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้, x คือค่าของกระแสที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำ, m คือความชันของเส้นกราฟ และ c คือจุดตัดแกน y ซึ่งเป็นค่าแรงดันเอาต์พุตที่สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ หรือสามารถเขียนสมการในรูปของแรงดันเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 4.2

ดังนั้นเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าแรงเอาต์พุตแล้วจะทำการแปลงเป็นค่าแรงดันที่อ่านได้หรือ $V_{Machine}$ พร้อมทั้งทำการแปลงให้เป็นค่ากระแสโดยการแทนค่าแรงดันลงไปนสมการที่ 4.2 และแสดงค่าออกมาทางจอแสดงผลต่อไป สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในหัวข้อที่ 4.3.3

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.3.1. ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

จากหัวข้อที่ 4.2.1 การวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำที่กระแสไฟฟ้าระหว่าง 0 – 40 A

I(A)	Magnetic field(Gauss)
0	5.10
5	44.57
10	90.03
15	131.33
20	169.91
25	213.33
30	261.02
35	285.33
40	341.67

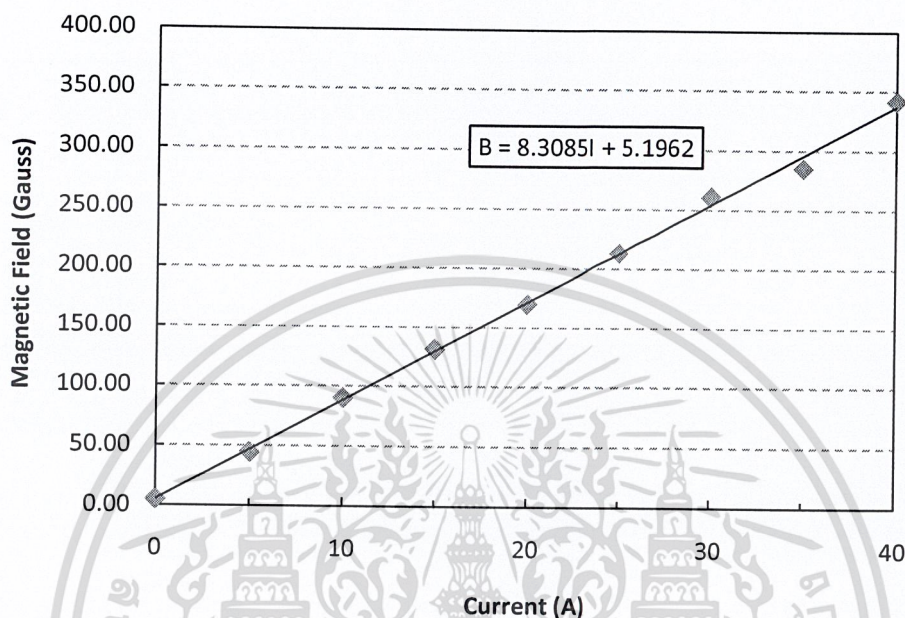
จากตารางที่ 4.1 เมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสต่างๆ สามารถนำไปเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำกับกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำได้ดังกราฟในรูปที่ 4.6 จากกราฟที่ได้นั้นจะพบว่า เมื่อให้กระแสแก่เส้นลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$B = \mu_0 I / G \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากกราฟเราสามารถหาสมการเชิงเส้นของเส้นกราฟได้ดังสมการที่ 4.4

$$B = 8.3085 \cdot I + 5.1962 \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำ

จากทั้งสมการที่ 4.3 และ 4.4 ทำให้สามารถนำไปคำนวณหาค่าของความซึมซาบทางแม่เหล็ก (μ_0) ในอากาศของแกนเฟอร์ไรต์ได้ เมื่อรู้ค่าระยะของช่องว่าง (Gap) หรือระยะรอยบากของแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งในการทดลองนี้สามารถคำนวณหาค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กในอากาศของแกนเฟอร์ไรต์ได้เท่ากับ 13.04×10^{-7} H/m ซึ่งความผิดพลาดจากค่าจริงอยู่ประมาณ 1.1%

4.3.2. การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในเส้นลวด

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ 1.แรงดัน V_{Sensor} เป็นแรงดันที่ขาเอาต์พุตของฮอลล์เซ็นเซอร์ 2.แรงดัน V_{Out} เป็นแรงดันที่ขาเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ และ 3.แรงดัน V_{Machine} เป็นแรงดันที่เครื่องอ่านค่าได้และแสดงทางจอแสดงผล

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดัน V_{Sensor} กับ V_{Out} จะพบว่า V_{Out} จะมีค่าประมาณ 20 เท่าของ V_{Sensor} ซึ่งตรงกับอัตราขยายของ Gain ที่ตั้งไว้

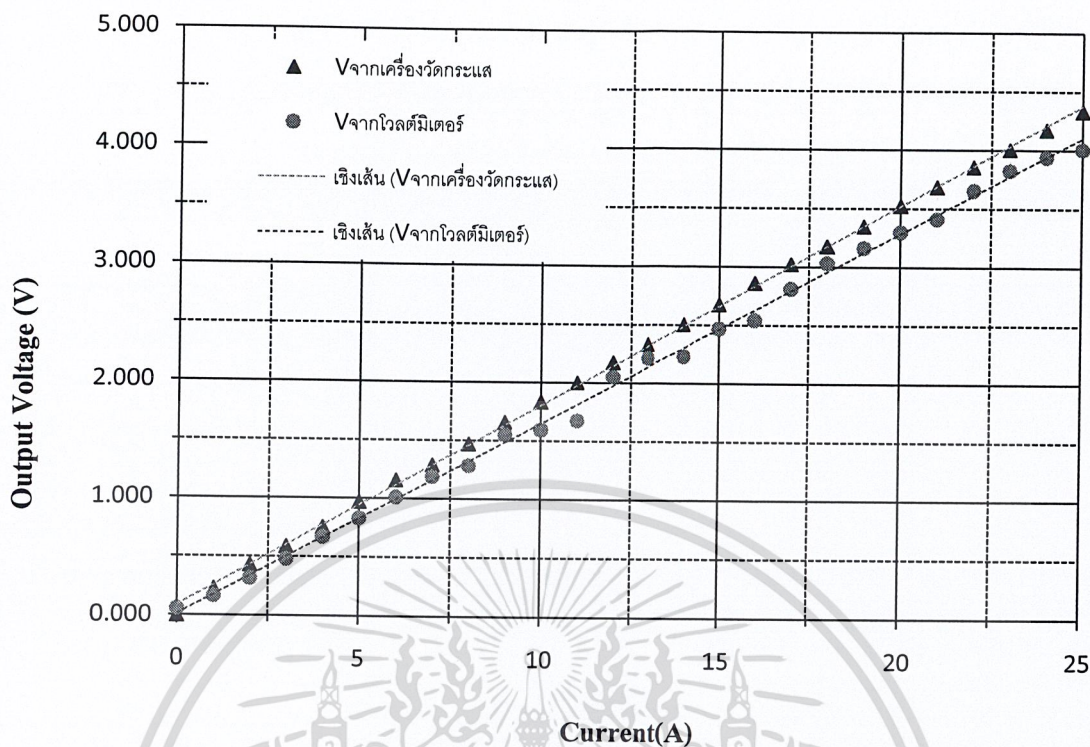
เมื่อนำค่าแรงดันเอาต์พุตกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากเครื่องวัด มาเขียนกราฟระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากกราฟที่ได้พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่อ่านได้จากมิเตอร์ (V_{Out}) เปรียบเทียบกับค่าที่เครื่องสร้างขึ้นอ่านได้ (V_{Machine}) นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

โดยความ คลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น นั้นเนื่องจากส่วนของวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียดต่ำคือ 10 ระดับ (A/D 10 bit) ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่รับเข้ามาได้ และอีกส่วนหนึ่งคือเกิดจากสัญญาณรบกวนภายนอกที่มีผลต่อเซ็นเซอร์และวงจรการวัดเช่น แสง อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดัน ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

I (A)	V _{Sensor} (V)	V _{Out} (V)	V _{Machine} (V)
0	0.003	0.059	0.016
1	0.008	0.166	0.230
2	0.015	0.315	0.430
3	0.023	0.478	0.587
4	0.032	0.668	0.753
5	0.041	0.831	0.970
6	0.047	1.011	1.158
7	0.058	1.192	1.290
8	0.063	1.287	1.470
9	0.077	1.552	1.660
10	0.078	1.596	1.835
11	0.091	1.678	2.002
12	0.102	2.056	2.177
13	0.104	2.219	2.335
14	0.112	2.232	2.506
15	0.117	2.471	2.677
16	0.128	2.544	2.862
17	0.142	2.812	3.023
18	0.151	3.037	3.176
19	0.157	3.163	3.347
20	0.164	3.302	3.523
21	0.171	3.415	3.685
22	0.181	3.655	3.856
23	0.190	3.828	4.004
24	0.195	3.940	4.175
25	0.199	4.013	4.332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{Out} , $V_{Machine}$) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำ

4.3.3. เปรียบเทียบกระแสที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นกับแอมป์มิเตอร์ทั่วไป

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกระแสที่ให้แก่เส้นลวดตัวนำกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ ซึ่งเมื่อนำมาพลอตกราฟระหว่างแรงดันกับกระแส และหาสมการเชิงเส้นของกราฟจะได้ดังสมการที่ 4.5 คือ

$$V = 0.164 * I + 0.013 \quad (4.5)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่อีกรูปหนึ่งคือ

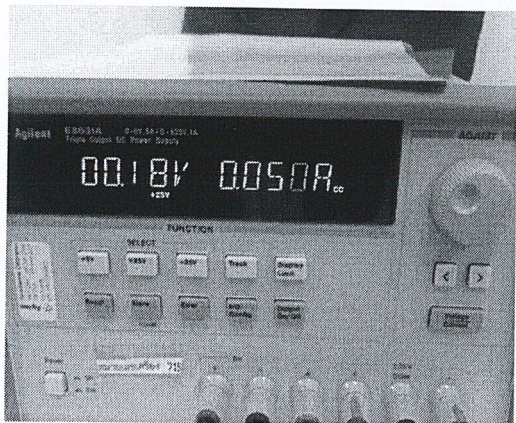
$$I = (V - 0.013) / 0.164 \quad (4.6)$$

จากสมการที่ 4.6 คือ เมื่อรู้ค่าแรงดันเอาต์พุตจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าของกระแสได้ ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านค่าแรงดันที่ขาอินพุต แล้วนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ไปคำนวณเป็นค่ากระแสดังสมการที่ 4.6 โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

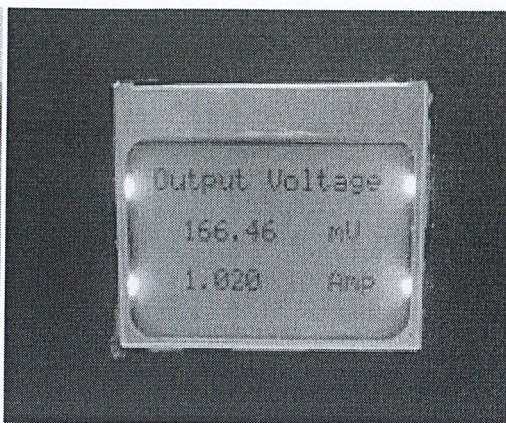
ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดกระแสกับค่ากระแสที่ป้อนให้แก่เส้นลวดตัวนำ

I(meter) (A)	I(machine) (A)	error %
1	1.08	8.00
2	2.18	9.00
3	3.26	8.67
4	4.37	9.25
5	5.41	8.20
6	6.49	8.17
7	7.57	8.14
8	8.62	7.75
9	9.78	8.67
10	10.89	8.90
11	11.85	7.73
12	13.07	8.92
13	14.06	8.15
14	15.14	8.14
15	16.22	8.13
16	17.24	7.75
17	18.37	8.06
18	19.36	7.56
19	20.47	7.74
20	21.50	7.50

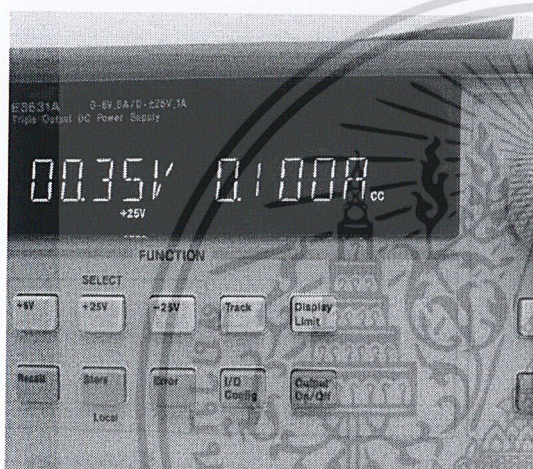
จากตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสที่อ่านได้จากเครื่องวัดกระแสกับค่ากระแสที่ป้อนให้แก่เส้นลวดตัวนำ โดยทำการจ่ายกระแสให้แก่เส้นลวดตั้งแต่ 0 – 20 A จากผลการทดลอง กระแสที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า เครื่องวัดกระแสไฟตรงมีความสามารถในการวัดกระแสในช่วงที่กว้าง โดยวัดได้ตั้งแต่กระแสที่มีค่าต่ำไปจนถึงกระแสที่มีค่าสูง และมีความแม่นยำในการวัดอยู่ในเกณฑ์ดี



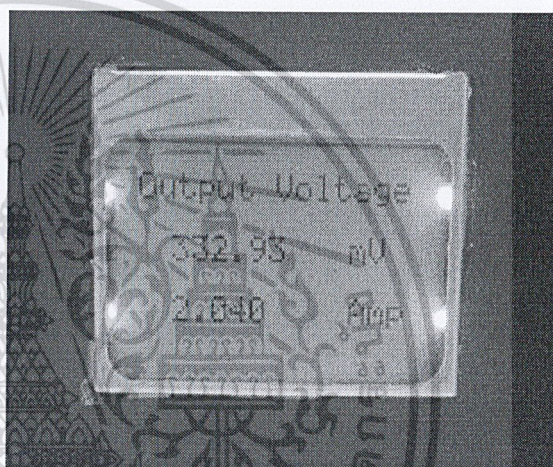
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.8 รูปถ่ายเปรียบเทียบกระแสที่จ่ายจากเครื่องจ่ายกระแสกับกระแสที่วัดได้จากเครื่องวัดกระแสที่สร้างขึ้น (ก), (ข) เมื่อจ่ายกระแสเท่ากับ 0.05 A และ (ค), (ง) เมื่อจ่ายกระแสเท่ากับ 0.10 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

เครื่องวัดกระแสไฟตรงจากเซนเซอร์แม่เหล็กเป็นการนำเซนเซอร์แม่เหล็กมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดกระแสไฟตรง โดยใช้หลักการจากกฎของแอมแปร์คือ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำ พบว่าทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำนั้น ทำให้เราสามารถนำเซนเซอร์แม่เหล็กไปตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้

นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบวงจรเพื่อนำไปต่อร่วมกับเซนเซอร์แม่เหล็กเพื่อนำไปสร้างเป็นเครื่องวัดกระแสไฟตรง โดยวงจรที่ออกแบบประกอบด้วยส่วนของวงจรรขยายสัญญาณ ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม

โครงการนี้ทำให้ทราบว่าเครื่องวัดกระแสที่สร้างขึ้นสามารถวัดกระแสได้ในช่วงการวัดที่กว้าง โดยวัดกระแสที่มีค่าต่ำไปจนถึงกระแสที่มีค่าสูงได้ มีความแม่นยำในการวัดเป็นที่น่าพอใจอยู่ในเกณฑ์ที่ดี มีค่าใกล้เคียงกับความจริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องวัดกระแสที่สร้างขึ้นสามารถวัดกระแสได้โดยไม่ต้องไปยุ่งเกี่ยวกับระบบที่ทำการวัด สามารถใช้งานได้จริง และมีราคาถูกกว่าเครื่องแอมป์มิเตอร์ที่ขายทั่วไปตามท้องตลาด

บรรณานุกรม

- [1] Boll. R and Overshott KT (1998) Sensors: A Comprehensive Survey, vol. 5: Magnetic Sensors (eds.w.Gopel, J. Hesse and J.N.Zemel), VCH Publishers In, Germany, 513 pp.
- [2] Julian W. Gardner, Microsensors Principles and Application, John Wiled & Sons, Chichester, 1994, Ch. 8, pp. 199-220.
- [3] รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [4] H. P. Baltes and R. S. Popovic, “Integrated semiconductor magnetic field sensors, ” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 74, p.1107, 1986.
- [5] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P.Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, “Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect”, IEEE Sensor -Journal, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.
- [6] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N.Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C.Hruanun and A. Poyai, “The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology”, ECTI-CON Association, pp.219, 2010]
- [7] E.Ramsden, “Hall – Effect Sensors Theory and Applications”, pp133,142,148, 2006
- [8] <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/physician/ampere/amprule.htm>





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมใช้งาน

```
#include <avr/io.h> // AVR device-specific IO definitions
#include <avr/interrupt.h> // Interrupt Service routine

#define F_CPU 16000000UL // 16 MHz
#include <util/delay.h> // header file implement simple delay loops

#define Vadc 1024 // 1024 (10-bit Resolution)

#include <stdio.h>
#include <stdarg.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include "mydefs.h"

#include "lcd.h"
#include "printf.h"
#include "serial.h"

/*****delay_ms*/
void delay_ms(uint8_t i)
{
    for (;i>0;i--)
        _delay_ms(1);
}

/*****Main Function*/
int main(void)
{
    unsigned int adc, adcv;
    unsigned int adc_str;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned char ch_adc=0x00;

double volt=0, current;

double volt1=0;

char buffer[8];

char bufferi[8];

int i, j;

DDRF=0x00; //PortF input
PORTF=0x00;

ser_init();

sei ();

port_init();

lcd_init ();

lcd_gotoxy (0,0);
lcd_printf ("Output Voltage",0);

lcd_gotoxy (65,2);
lcd_printf ("mV",0);

lcd_gotoxy (65,4);
lcd_printf ("Amp",0);

// ADC Enable & Auto Trigger Disable
ADCSRA |= (1<<ADEN);
ADCSRA |= (1<<ADPS2)|(0<<ADPS1)|(0<<ADPS0); // XTAL/16

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while (1)
{

// AVCC with external capacitor at AREF pin
// Select Analog Channel
ADMUX = (0<<REFS1)|(1<<REFS0)|ch_adc;

//loop 8 for sampling
for(j=0;j<8;j++)
{
ADCSRA |= (1<<ADSC); // ADC Start Conversion
while (!(ADCSRA &(1<<ADIF))); // Wait conversion completes
adc += ADCW;
delay_ms(100);
}
adcv = (adc/8); // V/8
volt = adcv*4.624;
current = (6.1312*volt - 0.1073)/1000;

sprintf(buffer,"%4.2f",volt);

sprintf(bufferi,"%4.2f",current);

lcd_gotoxy (10,2);
lcd_printf (buffer,0);

lcd_gotoxy (10,4);
lcd_printf (bufferi,0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        delay_ms(1600);                // Delay 1.6s
        adc =0;
    }

    return 0;
}

```

โปรแกรมใช้งาน LCD

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <stdio.h>
#include <stdarg.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

#include "lcd.h"
#include "mydefs.h"
#include <util/delay.h>

#include "serial.h"
#include "printf.h"
#include "font.h"
#include "lcd.h"

//-----//
void lcd_write (uint8_t dat)
{
#ifdef SPI
    SPDR= dat;
    while (!(SPSR & _BV(SPIF)));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#else
    uint8_t i;

    for (i = 0; i < 8; i++)
    {
/*
    J.Nut note
    just to set bit out before set clock
    if you set clock before set bit io,,,,, it can't work
*/

        if (dat & 0x80)
        {
            LCD_PORT |= _BV(LCD_MOSI);
        }
        else
        {
            LCD_PORT &= ~_BV(LCD_MOSI);
        }
        LCD_PORT |= _BV(LCD_SCK);
        asm("nop");
        LCD_PORT &= ~_BV(LCD_SCK);
        dat = dat << 1;
    }

#endif
}

//-----//

void nokia_lcd_wrdat (uint8_t dat)
{
    LCD_PORT &= ~_BV(LCD_CS);    // select display
    LCD_PORT |= _BV(LCD_RS);    // set RS line

    lcd_write(dat);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCD_PORT |= _BV(LCD_CS);      // deselect display
}
//-----//
void nokia_lcd_wrcmd (uint8_t dat)
{
LCD_PORT &= ~_BV(LCD_CS);    // select display
LCD_PORT &= ~_BV(LCD_RS);    // clear RS line (data transfer mode)
lcd_write(dat);
LCD_PORT |= _BV(LCD_CS);     // deselect display
}
//-----//
void nokia_lcd_putchar (uint8_t str,uint8_t type)
{
uint8_t dat,i = 0;
while (i < FONT_WIDTH)
{
dat = font[((str-32)*5)+i];
if (type)
dat = ~dat;

nokia_lcd_wrd (dat);
i++;
}
dat = 0x00;
if (type)
dat = 0xff;

nokia_lcd_wrd (dat); // 1 culume for space between charactor
};
//-----//

```

```

void lcd_gotoxy(uint8_t x, uint8_t y) //Nokia LCD 3310 Position cursor

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
nokia_lcd_wrcmd (x + 128);           // Y axis initialisation: 0100 0yyy
nokia_lcd_wrcmd (y + 64);           // X axis initialisation: 1xxx xxxx
}

//-----//

void nokia_cls (void)
{
    uint16_t ddram;

    lcd_gotoxy(0,0);                 // 84*6=504   clear LCD

    for (ddram=504;ddram>0;ddram--)
        nokia_lcd_wrdm (0x00);
}

//-----//

void lcd_printf (uint8_t *string, uint8_t type)
{
    uint8_t i = 0,n;

    n = strlen (string);

    while (i < n)
    {
        nokia_lcd_putchar (string[i],type);
        i++;
    }
}

//-----//

void lcd_init (void)
{

```

LCD_PORT |= _BV(LCD_CS); // CS is high

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCD_PORT |= _BV(LCD_RS); // RS is set to high
LCD_PORT &= ~_BV(LCD_RESET); // reset display
_delay_ms(10);

LCD_PORT |= _BV(LCD_RESET); // release reset

nokia_lcd_wrcmd (0x21);
nokia_lcd_wrcmd (0xC2);
nokia_lcd_wrcmd (0x13);
nokia_lcd_wrcmd (0x20);
nokia_lcd_wrcmd (0x09);

// clean DDRAM here
nokia_cls ();
nokia_lcd_wrcmd (0x08);
nokia_lcd_wrcmd (0x0C);
};
// end of file
//-----//
void port_init(void)
{
    LCD_DDR = (_BV(LCD_RESET) | _BV(LCD_MOSI) | _BV(LCD_CS) | _BV(LCD_SCK) |
_BV(LCD_RS));
#ifdef    SPI
    uint8_t tmp;

    // setup SPI Interface
    SPCR = _BV(MSTR) | _BV(SPE) | _BV(SPR0);
    SPSR = 1; // double speed bit
    tmp=SPSR;
#else
    LCD_PORT |= _BV(LCD_RESET);
#endif }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมใช้งาน serial port

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <stdarg.h>
#include <string.h>
#include <avr/pgmspace.h>

#include "mydefs.h"
#include "serial.h"
#include <util/delay.h>

#define RBUFLEN 16

volatile unsigned char rbuf[RBUFLEN]; //Ringpuffer
volatile unsigned char rcnt, rpos, recbuf;
volatile unsigned char busy;

SIGNAL(SIG_UART0_RECEIVE) /* signal handler for receive complete interrupt */
{
    recbuf= UART0_RECEIVE_REGISTER; //Byte auf jeden Fall abholen, sonst Endlosinterrupt

    /* don't overwrite chars already in buffer */
    if(rcnt < RBUFLEN)
        rbuf[(rpos+rcnt++) % RBUFLEN] = recbuf;
}

//-----//

SIGNAL(SIG_UART0_TRANSMIT) /* signal handler for transmit complete interrupt */
{
    DISABLE_UART0_TRANSMIT_INT; //ATmega Disable Transmit complete interrupt löschen

    busy=0; //Byte gesendet Flag rücksetzen
```

```

}

//-----//
unsigned char ser_getc (void)
{
unsigned char c;

while(!rcnt) {}; /* wait for character */

DISABLE_UART0_TRANSMIT_INT; //ATmega Disable Receiveinterrupt

rcnt--;
c = rbuf[rpos++];
if (rpos >= RBUFLen)
rpos = 0;

ENABLE_UART0_RECEIVE_INT; //ATmega Enable Receiveinterrupt

return (c);
}

//-----//
void ser_putc(unsigned char c)
{
while(busy==1);

ENABLE_UART0_TRANSMIT_INT; //ATmega Enable Transmit complete interrupt erlauben
UART0_TRANSMIT_REGISTER=c; //Byte in Sendepuffer

busy = 1;
}

//-----//

```

// Transmit string from RAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void ser_puts(unsigned char * s)
{
    unsigned char c;

    while((c=*s++))
    {
        if(c == '\n') //CR und LF senden bei \n
        {
            ser_putc(0x0D); //CR
            ser_putc(0x0A); //LF
        }
        else ser_putc(c);
    }
}

//-----//
// Transmit string from FLASH
void _serputs_P(char const *s)
{
    unsigned char c;

    while((c=pgm_read_byte(s++)))
    {
        if(c == '\n') //CR und LF senden bei \n
        {
            ser_putc(0x0D); //CR
            ser_putc(0x0A); //LF
        }
        else ser_putc(c);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//void new_line( void) { sendstring("\n\r"); }
//-----//
void ser_init(void)
{

    rent = rpos = 0; /// init buffers
    busy = 0;

    sbi(TX0_DDR,TX0_BIT); //TxD output
    sbi(TX0_PORT,TX0_BIT); //set TxD to 1

    // enable RxD/TxD and ints
        UART0_CONFIGURE1; // See serial.h
        UART0_CONFIGURE2; // See serial.h

        UART0_BAUD_REGISTER_HIGH=(unsigned char)(UART_BAUD_SELECT>>8); //
set baudrate
        UART0_BAUD_REGISTER_LOW=(unsigned char)(UART_BAUD_SELECT);
        // set baudrate

}
//-----//
void ser_puthex(unsigned char by)
{
    unsigned char buff;

    buff=by>>4; //Highnibble zuerst
    if(buff<10) buff+='0'; //ASCII Code erzeugen
    else buff+=0x37;    //Großbuchstaben
    ser_putc(buff);

    buff=by&0x0f; //Danach das Lownibble

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(buff<10) buff+='0'; //ASCII Code erzeugen
else buff+=0x37;    //Großbuchstaben
ser_putc(buff);
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

Data sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Features and Benefits

- Low-noise output
- Fast power-on time
- Ratiometric rail-to-rail output
- 4.5 to 6.0 V operation
- Solid-state reliability
- Factory-programmed at end-of-line for optimum performance
- Robust ESD performance

Packages: 3 pin SOT23W (suffix LH), and 3 pin SIP (suffix UA)



Not to scale

Description

The A1301 and A1302 are continuous-time, ratiometric, linear Hall-effect sensors. They are optimized to accurately provide a voltage output that is proportional to an applied magnetic field. These devices have a quiescent output voltage that is 50% of the supply voltage. Two output sensitivity options are provided: 2.5 mV/G typical for the A1301, and 1.3 mV/G typical for the A1302.

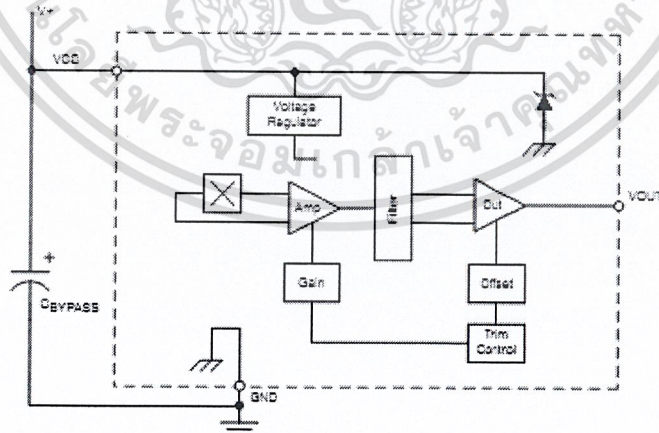
The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall sensing element, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall sensing element and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog signals.

High precision in output levels is obtained by internal gain and offset trim adjustments made at end-of-line during the manufacturing process.

These features make the A1301 and A1302 ideal for use in position sensing systems, for both linear target motion and rotational target motion. They are well-suited for industrial applications over extended temperature ranges, from -40°C to 125°C .

Two device package types are available: LH, a 3-pin SOT23W type for surface mount, and UA, a 3-pin ultramini SIP for through-hole mount. They are lead (Pb) free (suffix, -T) with 100% matte tin plated leadframes.

Functional Block Diagram



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Selection Guide					
Part Number	Pb-free ¹	Packing ²	Package	Ambient, T _A	Sensitivity (Typical)
A1301ELHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 85°C	2.5 mV/G
A1301EUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1301KLHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1301KUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1302ELHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 85°C	1.3 mV/G
A1302EUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1302KLHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1302KUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		

¹Pb-based variants are being phased out of the product line. Certain variants cited in this footnote are no longer in production. The variants should not be purchased for new design applications. Samples are no longer available. Status change: May 1, 2006. These variants include: A1301ELHLT, A1301EUA, A1301KLHLT, A1301KUA, A1302ELHLT, A1302EUA, A1302KLHLT, and A1302KUA.

²Contact Allegro for additional packing options.



Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V _{CC}		8	V
Output Voltage	V _{OUT}		8	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Output Sink Current	I _{OUT}		10	mA
Operating Ambient Temperature	T _A	Range E	-40 to 85	°C
		Range K	-40 to 125	°C
Maximum Junction Temperature	T _{J(max)}		165	°C
Storage Temperature	T _{STG}		-65 to 170	°C



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutler, Box 15028
Worcester, Massachusetts 01815-0028 (508) 853-5000
www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVICE CHARACTERISTICS over operating temperature range, T_A , and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Electrical Characteristics						
Supply Voltage	V_{CC}	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(HIGH)}$	$I_{SOURCE} = -1\text{ mA}$, Sens = nominal	4.65	4.7	–	V
	$V_{OUT(LOW)}$	$I_{SINK} = 1\text{ mA}$, Sens = nominal	–	0.2	0.25	V
Output Bandwidth	BW		–	20	–	kHz
Power-On Time	t_{PO}	$V_{CC(MIN)}$ to $0.95 V_{OUT}$, $B = \pm 1400\text{ G}$; Slew rate = $4.5\text{ V}/\mu\text{s}$ to $4.5\text{ V}/100\text{ ns}$	–	3	5	μs
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{SINK} \leq 1\text{ mA}$, $I_{SOURCE} \geq -1\text{ mA}$	–	2	5	Ω
Wide Band Output Noise, rms	V_{OUTN}	External output low pass filter $\leq 10\text{ kHz}$; Sens = nominal	–	150	–	μV
Ratiometry						
Quiescent Output Voltage Error with respect to ΔV_{CC} ¹	$\Delta V_{OUTQ(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to ΔV_{CC} ²	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Output						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 2.5	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Characteristics						
Quiescent Output Voltage	V_{OUTQ}	$B = 0\text{ G}$; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(ATA)}$	$B = 0\text{ G}$	2.2	–	2.8	V
Magnetic Sensitivity	Sens	A1301; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.0	2.5	3.0	mV/G
		A1302; $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.0	1.3	1.6	mV/G
Magnetic Sensitivity over Operating Temperature Range	$\text{Sens}_{(ATA)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

¹Refer to equation (4) in Ratiometric section on page 4.

²Refer to equation (5) in Ratiometric section on page 4.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristic Definitions

Quiescent Output Voltage. In the quiescent state (no significant magnetic field: $B = 0$), the output, V_{OUTQ} , equals one half of the supply voltage, V_{CC} , throughout the entire operating ranges of V_{CC} and ambient temperature, T_A . Due to internal component tolerances and thermal considerations, there is a tolerance on the quiescent output voltage, ΔV_{OUTQ} , which is a function of both ΔV_{CC} and ΔT_A . For purposes of specification, the quiescent output voltage as a function of temperature, $\Delta V_{OUTQ}(\Delta T_A)$, is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ}(\Delta T_A) = \frac{V_{OUTQ}(T_A) - V_{OUTQ}(25^\circ\text{C})}{\text{Sens}(25^\circ\text{C})} \quad (1)$$

where Sens is in mV/G, and the result is the device equivalent accuracy, in gauss (G), applicable over the entire operating temperature range.

Sensitivity. The presence of a south-polarity ($-B$) magnetic field, perpendicular to the branded face of the device package, increases the output voltage, V_{OUT} , in proportion to the magnetic field applied, from V_{OUTQ} toward the V_{CC} rail. Conversely, the application of a north polarity ($+B$) magnetic field, in the same orientation, proportionally decreases the output voltage from its quiescent value. This proportionality is specified as the magnetic sensitivity of the device and is defined as:

$$\text{Sens} = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUT(-B)}}{2B} \quad (2)$$

The stability of the device magnetic sensitivity as a function of ambient temperature, $\Delta \text{Sens}(\Delta T_A)$ (%) is defined as:

$$\Delta \text{Sens}(\Delta T_A) = \frac{\text{Sens}(T_A) - \text{Sens}(25^\circ\text{C})}{\text{Sens}(25^\circ\text{C})} \times 100\% \quad (3)$$

Ratiometric. The A1301 and A1302 feature a ratiometric output. This means that the quiescent voltage output, V_{OUTQ} , and the magnetic sensitivity, Sens, are proportional to the supply voltage, V_{CC} .

The ratiometric change (%) in the quiescent voltage output is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ}(\Delta V) = \frac{V_{OUTQ}(V_{CC}) / V_{OUTQ}(5V)}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (4)$$

and the ratiometric change (%) in sensitivity is defined as:

$$\Delta \text{Sens}(\Delta V) = \frac{\text{Sens}(V_{CC}) / \text{Sens}(5V)}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (5)$$

Linearity and Symmetry. The on-chip output stage is designed to provide linear output at a supply voltage of 5 V. Although the application of very high magnetic fields does not damage these devices, it does force their output into a nonlinear region. Linearity in percent is measured and defined as:

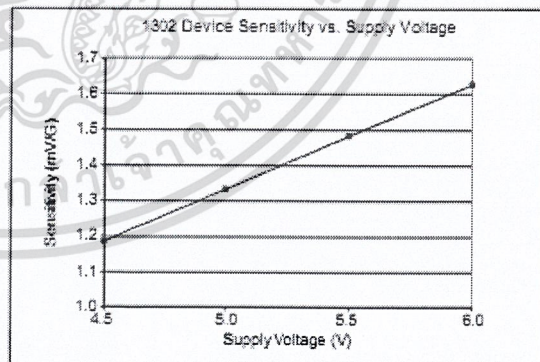
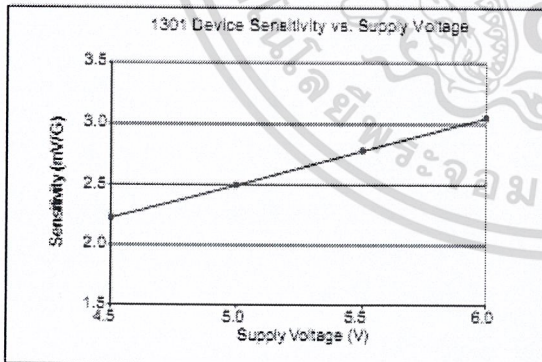
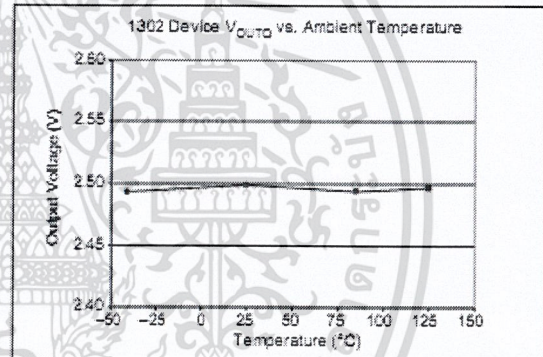
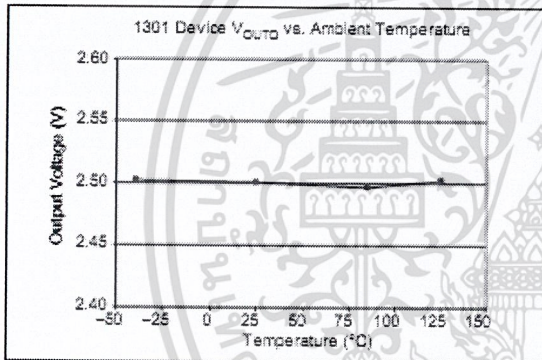
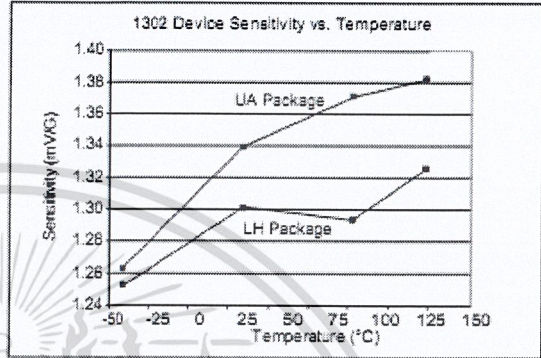
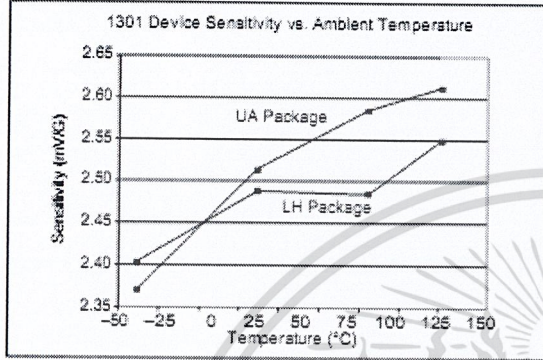
$$Lin+ = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

$$Lin- = \frac{V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (7)$$

and output symmetry as:

$$\text{Sym} = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$

Typical Characteristics
(30 pieces, 3 fabrication lots)

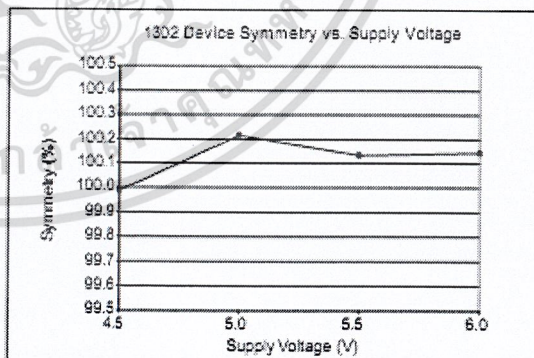
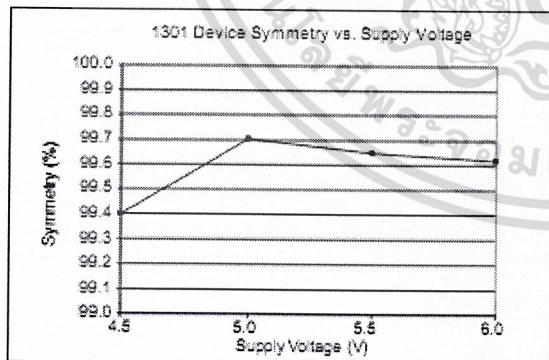
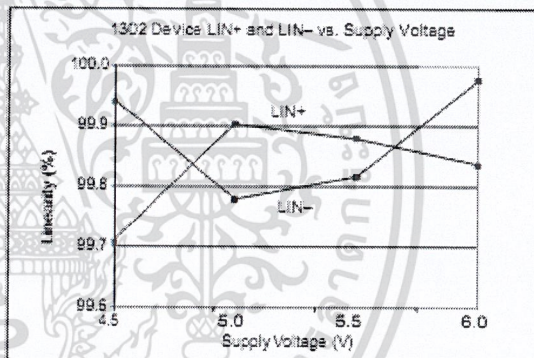
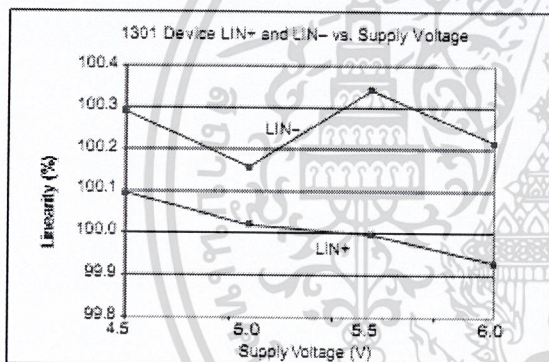
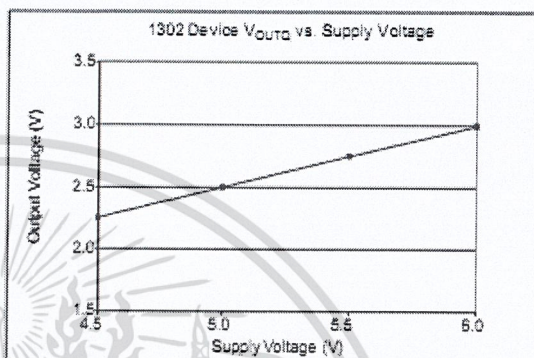
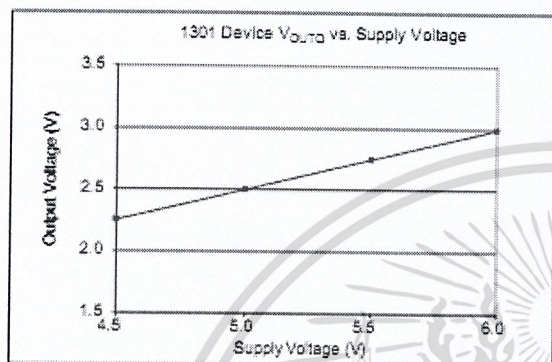


Continued on the next page...

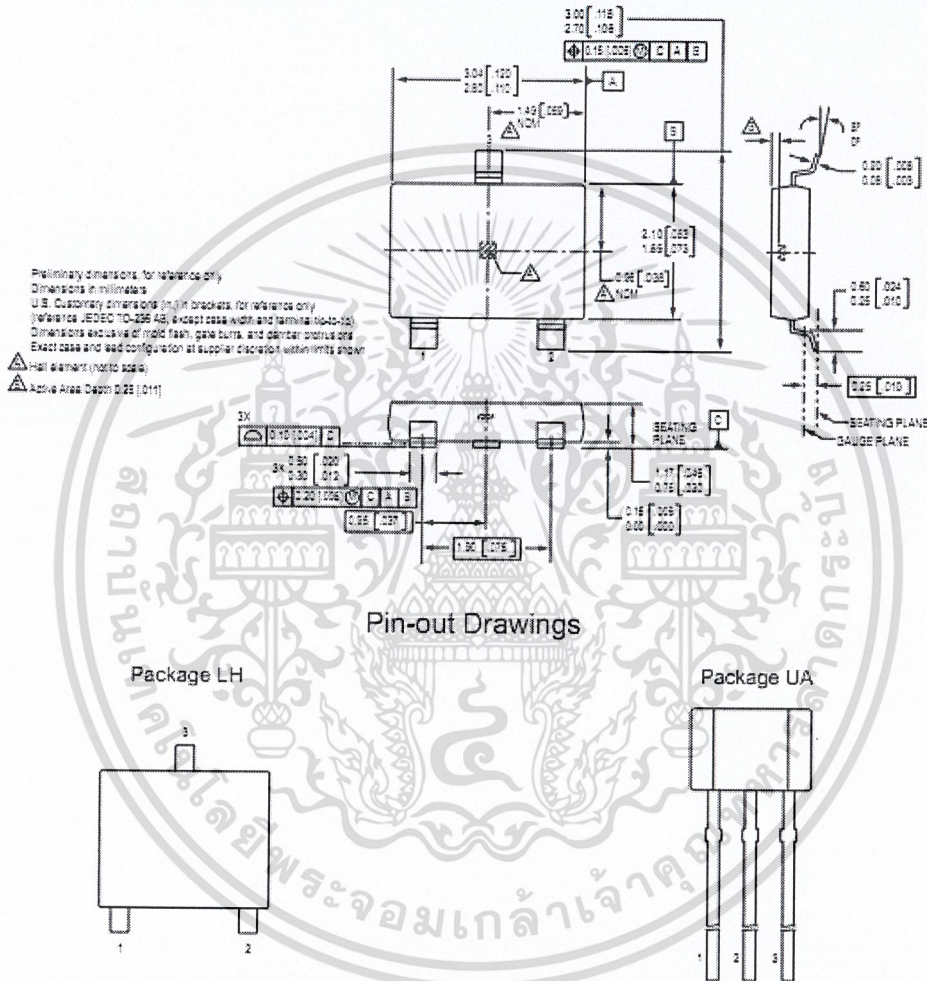


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Characteristics, continued
(30 pieces, 3 fabrication lots)



Package LH, 3-Pin; (SOT-23W)



Terminal List

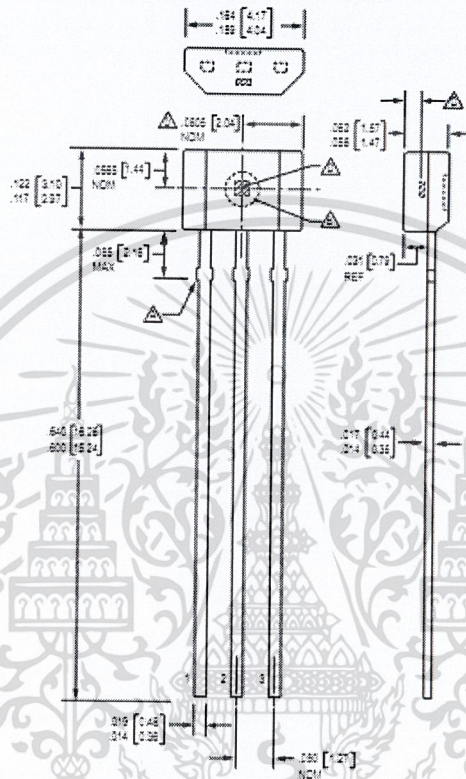
Symbol	Number		Description
	Package LH	Package UA	
VCC	1	1	Connects power supply to chip
VOU	2	3	Output from circuit
GND	3	2	Ground



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutler, Box 18008
Worcester, Massachusetts 01515-0026 (508) 953-5000
www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package UA, 3-Pin SIP



Dimensions in notes
Not dimensions from crosshairs for tolerance only

- ▲ Diameter/round protrusion (Ø)
- ▲ Ejector mark on opposite side
- ▲ Active Area Depth: .095 to .097 NOM
- ▲ Full element (not to scale)

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

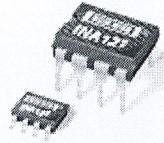
Allegro products are not authorized for use as critical components in life-support devices or systems without express written approval.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

Copyright © 2005, 2006 Allegro MicroSystems, Inc.



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 18028
Worcester, Massachusetts 01616-0028 (508) 853-8000
www.allegromicro.com



FET-Input, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- **LOW BIAS CURRENT:** $\pm 4\text{pA}$
- **LOW QUIESCENT CURRENT:** $\pm 450\mu\text{A}$
- **LOW INPUT OFFSET VOLTAGE:** $\pm 200\mu\text{V}$
- **LOW INPUT OFFSET DRIFT:** $\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- **LOW INPUT NOISE:**
20nV/√Hz at f = 1kHz (G = 100)
- **HIGH CMR:** 106dB
- **WIDE SUPPLY RANGE:** $\pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$
- **LOW NONLINEARITY ERROR:** 0.001% max
- **INPUT PROTECTION TO $\pm 40\text{V}$**
- **8-PIN DIP AND SO-8 SURFACE MOUNT**

APPLICATIONS

- **LOW-LEVEL TRANSDUCER AMPLIFIERS**
Bridge, RTD, Thermocouple
- **PHYSIOLOGICAL AMPLIFIERS**
ECG, EEG, EMG, Respiratory
- **HIGH IMPEDANCE TRANSDUCERS**
- **CAPACITIVE SENSORS**
- **MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION**
- **PORTABLE, BATTERY OPERATED SYSTEMS**
- **GENERAL PURPOSE INSTRUMENTATION**

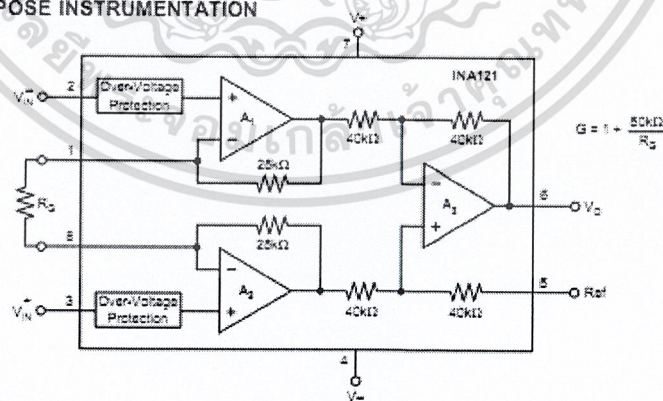
DESCRIPTION

The INA121 is a FET-input, low power instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its versatile three-op amp design and very small size make it ideal for a variety of general purpose applications. Low bias current ($\pm 4\text{pA}$) allows use with high impedance sources.

Gain can be set from 1V to 10,000V/V with a single external resistor. Internal input protection can withstand up to $\pm 40\text{V}$ without damage.

The INA121 is laser-trimmed for very low offset voltage ($\pm 200\mu\text{V}$), low offset drift ($\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), and high common-mode rejection (106dB at G = 100). It operates on power supplies as low as $\pm 2.25\text{V}$ ($\pm 4.5\text{V}$), allowing use in battery operated and single 5V systems. Quiescent current is only 450 μA .

Package options include 8-pin plastic DIP and SO-8 surface mount. All are specified for the -40°C to $+85^\circ\text{C}$ industrial temperature range.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 8730 S. Tucson Blvd, Tucson, AZ 85705 • Tel: (520) 746-1111 • Fax: 910-852-1111
Internet: <http://www.burr-brown.com> • FAXLine: (503) 545-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 055-6481 • FAX: (520) 383-1810 • Immediate Product Info: (503) 545-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 15V$

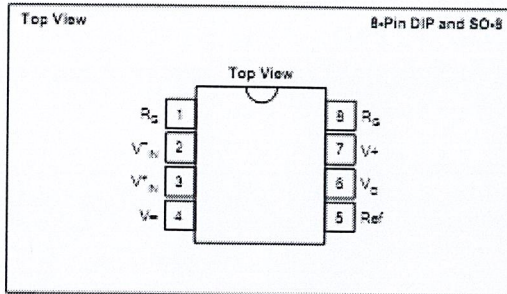
At $T_A = +25^\circ C$, $V_S = \pm 15V$, $R_L = 10k\Omega$, and IA reference = 0V, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA121P, U			INA121PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI vs Temperature	$V_S = \pm 2.25V$ to $\pm 18V$		$\pm 200 \pm 200/G$	$\pm 500 \pm 500/G$		$\pm 300 \pm 200/G$	$\pm 1000 \pm 1000/G$	μV $\mu V/^\circ C$
vs Power Supply			$\pm 2 \pm 2/G$	$\pm 5 \pm 20/G$		*	$\pm 15 \pm 20/G$	$\mu V/V$
Long-Term Stability			$\pm 5 \pm 20/G$	$\pm 50 \pm 150/G$		*	*	$\mu V/mo$
Impedance, Differential			± 0.5			*		Ω pF
Common-Mode	$V_{CM} = 0V$		$10^{12} 1$			*		Ω pF
Input Voltage Range			See Text and Typical Curves				*	
Safe Input Voltage				± 40			*	V
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = -12.5V$ to $13.5V$							
	G = 1	78	88		72	*		dB
	G = 10	91	100		85	*		dB
	G = 100	98	105		90	*		dB
	G = 1000		108			*		dB
BIAS CURRENT	$V_{CM} = 0V$		± 4	± 50			*	pA
vs Temperature			See Typical Curve				*	
Offset Current			± 0.5			*		pA
vs Temperature			See Typical Curve				*	
NOISE, RTI								
Voltage Noise: f = 10Hz	$R_B = 0\Omega$		30			*		nV/√Hz
f = 100Hz	G = 100		21			*		nV/√Hz
f = 1kHz	G = 100		20			*		nV/√Hz
f = 0.1Hz to 10Hz	G = 100		1			*		$\mu V/p$ fA/√Hz
Current Noise: f = 1kHz			1			*		fA/√Hz
GAIN								
Gain Equation			$1 + (50k\Omega/R_B)$				*	V/V
Range of Gain	$V_S = -14V$ to $13.5V$	1		10,000	*		*	V/V
Gain Error	G = 1		± 0.01	± 0.05		*	± 0.1	%
	G = 10		± 0.03	± 0.4		*	± 0.5	%
	G = 100		± 0.05	± 0.5		*	± 0.7	%
	G = 1000		± 0.5			*		%
Gain vs Temperature ⁽¹⁾	G = 1		± 1	± 10		*	*	ppm/°C
	G > 1		± 25	± 100		*	*	ppm/°C
Nonlinearity	$V_S = -14V$ to $13.5V$							
	G = 1		± 0.0002	± 0.001		*	± 0.002	% of FSR
	G = 10		± 0.0015	± 0.005		*	± 0.008	% of FSR
	G = 100		± 0.0015	± 0.005		*	± 0.008	% of FSR
	G = 1000		± 0.002			*		% of FSR
OUTPUT								
Voltage: Positive	$R_L = 100k\Omega$		(V ₊) - 0.9			*		V
Negative	$R_L = 100k\Omega$		(V ₊) + 0.15			*		V
Positive	$R_L = 10k\Omega$	(V ₊) + 1.5	(V ₊) - 0.9		*			V
Negative	$R_L = 10k\Omega$	(V ₊) + 1	(V ₊) + 0.25		*			V
Capacitance Load Drive			1000			*		pF
Short-Circuit Current			± 14			*		mA
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, -3dB	G = 1		600			*		kHz
	G = 10		200			*		kHz
	G = 100		50			*		kHz
	G = 1000		5			*		kHz
Slew Rate	$V_S = \pm 10V$, G ≤ 10		0.7			*		V/ μs
Setting Time, 0.01%	G = 1 to 10		30			*		μs
	G = 100		35			*		μs
	G = 1000		260			*		μs
Overload Recovery	50% Input Overload		5			*		μs
POWER SUPPLY								
Voltage Range		± 2.25	± 15	± 18	*	*	*	V
Quiescent Current	$I_C = 0V$		± 450	± 525		*	*	μA
TEMPERATURE RANGE								
Specification		-40		85	*		*	°C
Operating		-55		125	*		*	°C
Storage		-55		125	*		*	°C
Thermal Resistance, θ_{JA}								
8-Lead DIP			100			*		°C/W
SO-8 Surface Mount			150			*		°C/W

* Specification same as INA121P, U.

NOTE: (1) Temperature coefficient of the "Internal Resistor" in the gain equation. Does not include TCR of gain-setting resistor, R_B .

PIN CONFIGURATION



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage	$\pm 18V$
Analog Input Voltage Range	$\pm 40V$
Output Short-Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
Storage Temperature	$-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
Junction Temperature	$+150^{\circ}C$
Lead Temperature (soldering, 10s)	$+300^{\circ}C$

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION

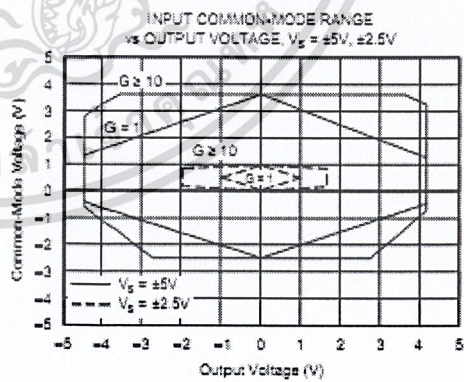
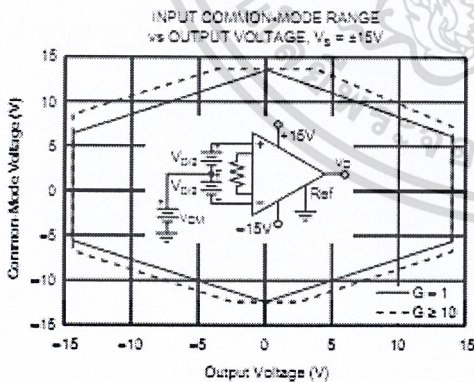
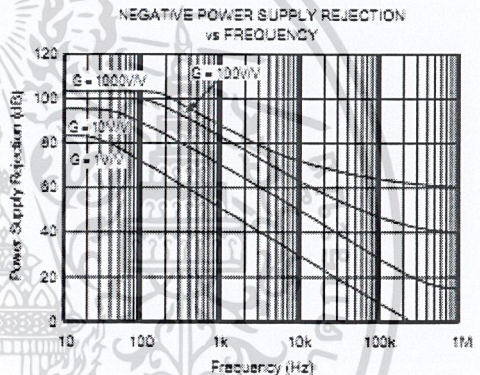
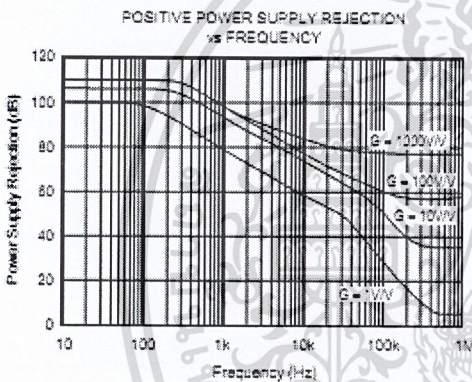
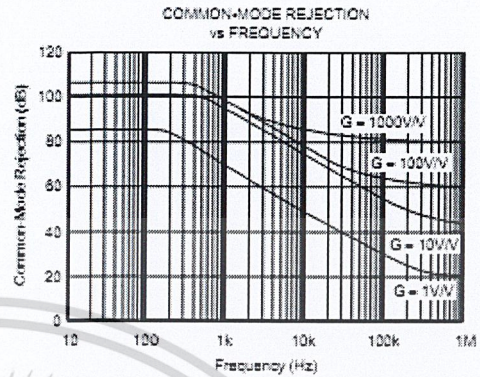
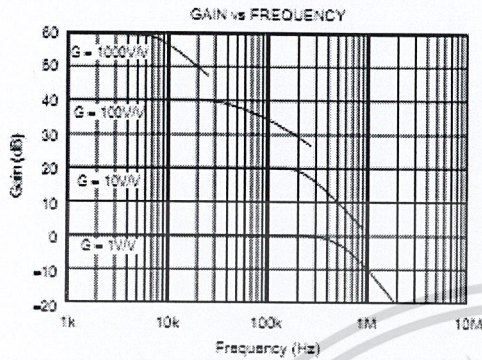
PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER(1)	SPECIFIED TEMPERATURE RANGE	PACKAGE MARKING	ORDERING NUMBER(2)	TRANSPORT MEDIA
Single						
INA121P	8-Pin DIP	008	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	INA121P	INA121P	Reels
INA121PA	8-Pin DIP	008	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	INA121PA	INA121PA	Reels
INA121U	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	INA121U	INA121U	Reels
*				*	INA121U/2K5	Tape and Reel
INA121UA	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$	INA121UA	INA121UA	Reels
*				*	INA121UA/2K5	Tape and Reel

NOTES: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book. (2) Models with a slash (/) are available only in Tape and Reel in the quantities indicated (e.g., /2K5 indicates 2500 devices per reel). Ordering 2500 pieces of "INA121U/2K5" will get a single 2500-piece Tape and Reel. For detailed Tape and Reel mechanical information, refer to Appendix B of Burr-Brown IC Data Book.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

TYPICAL PERFORMANCE CURVES

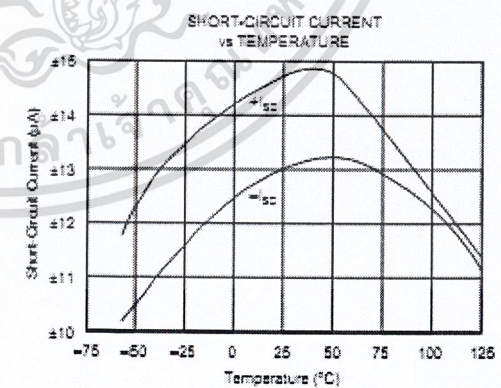
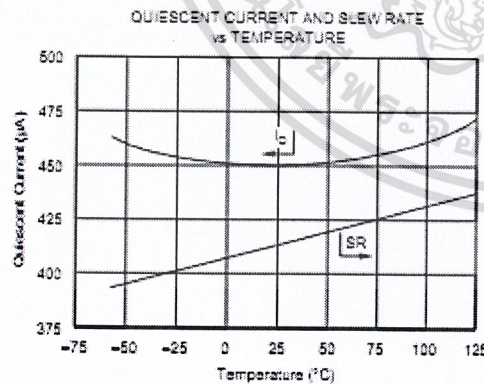
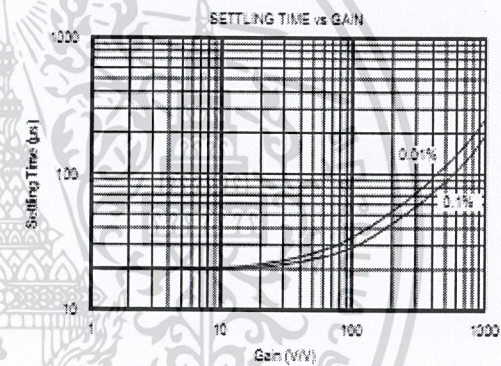
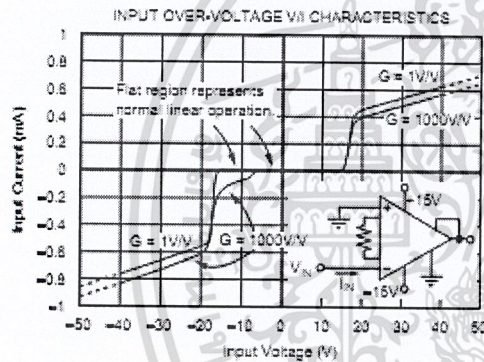
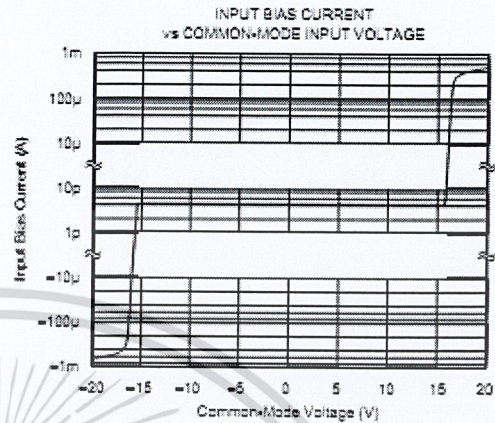
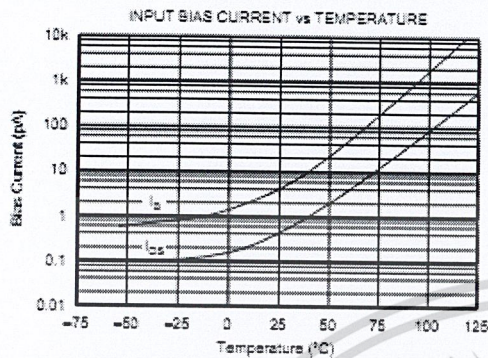
At $T_c = -25^\circ\text{C}$, $V_s = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

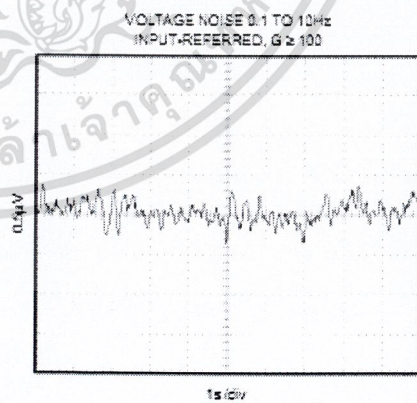
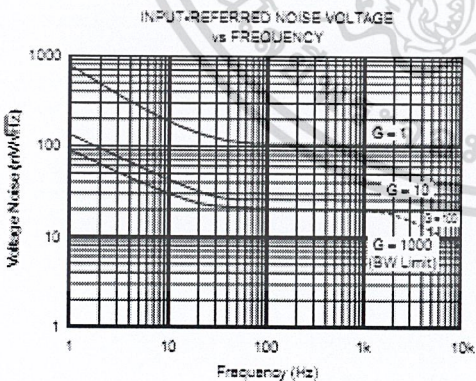
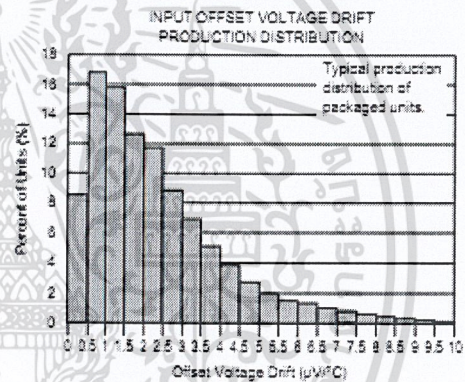
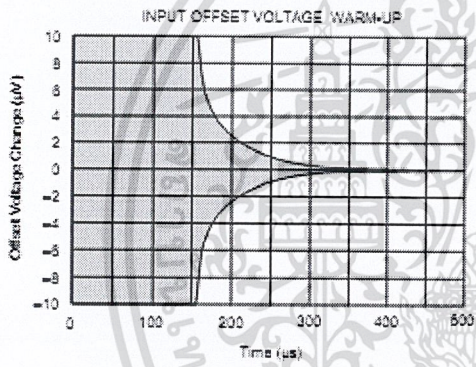
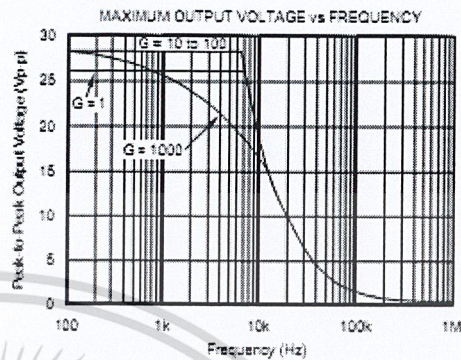
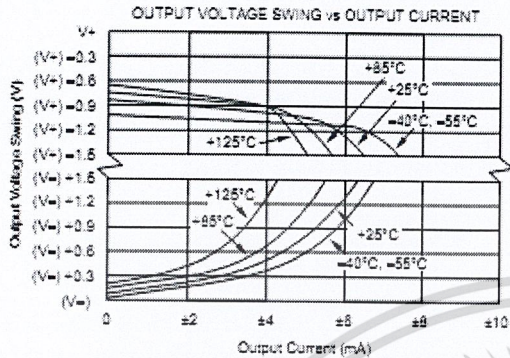
At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

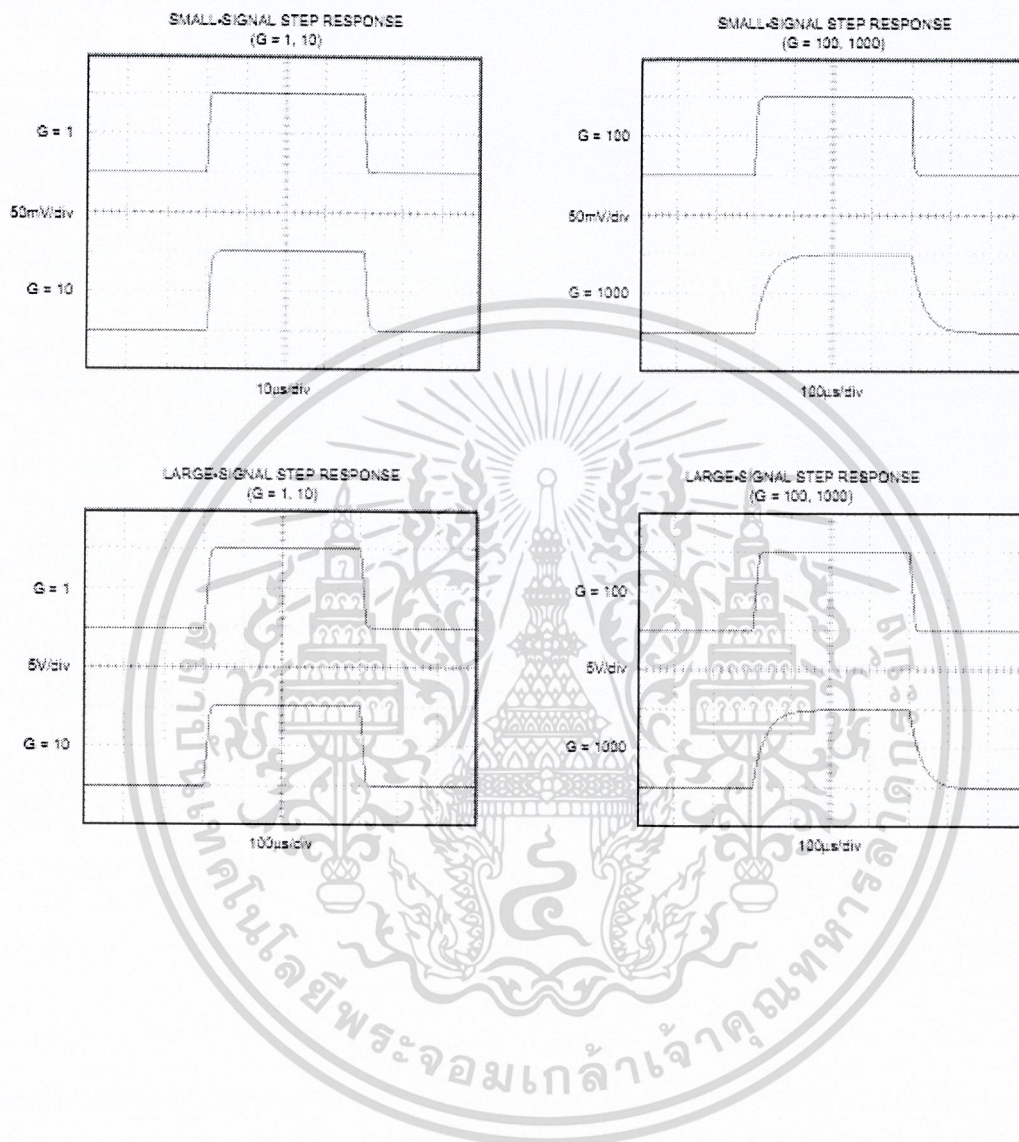
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At $T_a = +25^\circ\text{C}$, $V_s = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



APPLICATION INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA121. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the output reference (Ref) terminal which is normally grounded. This must be a low-impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 8Ω in series with the Ref pin will cause a typical device to degrade to approximately 80dB CMR (G = 1).

SETTING THE GAIN

Gain of the INA121 is set by connecting a single external resistor, R_G, connected between pins 1 and 8:

$$G = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \quad (1)$$

Commonly used gains and resistor values are shown in Figure 1.

The 50kΩ term in Equation 1 comes from the sum of the two internal feedback resistors of A₁ and A₂. These on-chip metal film resistors are laser trimmed to accurate absolute values. The accuracy and temperature coefficient of these resistors are included in the gain accuracy and drift specifications of the INA121.

The stability and temperature drift of the external gain setting resistor, R_G, also affects gain. R_G's contribution to gain accuracy and drift can be directly inferred from the gain equation (1). Low resistor values required for high gain can make wiring resistance important. Sockets add to the wiring resistance which will contribute additional gain error (possibly an unstable gain error) in gains of approximately 100 or greater.

DYNAMIC PERFORMANCE

The typical performance curve "Gain vs Frequency" shows that, despite its low quiescent current, the INA121 achieves wide bandwidth, even at high gain. This is due to the current-feedback topology of the INA121. Settling time also remains excellent at high gain.

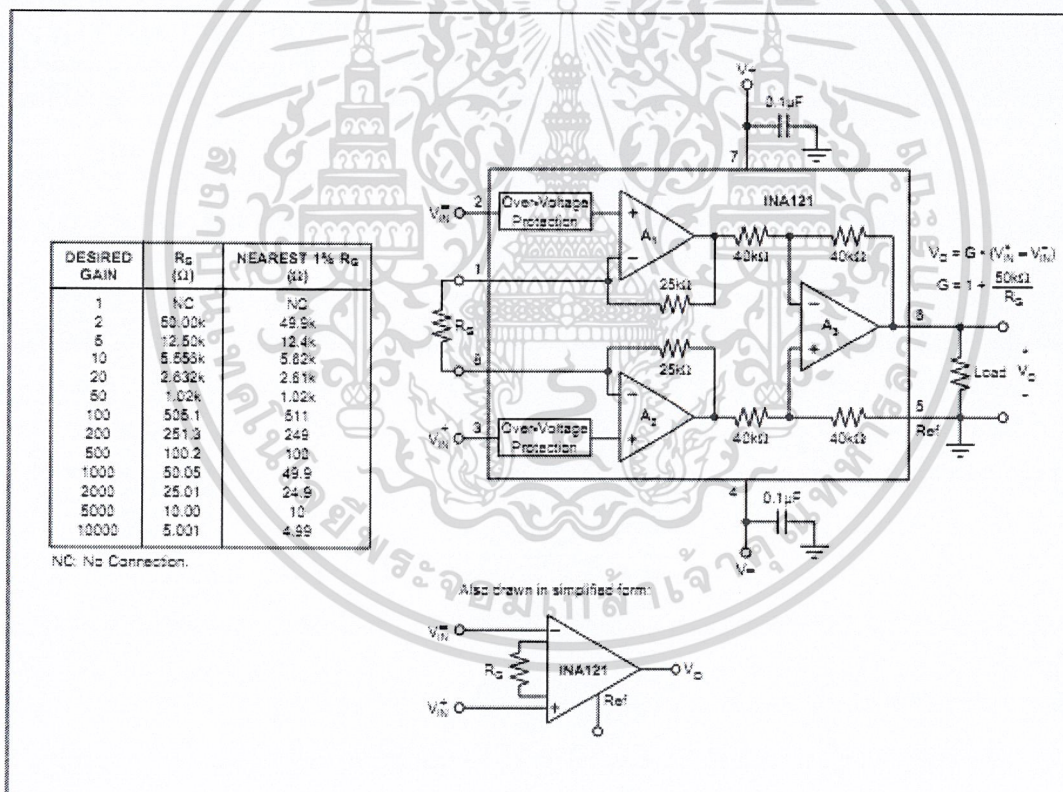


FIGURE 1. Basic Connections.

The INA121 provides excellent rejection of high frequency common-mode signals. The typical performance curve, "Common-Mode Rejection vs Frequency" shows this behavior. If the inputs are not properly balanced, however, common-mode signals can be converted to differential signals. Run the V_{IN}^- and V_{IN}^+ connections directly adjacent each other, from the source signal all the way to the input pins. If possible use a ground plane under both input traces. Avoid running other potentially noisy lines near the inputs.

NOISE AND ACCURACY PERFORMANCE

The INA121's FET input circuitry provides low input bias current and high speed. It achieves lower noise and higher accuracy with high impedance sources. With source impedances of 2k Ω to 50k Ω the INA114, INA128, or INA129 may provide lower offset voltage and drift. For very low source impedance ($\leq 1k\Omega$), the INA103 may provide improved accuracy and lower noise. At very high source impedances ($> 1M\Omega$) the INA116 is recommended.

OFFSET TRIMMING

The INA121 is laser trimmed for low offset voltage and drift. Most applications require no external offset adjustment. Figure 2 shows an optional circuit for trimming the output offset voltage. The voltage applied to Ref terminal is summed at the output. The op amp buffer provides low impedance at the Ref terminal to preserve good common-mode rejection. Trim circuits with higher source impedance should be buffered with an op amp follower circuit to assure low impedance on the Ref pin.

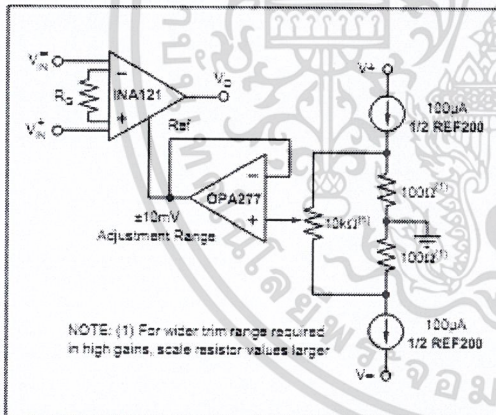


FIGURE 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage.

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

The input impedance of the INA121 is extremely high—approximately $10^{12}\Omega$. However, a path must be provided for the input bias current of both inputs. This input bias current is typically 4pA. High input impedance means that this input bias current changes very little with varying input voltage.

Input circuitry must provide a path for this input bias current if the INA121 is to operate properly. Figure 3 shows various provisions for an input bias current path. Without a bias current return path, the inputs will float to a potential which exceeds the common-mode range of the INA121 and the input amplifiers will saturate.

If the differential source resistance is low, the bias current return path can be connected to one input (see the thermocouple example in Figure 3). With higher source impedance, using two resistors provides a balanced input with possible advantages of lower input offset voltage due to bias current and better high-frequency common-mode rejection.

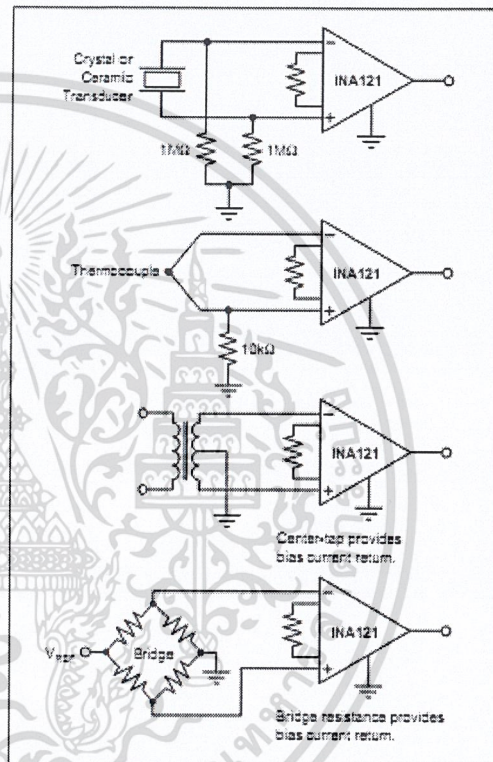


FIGURE 3. Providing an Input Common-Mode Current Path.

INPUT COMMON-MODE RANGE

The linear input voltage range of the input circuitry of the INA121 is from approximately 1.2V below the positive supply voltage to 2.1V above the negative supply. A differential input voltage causes the output voltage to increase. The linear input range, however, will be limited by the output voltage swing of amplifiers A_1 and A_2 . So the linear common-mode input range is related to the output voltage of the complete amplifier. This behavior also depends on supply voltage—see typical performance curve "Input Common-Mode Range vs Output Voltage".

A combination of common-mode and differential input voltage can cause the output of A_1 or A_2 to saturate. Figure 4 shows the output voltage swing of A_1 and A_2 expressed in terms of a common-mode and differential input voltages. For applications where input common-mode range must be maximized, limit the output voltage swing by connecting the INA121 in a lower gain (see performance curve "Input Common-Mode Voltage Range vs Output Voltage"). If necessary, add gain after the INA121 to increase the voltage swing.

Input-overload can produce an output voltage that appears normal. For example, if an input overload condition drives both input amplifiers to their positive output swing limit, the difference voltage measured by the output amplifier will be near zero. The output of A_3 will be near 0V even though both inputs are overloaded.

LOW VOLTAGE OPERATION

The INA121 can be operated on power supplies as low as $\pm 2.25V$. Performance remains excellent with power supplies ranging from $\pm 2.25V$ to $\pm 18V$. Most parameters vary only slightly throughout this supply voltage range—see typical

performance curves. Operation at very low supply voltage requires careful attention to assure that the input voltages remain within their linear range. Voltage swing requirements of internal nodes limit the input common-mode range with low power supply voltage. Typical performance curves, "Input Common-Mode Range vs Output Voltage" show the range of linear operation for $\pm 15V$, $\pm 5V$, and $\pm 2.5V$ supplies.

INPUT FILTERING

The INA121's FET input allows use of an R/C input filter without creating large offsets due to input bias current. Figure 5 shows proper implementation of this input filter to preserve the INA121's excellent high frequency common-mode rejection. Mismatch of the common-mode input time constant (R_1C_1 and R_2C_2), either from stray capacitance or mismatched values, causes a high frequency common-mode signal to be converted to a differential signal. This degrades common-mode rejection. The differential input capacitor, C_3 , reduces the bandwidth and mitigates the effects of mismatch in C_1 and C_2 . Make C_3 much larger than C_1 and C_2 . If properly matched, C_1 and C_2 also improve ac CMR.

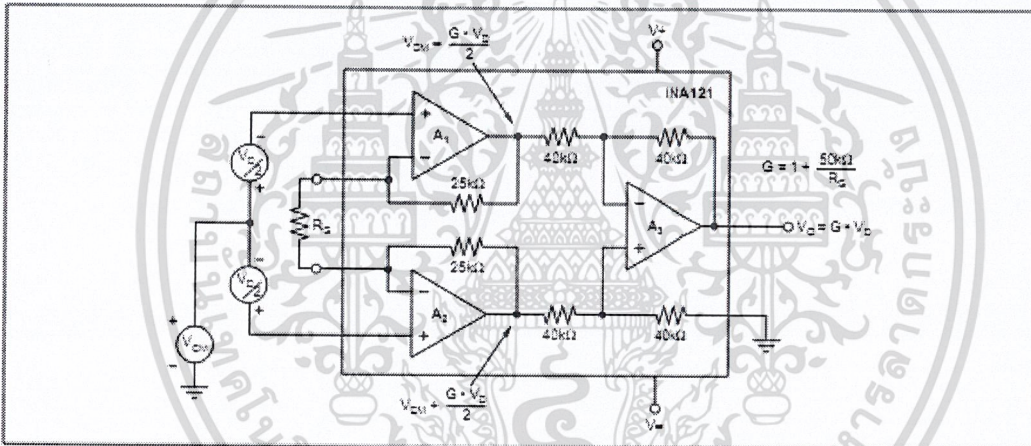


FIGURE 4. Voltage Swing of A_1 and A_2 .

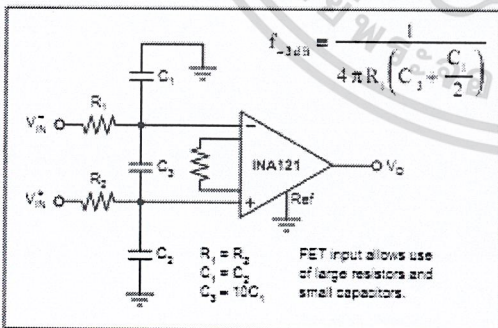


FIGURE 5. Input Low-Pass Filter.

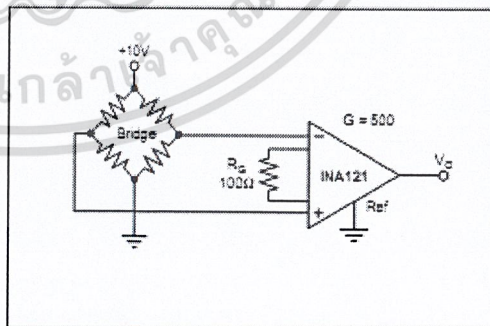


FIGURE 6. Bridge Transducer Amplifier.

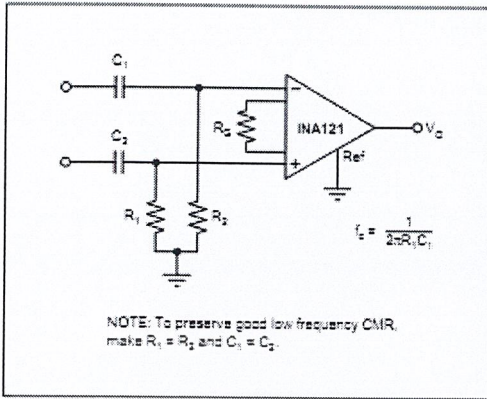


FIGURE 7. High-Pass Input Filter.

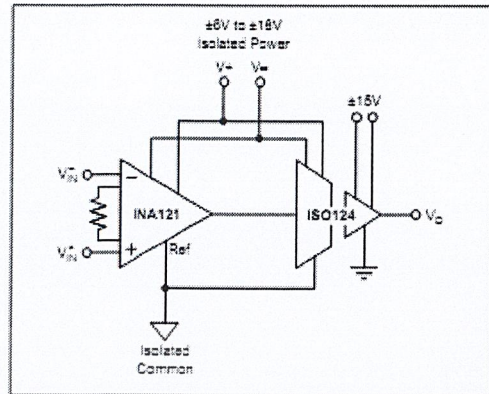


FIGURE 8. Galvanically Isolated Instrumentation Amplifier.

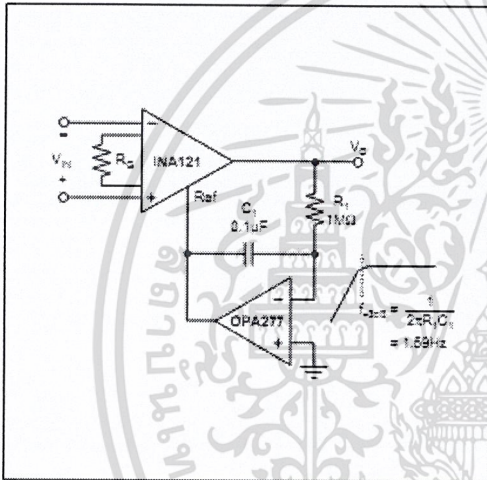


FIGURE 9. AC-Coupled Instrumentation Amplifier.

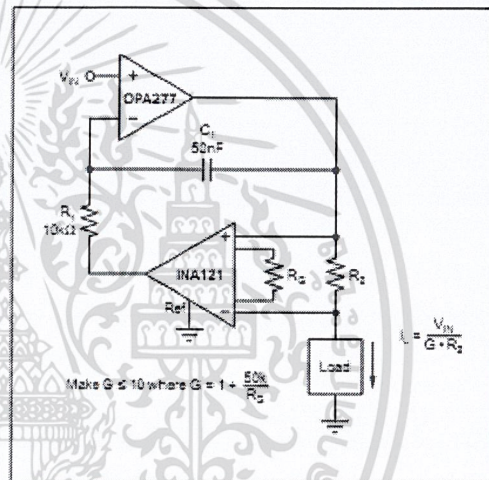


FIGURE 10. Voltage Controlled Current Source.

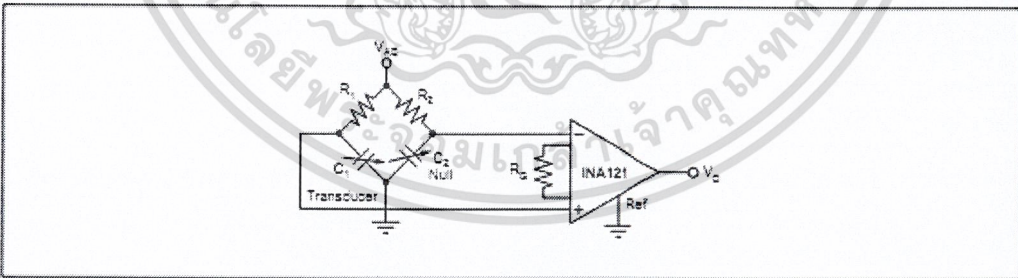


FIGURE 11. Capacitive Bridge Transducer Circuit.

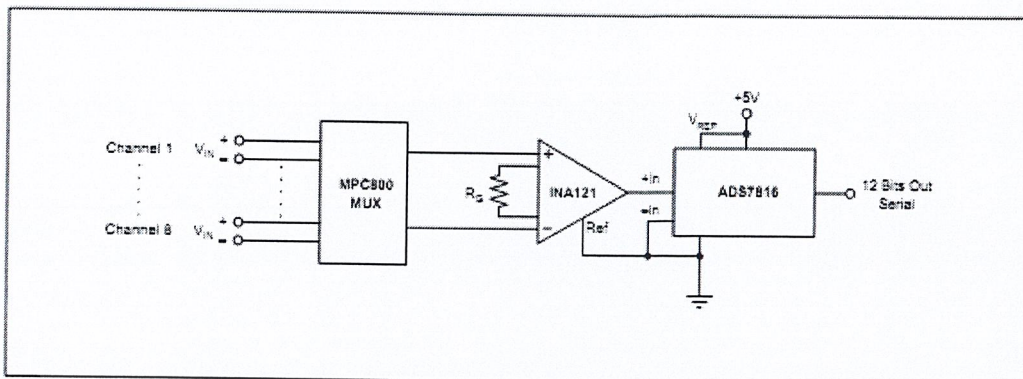


FIGURE 12. Multiplexed-Input Data Acquisition System.

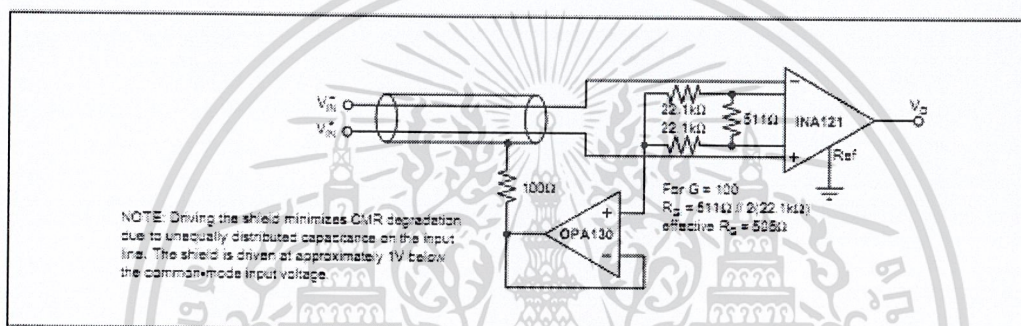


FIGURE 13. Shield Driver Circuit.

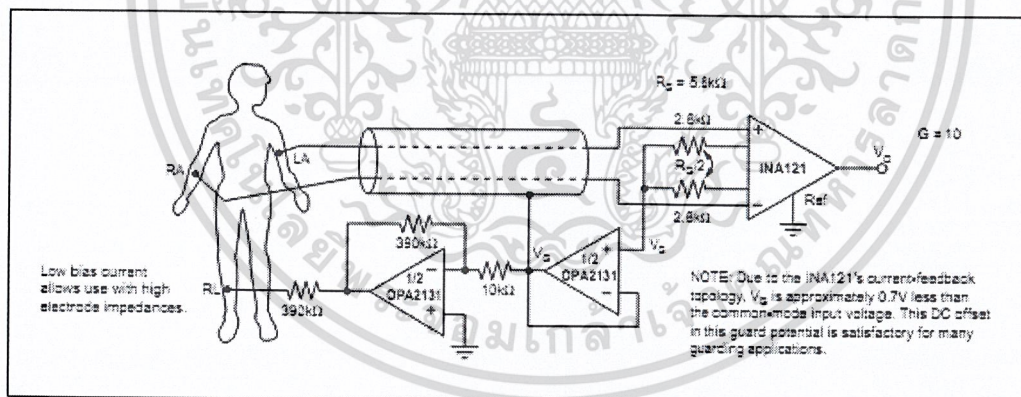


FIGURE 14. ECG Amplifier With Right-Leg Drive.