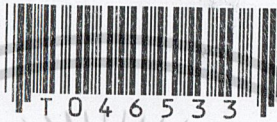


เครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ
METAL MINE DETECTOR



โดย

นาย ศิริพงษ์ สุวรรณลักษณ์ 43015746

นาย ศุภชัย แสงทอง 43015747

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 46533
วัน, เดือน, ปี 4 เม.ย. 2546

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ
TITLE METAL MINNE DETECTOR
ชื่อนักศึกษา นาย ศิริพงษ์ สุวรรณลักษณ์ รหัสนักศึกษา 43015746
นาย สุขชัย แสงทอง รหัสนักศึกษา 43015747
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.บุญชนะ ภูระหงษ์
ผศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา 2544

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง

(อ. บุญชนะ ภูระหงษ์)
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ
นักศึกษา นาย ศิริพงษ์ สุวรรณลักษณ์ รหัสประจำตัว 43015746
นาย ศุภชัย แสงทอง รหัสประจำตัว 43015747
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ อ. บุญยชนะ ภูระหงษ์
ผศ.ดร. ปิติเชต สุรักษา
ระดับการศึกษา ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงการเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะโดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะถูกสร้างจากขดลวดภาคส่ง และใช้ขดลวดภาครับเป็นตัวตรวจจับระดับพลังงานที่อยู่รอบๆ ชุดตรวจจับ สัญญาณที่ตรวจจับได้จะเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามการรบกวนของสนามแม่เหล็กโดยวัตถุที่เหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งถ้าการรบกวนของสนามแม่เหล็กมีมากถึงระดับที่กำหนดไว้ จะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าถูกขยายเพื่อนำไปแสดงผลต่อไป ประโยชน์ของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ โดยใช้สนามแม่เหล็กสามารถนำไปใช้ในการหาวัตถุที่เป็นโลหะ เช่นวัตถุระเบิดชนิดโลหะ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการทหาร และ ตำรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS TITLE METAL MINE DETECTOR

STUDENT Mr. Siripong Suwannalak No. 43015746
Mr. Supachai Saengthong No. 43015747

ADVISER Mr. Boonchana Poorahong
Asst.Prof.Dr. Pitikhate Sooraksa

COURSE Bachelor of Industrial Technology in Electronics

DEPARTMENT Information Engineering

YEAR 2001

ABSTRACT

This paper proposes the metal mine detector which can detect metal by electromagnetic field. An alternating electromagnetic field is established using an transmitting coil. An adjacent receiver coil is used to measure the energy level in the vicinity of the search coil. A synchronous demodulator is used to produce a direct current voltage which varies in proportion to the disturbance of the electromagnetic field by a conductive object. This voltage is amplifier and audible and visible signals are produced when the disturbance exceeds a level set by the sensitivity controls. This metal mine detector equipment is very useful to find the metal search the weapon so it can be apply to use for the warrior and the police.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ ซึ่งได้รับคำแนะนำ และชี้แนะแนวทาง จากคณาจารย์ ในการศึกษาค้นคว้าข้อมูลรายละเอียด และขอบเขตต่างๆ ของโครงการเป็นอย่างดี ตลอดมา

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ อ.บุญชนะ ภูระหงษ์ และ ผศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ และเอกสารประกอบการทดลอง รวมไปถึงผู้ที่มีส่วนให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ ทุกๆ ท่าน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยให้คำแนะนำ ให้ยืมเครื่องมือ และเป็นกำลังใจตลอดมาในการทำปริญญาบัตร

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เคารพรักยิ่ง ที่ได้สนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำมาตลอด จนปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.3 ข้อกำหนดของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการดำเนินงาน	3
2.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.2 การออกแบบมัลติเลเยอร์ ชนิดพันบนแกนอากาศ (Air – cored multilayer coil)	6
2.3 ประเภทของเครื่องตรวจจับโลหะ	9
2.4 ออปแอมป์	13
2.5 วงจรออปแอมป์พื้นฐาน	23
บทที่ 3 การสร้างและการออกแบบ	33
3.1 โครงสร้างและบล็อกไดอะแกรม	33
3.2 การพันขดลวดคั่นหา	34
บทที่ 4 การทดสอบและการออกแบบ	37
4.1 วิธีการใช้งาน	37
4.2 การทดสอบเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิด โลหะ	37
4.3 ตารางบันทึกผลการทดสอบ	38
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	40
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความเหนี่ยวนำ L ของระบบตัวนำ	3
รูปที่ 2.2 กฎมือซ้ายแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น	4
รูปที่ 2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในขดลวด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	4
รูปที่ 2.4 การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด 2 ขด โดยอำนาจของสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.5 ภาพหน้าตัดคอยล์พันหลายชั้นบนแกนอากาศ และสัญลักษณ์ตัวแปรต่างๆ ที่มี ในสมการ	7
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของ Beat Frequency Oscillator (BFO)	9
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจร VLF Phase Angle	10
รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Pulse Induction (PI)	10
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance	11
รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจร IB detector	12
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของวงจร T/R detector	12
รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภายในภาคต่างๆ ของออปแอมป์	14
รูปที่ 2.13 ออปแอมป์ลูปเปิด	15
รูปที่ 2.14 ออปแอมป์ลูปปิด	15
รูปที่ 2.15 ออปแอมป์ควบคุมอัตราขยาย	16
รูปที่ 2.16 การป้อนกลับในกรณีที่มี $AV = 1$	16
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของออปแอมป์	16
รูปที่ 2.18 วงจรที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้แก่ออปแอมป์	18
รูปที่ 2.19 อัตราขยายของออปแอมป์จะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น	20
รูปที่ 2.20 ออปแอมป์แบบ DIP	22
รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขาต่างๆ ออกจากภาชนะที่ใช้บรรจุออปแอมป์	23
รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่างขั้วทั้งสอง	23
รูปที่ 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เอาต์พุต	24
รูปที่ 2.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงให้ขั้วลบทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิง	25
รูปที่ 2.25 แสดงเฟสและขนาดของสัญญาณอินพุตทั้งสองตรงกัน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 แสดงการตรวจระดับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นลบค่าหนึ่ง	27
รูปที่ 2.27 แสดงวงจรขยายกลับเฟสแบบมาตรฐาน	28
รูปที่ 2.28 วงจรขยายกลับเฟส	29
รูปที่ 2.29 แสดงวงจรที่ประกอบด้วยเบตเตอร์ขนาด 10 โวลท์	30
รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดคราวด์เสมือน โดยที่แรงดันไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน	30
รูปที่ 2.31 อธิบายคราวด์เสมือนที่เกิดขึ้นจริงในวงจรขยายออปแอมป์	31
รูปที่ 2.32 วงจรนัอินเวอร์ตติ้งที่แรงดันอินพุทจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วบวก	32
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ	33
รูปที่ 3.2 วงจรเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ	35
รูปที่ 3.3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์	36
รูปที่ 4.1 รูปถ่ายเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะที่เสร็จสมบูรณ์	39

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของออปแอมป์	22
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการสืบเสาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกกำลังประสบกับปัญหาอย่างหนึ่งซึ่งเป็นผลพวงมาจากการทำสงครามครั้งต่างๆ ที่ผ่านมามีในอดีต นั่นคือ ปัญหาเกี่ยวกับภาวะระเบิดที่ยังคงฝังหลงเหลืออยู่ ถึงแม้ว่าสงครามจะจบสิ้นไปแล้วก็ตาม แม้ว่าจะมีการตามเก็บกู้จากหลายๆ หน่วยงานทั่วโลก และได้มีการกระทำการร่างสนธิสัญญาที่จะไม่ใช้กับระเบิดในสงครามก็ตาม แต่ก็ยังมีกับระเบิดที่ยังมีอนุภาพทำลายล้างหลงเหลืออยู่มากมายกว่า 10 ล้านชิ้น ในกว่า 70 ประเทศทั่วโลก ซึ่งได้ถูกกู้ขึ้นมาโดยเฉลี่ยปีละประมาณ 100,000 ชิ้น ในขณะเดียวกันก็ได้มีการฝังกับระเบิดเพิ่มขึ้นราวปีละประมาณ 2,500,000 ชิ้น จากผลของกับระเบิดทำให้มีผู้เสียชีวิตมากถึง 10,000 คนต่อปี และบาดเจ็บอีกประมาณ 25,000 คนต่อปี ในจำนวนนั้นก็รวมไปถึงผู้กระเบิดด้วย โดยเฉลี่ยผู้เสียชีวิต 1 คนต่อการกระเบิด 5,000 ชิ้น จากปัญหาต่างๆ เหล่านี้นำไปสู่การแก้ไขปรับปรุงการค้นหาและกู้กับระเบิดด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีการค้นหาและกู้ระเบิดขึ้น

โครงการฉบับนี้เป็นเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ โดยจะอาศัยหลักการของอุปกรณ์ตรวจจับโลหะ เพื่อการตรวจจับอาวุธและวัตถุระเบิดต่างๆ เครื่องตรวจจับจะแสดงผลให้ทราบ

เครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ จะสามารถตรวจสอบโลหะที่เป็นแม่เหล็กและไม่เป็นแม่เหล็กจะได้รับความถูกต้องพอๆ กัน แต่สำหรับวัตถุระเบิดที่ไม่เป็นโลหะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ เครื่องตรวจจับกับระเบิดนี้จะทำงานโดยแบตเตอรี่ใช้งานง่าย เมื่อเครื่องตรวจจับตรวจพบโลหะจะส่งเสียงเตือนให้ทราบโดยผ่านโดยลำโพงหรือผ่านทางหูฟังได้เพียงแต่เสียบสายหูฟังทางช่องเสียบหูฟัง สำหรับความไวในการตรวจจับนั้นสามารถปรับได้ที่ตำแหน่งความไวสูง และความไวต่ำ ผลการตรวจจับความไวที่ตำแหน่งความไวสูง จะสามารถตรวจจับได้ในระยะไกลกว่าตำแหน่งของความไวต่ำ

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาถึงพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจจับโลหะ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ออกแบบและสร้างต้นแบบของเครื่องตรวจกับระเบิด
4. เพื่อเป็นแนวทางในการขยายไปสู่การออกแบบและสร้างให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับโลหะ
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น
3. เพื่อนำไปใช้ในการตรวจกับระเบิด
4. เป็นประโยชน์และเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจที่จะศึกษาทางด้านนี้

1.3 ข้อกำหนดของโครงการ

โครงการมีข้อกำหนดโดยทั่วไปดังนี้

1. ใช้อุปกรณ์ราคาถูก หาซื้อง่าย
2. ส่วนประกอบสามารถซ่อมแซมในภายหลังได้
3. ใช้งานสะดวก ง่าย ไม่ยุ่งยาก
4. มีความแม่นยำพอสมควร
5. มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการดำเนินงาน

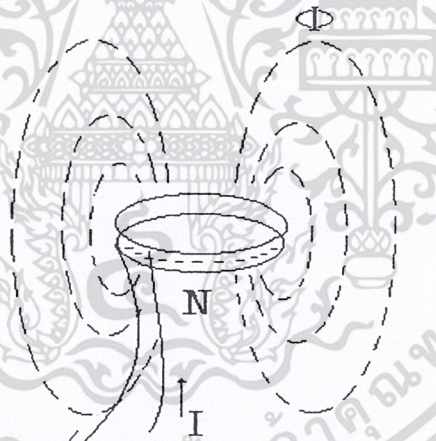
2.1 ทฤษฎีสถนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

ความเหนี่ยวนำ L ของระบบตัวนำอาจจะนิยามได้เป็น อัตราส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องตัวต่อกระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์ สำหรับกระแสสถิตและขดลวด N รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (2.1)$$

หน่วยของ L คือ เฮนรี(H) ซึ่ง $1\text{H} = 1\text{Wb/A}$ ความนำยังถูกกำหนดได้ด้วย $L = \lambda / I$ ซึ่ง λ คือ $N\Phi$ สำหรับขดลวด N รอบ



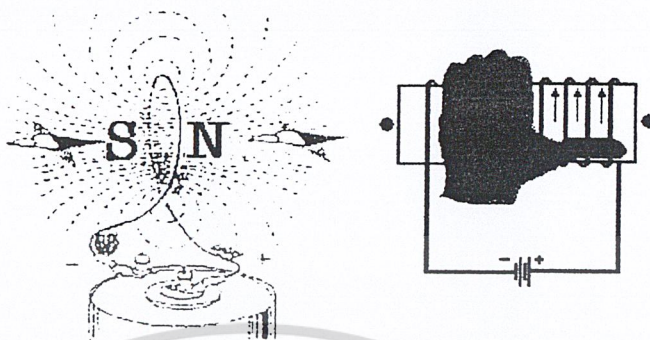
รูปที่ 2.1 ความเหนี่ยวนำ L ของระบบตัวนำ

ควรระลึกไว้ว่า L จะเป็นผลคูณของความซึมซาบ (Permeability : μ) ของตัวกลาง และแฟกเตอร์เชิงเรขาคณิต มีหน่วยเป็นความยาว

2.1.2 การเหนี่ยวนำในตัวเอง (Self Inductance)

เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลเข้าไปในเส้นลวดตัวนำจะปรากฏว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ ที่เส้นลวดตัวนำนั้น และมีทิศทางตามกฎมือซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

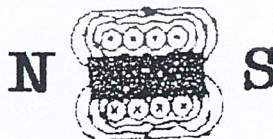
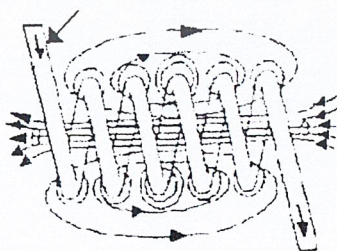


รูปที่ 2.2 ภูมิมือซ้ายแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

ถ้าเรานำเอาขดลวดตัวนำมาขดเป็นคอยล์ (Coil) เพื่อให้เกิดคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โดยต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง แล้วใช้ภูมิมือซ้าย ซึ่งจะบอกให้เราทราบว่า นิ้วหัวแม่มือซ้ายจะแสดงทิศทางสนามแม่เหล็กขั้วเหนือของขดลวด (Solenoid) และจำนวนนิ้วที่เหลือทั้ง 4 นิ้ว ที่กำรอบขดลวดจะเป็นทิศทางการไหลของกระแสอิเล็กตรอน (Electron Current)

เมื่อเราทราบว่า ทิศทางของสนามแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า หากเราทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป ก็จะมีผลให้สนามแม่เหล็กของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กนี้ จะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวของขดลวดเอง เรียกว่า “Self Inductance” และทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากผลของการเหนี่ยวนำ เรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” (Induce Electro Motive Force : Induce E.M.F) ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำ แรงนี้จะต่อต้านโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ” (Counter Electro Motive Force : C.E.M.F)

Direction of current



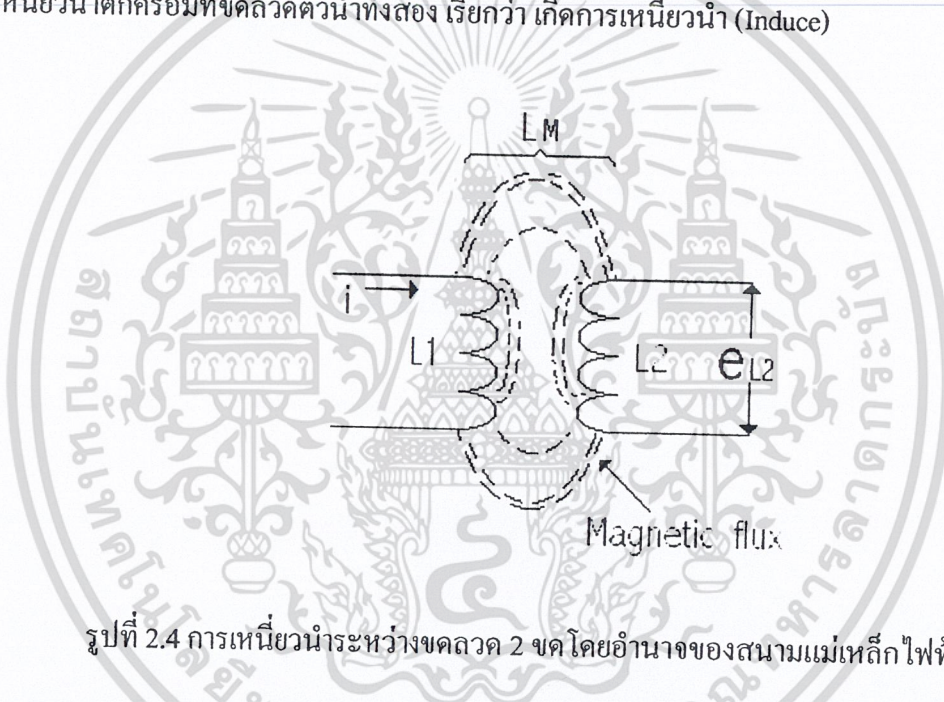
The cross-section of coil shows the magnetic field about each wire

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.3 การเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในขดลวด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในขดลวดตัวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ขดลวดตัวนำนี้ และทิศทางสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเสริมกันในแต่ละขดลวดตัวนำ ทำให้สนามแม่เหล็กแพร่กระจายออกไปรอบๆ ตัวของขดลวดนี้ได้

2.1.3 การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด 2 ขด (Mutual Inductance)

เมื่อเรานำเอาขดลวดตัวนำ 2 ขดมาวางไว้ใกล้กัน และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดตัวนำขดหนึ่งจะพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงย่อมทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง และสามารถยุบตัวตัดกับขดลวดตัวนำอีกตัวหนึ่งเมื่อวางอยู่ใกล้ๆ ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกคร่อมที่ขดลวดตัวนำทั้งสอง เรียกว่า เกิดการเหนี่ยวนำ (Induce)



รูปที่ 2.4 การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด 2 ขด โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.4 แสดงการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดของคอยล์ L_1 และ L_2 ที่วางไว้ใกล้ๆ กัน ถ้าเราต่อคอยล์ L_1 เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จะปรากฏผล คือมันสามารถทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e_{L2}) ตกคร่อมที่คอยล์ L_2 ได้ ซึ่งเราสังเกตเห็นว่า คอยล์ทั้งสองขดไม่ได้ต่อดึงกัน แต่มันสามารถเชื่อมต่อดึงกันได้ โดยสนามแม่เหล็ก (Magnetic-field)

การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้งสองนั้นไม่ว่าจะมีประสิทธิภาพดีเพียงใดก็ต้องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ดังนี้ คือ

- ระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสอง คือถ้าเราวางขดลวดทั้งสองให้อยู่ใกล้ๆ กัน โอกาสของการเหนี่ยวนำก็จะมีมากขึ้น

- แกนที่ใช้สำหรับพันขดลวด ซึ่งจะมีค่าของความซึมซาบ (Permeability) ของแกนที่ต่างกัน เช่น ถ้าใช้แกนเหล็กจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้งสองได้ดีกว่าแกนอากาศราคาไม่แพงนัก ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนรอบของขดลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำได้มาก ผลที่ตามมาคือ ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย
- จำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง คือถ้าวางให้ขดลวดทั้งสองตั้งฉากกัน ผลคือ การเหนี่ยวนำจะหักล้างกันหมดไป แต่ถ้าวางให้ขดลวดทั้งสองขนานกัน ผลจะทำให้การเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเป็นการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดตัวนำตั้งแต่ 2 ขดขึ้นไป หรืออาจเรียกว่า Mutual Inductance ใช้ตัวย่อ L_M ค่าการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดตัวนำ 2 ขด (L_M) 1 เฮนรี คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปในขดลวดตัวนำขดหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลง 1 แอมป์/ 1 วินาที ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวน 1 โวลต์ ต่อก่อที่ขดลวดตัวนำทั้ง 2 ขด ในการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด 2 ขด เส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่สามารถทำให้เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้ง 2 ขด เรียกว่า Leakage flux

2.2 การออกแบบมัลติเลเยอร์คอยล์ ชนิดพันบนแกนอากาศ (Air-cored multilayer coils)

2.2.1 สมการของวิลเลอร์

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของคอยล์ประเภทนี้ ถ้าเป็นไปตามหลักการทางปฏิบัติของวิลเลอร์แล้วจะมีรูปแบบดังสมการ

$$L = \frac{7.87N^2M^2}{3M + 9B + 10C} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 ถ้าคอยล์มีรูปทรงเหมือนดังรูปที่ 2.5 และจำนวนตัวเลขแสดงขนาดอยู่ในหน่วยเดียวกัน ค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จะเป็นค่าที่ถูกต้องแม่นยำและมีความเชื่อถือได้ ในความคิดพลาดไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ มีข้อสังเกตว่า เมื่อเราใช้ขดลวดตัวนำมาพันเป็นคอยล์ หากสามารถทำให้อัตราส่วนของคอยล์เท่ากับ $3M = 9B = 10C$ จะทำให้ได้ค่าเหนี่ยวนำของคอยล์มีค่าสูงสุด

การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำตามหลักการของวิลเลอร์ จำเป็นต้องทราบปริมาณค่าตัวแปรอื่นๆ ทั้งหมดเสียก่อนแล้วจึงนำมาแทนค่าในสมการ แต่บางครั้งอาจรู้เพียงค่าใดค่าหนึ่งและที่รู้แน่ๆ ลวดตัวนำแต่ละเบอร์จะบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาให้อย่างชัดเจน สามารถใช้ค่านี้คำนวณหาค่าตัวแปรอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 หาตัวแปรอื่นโดยใช้สมการ

ความต้านทานของคอยล์ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของลวดตัวนำ (ลวดทองแดง) ดังนั้นสามารถใช้จำนวนรอบ (N) และขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของคอยล์ (M) มาหาค่าความต้านทาน (R) ของคอยล์ ได้ดังสมการ

$$R = \frac{NM}{14250W^2} \quad (2.3)$$



N = จำนวนรอบ

M = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

B = ขนาดกว้างหรือยาว

C = ขนาดสูงหรือหนา

I = เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน

O = เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก

W = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (ดูจากตารางในภาคผนวก)

P = พื้นที่ว่างที่เกิดขึ้น เป็นค่าเฉพาะ ≈ 0.8

หมายเหตุ : ปริมาณของค่าต่างๆ ที่ใช้แทนค่าในสมการ ขนาดของคอยล์หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) หน่วยเป็น นาโนเฮนรี (nH) ค่าความต้านทาน (R) หน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

รูปที่ 2.5 ภาพหน้าตัดคอยล์พันหลายชั้นบนแกนอากาศ และสัญลักษณ์ตัวแปรต่างๆ ที่มีในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของคอยล์ (N) จะก่อให้เกิดเป็นผลรวมพื้นที่หน้าตัดของคอยล์ (P) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง (W) โดยมีการคำนวณหาขนาดของจำนวนรอบได้จากสมการ

$$N\left(\frac{W}{P}\right)^2 = BC \quad (2.4)$$

ขนาดความกว้างหรือยาว (B) และขนาดความสูงหรือหนา (C) ของคอยล์ ตามรูปแบบทางอุดมคติ สามารถกำหนดค่าเชื่อถือได้ โดยมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของคอยล์ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$Bi = \frac{Mi}{3} \quad (2.5)$$

$$Ci = 0.3Mi \quad (2.6)$$

เมื่อแทนค่า B และ C ในสมการที่ 2.2 และ 2.4 ได้ความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$L = 0.875Ni^2Mi \quad (2.7)$$

$$N\left(\frac{W}{P}\right)^2 = 0.1Mi^2 \quad (2.8)$$

นำค่าจากสมการที่ผ่านเข้าไปแทนค่าในสมการที่ 2.3 , 2.7 และ 2.8 จัดรูปแบบต่างๆ ให้ดูง่ายขึ้น ดังสมการที่ 2.9 , 2.10 และ 2.11

$$Mi = 0.0354\sqrt{\frac{L}{R}} \quad (2.9)$$

$$Ni = 1.07\sqrt{\frac{L}{Mi}} \quad (2.10)$$

$$Wi = 0.253\frac{Mi}{\sqrt{Ni}} \quad (2.11)$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน (I) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (O) ของคอยล์กำหนดได้ดังสมการ

$$I = M - C = 0.7M \quad (2.12)$$

$$O = M + C = 1.3 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 หากนำเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (W) เข้ามาเกี่ยวข้อง

ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_i = 3.08L^{0.2}W^{0.8} \quad (2.14)$$

$$M_i = 0.61\left(\frac{L}{W}\right)^{0.4} \quad (2.15)$$

หมายเหตุ : ตัว i ที่ห้อยอยู่ท้ายสัญลักษณ์ตัวแปรเป็นค่าทางอุดมคติ ในทางปฏิบัติสามารถใช้ค่าที่ใกล้เคียงมาคำนวณหรือนำไปใช้งานได้

2.3 ประเภทของเครื่องตรวจจับโลหะ

เครื่องตรวจจับโลหะที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

2.3.1 Beat Frequency Oscillator (BFO)

2.3.2 VLF Phase Angle

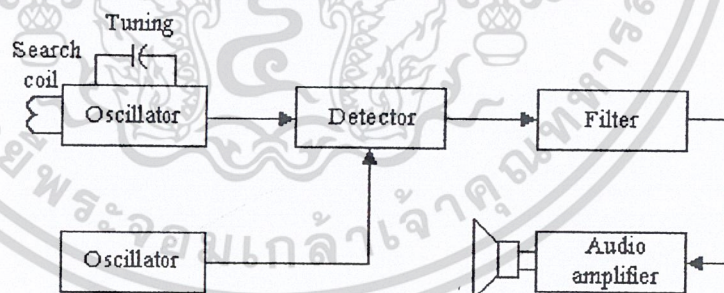
2.3.3 Pulse Induction (PI)

2.3.4 Off Resonance

2.3.5 Induction Balance (IB) หรือ Transmit / Receive (TR)

2.3.1 Beat Frequency Oscillator (BFO)

มีหลักการทำงานดังบล็อกไดอะแกรม



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของ Beat Frequency Oscillator (BFO)

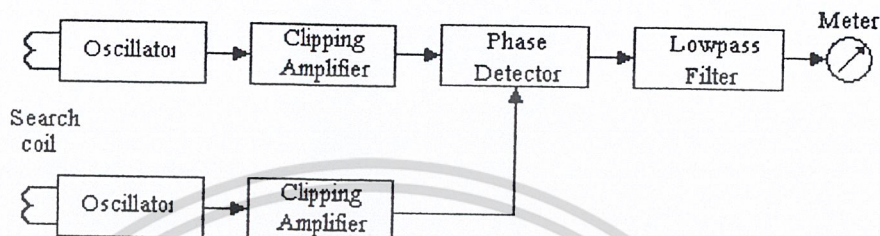
วงจรนี้ประกอบด้วย ออสซิลเลเตอร์ 2 วงจร ซึ่งจะสร้างความถี่ออกมาใกล้เคียงกันโดยวงจรหนึ่ง สร้างความถี่เป็นความถี่อ้างอิง (Reference Frequency) ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะเปลี่ยนค่าความถี่ได้โดยที่ค่า อินดักแตนซ์ ที่ขดลวดค้นหา ขณะที่มิโลหะเข้าใกล้ เมื่อวงจรออสซิลเลเตอร์ทั้งสองมีความถี่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แล้วนำมาผ่านวงจรตรวจจับ เครื่องตรวจจับชนิดนี้ ใช้

ความถี่สูง ประมาณ 125 kHz ซึ่งอาจมีความผิดพลาดจาก ground capacitance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 VLF Phase Angle

ใช้ค่าความต่างเฟสมาเป็นตัวตรวจจับ มีการทำงานดังบล็อกไดอะแกรม



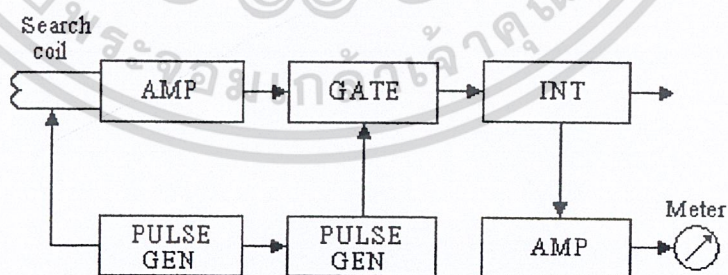
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรม ของวงจร VLF Phase Angle

วงจรนี้ใช้ขดลวดค้นหา 2 ขด โดยขดหนึ่งต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม ออกมาโดยใช้ความถี่ประมาณ 3-5 kHz ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่งจะรับสัญญาณที่ความถี่เดียวกัน นำไปขยาย และเข้าวงจร Phase Detector เพื่อสร้างสัญญาณความต่างเฟส ซึ่งเมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดค้นหา ค่าความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลง

เครื่องค้นหาโลหะชนิดนี้ มีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านพื้นผิวบริเวณตรวจจับ ได้ดี และป้องกันผลจาก ground capacitance แต่วงจรนี้กินกระแสสูง เพื่อให้ได้ความไว (Sensitivity) สูงๆ กับโลหะขนาดเล็ก

2.3.3 Pulse Induction (PI)

บล็อกไดอะแกรมของเครื่องค้นหาโลหะชนิด PI เป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรม ของวงจร Pulse Induction (PI)

จากวงจรกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) จะส่งสัญญาณเป็นช่วงสั้นๆ ไปยังขดลวดค้นหา

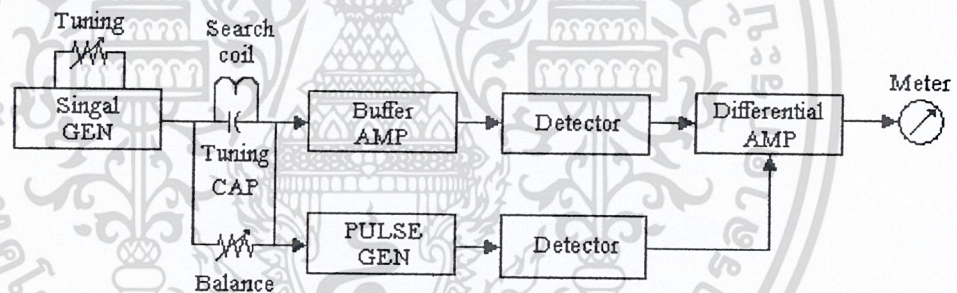
ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดค้นหา ที่ขอบขาลงของแต่ละพัลส์สนามแม่เหล็กจะลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนกระทั่งแรงดันตกเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวดค้นหา แต่ขดลวดจะสะสมพลังงานไว้ภายใน เกิดเป็น back e.m.f. ทำให้แรงดันตกคร่อมขดลวดมีทิศทางตรงข้าม (Reverse Voltage) แต่เนื่องจากเป็นพลังงานสะสมจึงสลายตัวลงจน back e.m.f. เป็นศูนย์และใช้การสลายตัวนี้ในการเปรียบเทียบในการจับโลหะ

วงจรตรวจจับจะตรวจจับสัญญาณการหน่วง (Delay) ของ back e.m.f. ซึ่งทำได้โดยนำสัญญาณมาขยายและทำเป็น Sample Voltage นำไปเข้าวงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator) สร้างสัญญาณเอาท์พุทเป็นแรงดัน ที่เป็นสัดส่วนกับเวลาการหน่วง ของ back e.m.f. และนำแรงดันไปควบคุม Voltage control oscillator (VCO) นำไปจับลำโพง เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้มีความไวมาก แต่ใช้พลังงานมากด้วย

2.3.4 Off Resonance

เครื่องตรวจจับโลหะชนิดนี้ มีหลักการทำงานคล้ายกับ Beat Frequency Oscillator (BFO) แต่อาศัยหลักการ balance ของสนามแม่เหล็กดัดแปลงคือโคอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 บล็อกโคอะแกรมของ วงจร Off Resonance

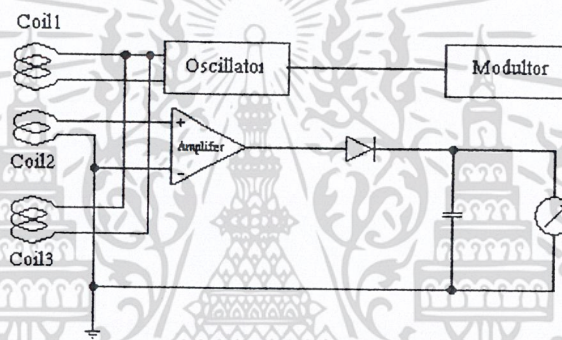
วงจรสร้างสัญญาณ (Signal Generator) จะส่งสัญญาณไปยัง Buffer Amplifier และวงจรตรวจจับ โดยผ่านวงจร LC Tuning ที่ทำหน้าที่เป็นขดลวดค้นหา และนำสัญญาณจากขดลวดค้นหา นำไปเข้าส่วนควบคุมความสมดุล (Control Balance) และต่อเข้าไปยัง Buffer Amplifier และวงจรตรวจจับอีกชุดหนึ่ง นำสัญญาณจากวงจรตรวจจับทั้งสองชุดไปเข้าวงจรขยายสัญญาณความแตกต่าง ซึ่งจะจับความแตกต่างของสัญญาณจากวงจรตรวจจับ ในขณะที่ปกติเราจะปรับสมดุล ให้เอาท์พุทเป็นศูนย์ จากส่วนควบคุมความสมดุล เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ ขดลวดค้นหา จะทำให้เกิดการ Shift Resonance Frequency ที่วงจร Tuning เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการไม่สมดุลขึ้นที่ วงจรขยายความแตกต่างซึ่งสามารถนำไปสร้างสัญญาณเพื่อฟังได้

เครื่องตรวจจับชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีความไวต่ำ และวงจรมีความยุ่งยาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 Induction Balance (IB) หรือ Transmit / Receive (TR)

เครื่องตรวจจับชนิดนี้ ใช้การสมดุลการเหนี่ยวนำ (Induction Balance) มีหลักการทำงาน ดังนี้ วงจรออสซิลเลเตอร์ส่งสัญญาณไปยังขดลวดค้นหาขดส่ง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ขดลวดค้นหาขดรับ ซึ่งรับสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะสมดุล เมื่อมีโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดการไม่สมดุล ของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ขดรับเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้สามารถตรวจจับโลหะได้ เครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้หลักการสมดุลการเหนี่ยวนำ แบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

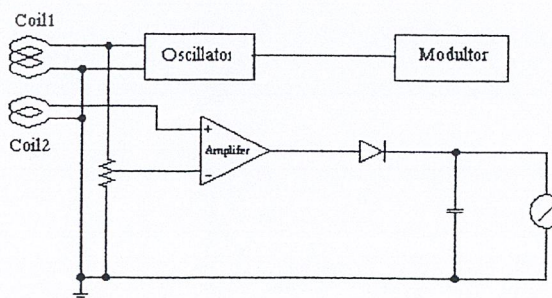
2.3.5.1 IB detector ประกอบด้วย ขดลวดตรวจจับ 3 ชุด ดังรูป



รูปที่ 2.10 บล็อกโคอะแกรมของวงจร IB detector

วงจรออสซิลเลเตอร์ผลิตความถี่ป้อนเข้าขดลวดค้นหา 3 ชุดโดยขดลวดตามรูป ขดลวด ด้านบนและด้านล่างจะพันในทิศทางตรงข้ามกัน ขดลวดทั้งสองจึงให้สนามแม่เหล็กที่มีเฟสตรงข้ามกัน สมดุลสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่ขดลวดขดกลางทำให้ไม่มีสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ทำให้เกิดความไม่สมดุลของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดสัญญาณที่ขดลวดขดรับ นำสัญญาณนี้ไปเข้าวงจรตรวจจับได้

2.3.5.2 T/R detector (Transmit / Receive) ประกอบด้วยขดลวดค้นหา 2 ชุดดังรูป



รูปที่ 2.11 บล็อกโคอะแกรม ของวงจร T/R detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดที่ต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์มีขดเดียวส่วนขดรับต่อกับวงจรรขยายแบบไม่กลับเฟส โดยอินพุตกลับเฟส ต่อสัญญาณที่เป็นแรงดันอ้างอิง เมื่อตรวจจับไม่พบโลหะจะต้องปรับสัญญาณอ้างอิงเพื่อไม่ให้มีสัญญาณที่เอาท์พุท เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดค้นหา จะเกิดสัญญาณของการไม่สมดุลขึ้น สัญญาณนี้จะส่งไปยังส่วนแสดงผลต่อไป

2.4 ออปแอมป์

ออปแอมป์คืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้หลายรูปแบบ และยังเน้นความสะดวกในการนำไปใช้งานอีกด้วย โดยสามารถประกอบเป็นวงจรได้โดยการต่อร่วมกับวงจรภายนอกเพียงไม่กี่ตัวเท่านั้น ในอดีตจะประกอบขึ้นจากอุปกรณ์หลายตัวที่ถูกนำมาบรรจุไว้ในภาชนะชิ้นเดียวกัน ซึ่งนอกจากจะทำให้ออปแอมป์มีขนาดใหญ่แล้ว ยังอาจมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำด้วย แต่ในปัจจุบันเราสามารถใช้ออปแอมป์ในรูปแบบของวงจรรวม (IC) ได้ตามท้องตลาด และจากคุณสมบัติ IC ออปแอมป์ที่ได้พัฒนาขึ้นทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไป

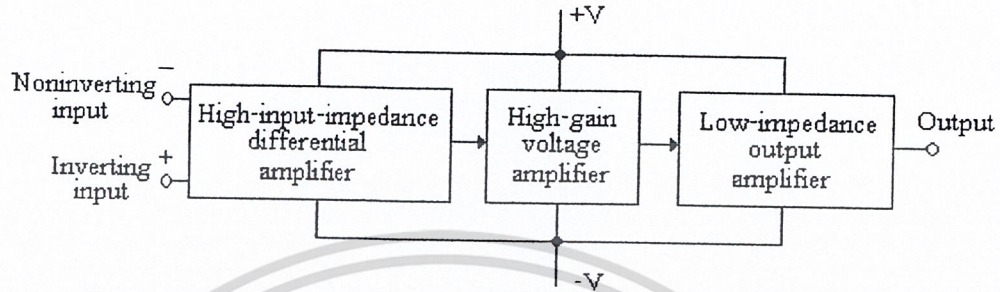
โดยทั่วไปแล้วเราสามารถกล่าวได้ว่า ไอซีออปแอมป์คืออุปกรณ์โซลิดสเตท (SOLID STATE) ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถตรวจวัดสัญญาณไฟตรงและไฟสลับได้ และยังสามารถนำไปใช้ขยายสัญญาณได้อีกด้วย ไอซีออปแอมป์พื้นฐานจะต้องประกอบด้วยวงจรรภายในภาคต่างๆ ดังนี้

1. ไอซีออปแอมป์หรือวงจรรขยายผลต่าง (DIFFERENTIAL AMPLIFIER) ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก
2. วงจรรขยายแรงดันซึ่งมีอัตราขยายสูงมาก
3. วงจรรขยายภาคเอาท์พุทที่มีเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำมาก

รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรรภายในภาคต่างๆ ของวงจรรออปแอมป์ดังกล่าวและจากรูปจะสังเกตว่าแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับออปแอมป์มักจะประกอบด้วยไฟบวกและลบเพื่อให้เอาท์พุทสามารถสวิงได้ทั้งซีกบวกและลบเทียบกับกราวด์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่กล่าวมา ทำให้เราสามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของออปแอมป์ในอุดมคติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกโคไดอะแกรมของวงจรภายในภาคต่างๆ ของออปแอมป์

1. เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าสูงเป็นอนันต์ กระแสเข้าที่อินพุตจะต่ำจนเกือบเท่าศูนย์ หรืออีกนัยหนึ่ง ไม่มีกระแสอินพุตเข้าสู่ออปแอมป์เลย
2. อัตราขยายขณะเปิดคูลูป A (ขณะที่ยังไม่มีการป้อนกลับ) จะมีค่าสูงมาก ซึ่งหมายความว่า แรงดันระหว่างขั้วอินพุตควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (เนื่องจาก $V_{out}/A = V_{in}$)
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากจนไม่ทำตัวเป็น โหลดต่อภาคเอาต์พุตของวงจรขยาย

ขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์มีลักษณะต่างกันดังนี้ คือ สำหรับขั้วลบเมื่อป้อนไฟตรงหรือไฟสลับเข้าไป ในขณะที่ขั้วบวกต่อกับจุดอ้างอิงจุดหนึ่ง สัญญาณที่ออกมาที่เอาต์พุตจะกลับเฟสกับอินพุต 180 องศา ส่วนการป้อนสัญญาณที่ขั้วบวก เอาต์พุตจะมีเฟสตรงกับอินพุต ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเครื่องหมายที่อินพุตคือการแสดงเฟสของเอาต์พุตเทียบกับอินพุต ส่วนขั้วสำหรับปรับออฟเซต หรือชดเชยความถี่นั้น โดยมากมักจะ ไม่ถูกแสดงในวงจรทั่วไป

ในการนำออปแอมป์ไปใช้งานจริงนั้น เราอาจไม่จำเป็นต้องศึกษาให้ลึกซึ้งถึงวงจรภายในก็ได้

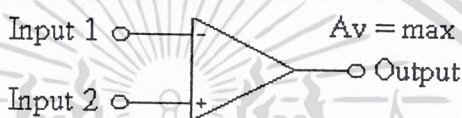
2.4.2 ลักษณะการทำงาน

ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีอัตราขยายเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติอัตราขยายอาจจะมีค่าสูงสุดเพียง 1,000 หรือ 1,000,000 เท่านั้น ซึ่งเรียกว่าอัตราขยายขณะเปิดคูลูป (AV) ดังรูปที่ 2.14 ในขณะที่เกิดความแตกต่างของแรงดันเพียงเล็กน้อยระหว่างขั้วอินพุตทั้งสอง เอาต์พุตจะสามารถให้สัญญาณสูงชันหลายเท่า (ตามค่าของอัตราขยาย AV) หากแต่จะถูกจำกัดด้วยขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

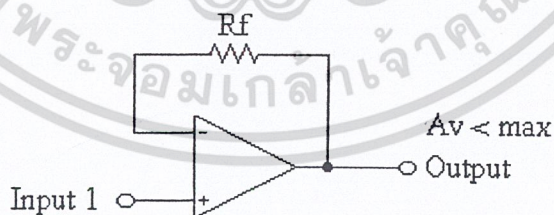
แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่เราป้อนให้แก่อปแอมป์ด้วย แต่ถึงเช่นนั้นก็เอาท์พุทก็จะไม่สามารถมีค่าสูงสุดเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงได้จริง

จากคุณสมบัติข้างต้นเราสามารถนำอปแอมป์ในขณะที่เปิดดูไปใช้งานเป็นคอมพาราเตอร์ (COMPARATOR) หรือวงจรเปรียบเทียบแรงดันได้โดยเอาท์พุทจะเปลี่ยนทันทีเมื่อมีความแตกต่างของแรงดันเกิดขึ้นระหว่างขั้วอินพุทของอปแอมป์



รูปที่ 2.13 ออปแอมป์ดูเปิด

แต่ทว่าการทำงานของอปแอมป์ยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านั้น นอกจากนี้จะพบว่าการใช้อปแอมป์ในลักษณะของดูปิด (มีการป้อนกลับ) จะทำให้ออปแอมป์มีประโยชน์สูงมากขึ้น ดังรูปที่ 2.14 การป้อนกลับในรูปใช้ตัวต้านทาน RF เพียงตัวเดียว ซึ่งมีผลให้วงจรมีเสถียรภาพสูงขึ้นและมีสัญญาณรบกวนน้อยลง ในขณะที่ขั้วอินพุทจะลดลงด้วย



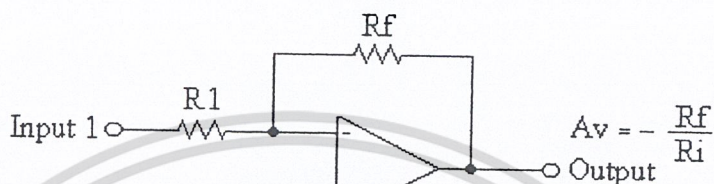
รูปที่ 2.14 ออปแอมป์ดูปิด

ในวงจรรูปที่ 2.15 แสดงการใช้อปแอมป์โดยมีการป้อนสัญญาณเอาท์พุทกลับมายังอินพุท นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมอัตราขยายแรงดัน (ในขณะที่เปิดดู) ได้โดยอาศัยตัวต้านทาน 2 ตัวเท่านั้น ทำให้อัตราขยายแรงดัน AV มีค่าดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AV = -R_f / R_i$$

โดยเครื่องหมายลบแสดงถึงการกลับเฟสของเอาต์พุตเทียบกับอินพุต

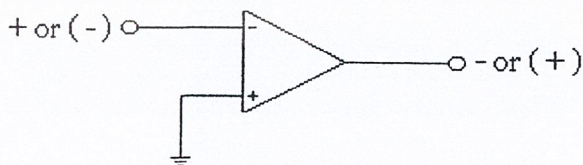


รูปที่ 2.15 ออปแอมป์ควบคุมอัตราขยาย

ส่วนรูปที่ 2.16 แสดงการป้อนกลับในกรณีที่ $AV = 1$ คุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดนี้คือคุณสมบัติทั่วไปของออปแอมป์ที่จะนำไปใช้ในบทต่อไป และนอกจากนี้ คุณสมบัติอีกประการที่ควรรู้ก็คือเรื่องความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ระหว่างอินพุตของออปแอมป์ซึ่งสรุปไว้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การป้อนกลับในกรณีที่ $AV = 1$



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 คุณสมบัติและพารามิเตอร์บางชนิดของออปแอมป์

1. อินพุตอิมพีแดนซ์

ในทางอุดมคติควรมีค่าเท่ากับอนันต์ แต่ในความเป็นจริงอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 1 เมกะโอห์ม ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้ยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าใดออปแอมป์ตัวนั้นก็จะทำงานได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำออปแอมป์ไปใช้งานในย่านความถี่สูง ควรระวังผลจากอินพุตคาปาซิเตอร์ของวงจรด้วย ซึ่งมักจะมีค่าประมาณ 2 พิโคฟารัด เมื่อขั้วอินพุตขั้วหนึ่งต่อกับกราวด์

2. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีเอาท์พุตอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์แต่ในความเป็นจริงค่านี้อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 25 ถึงหลายพันโอห์มขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตาม เรามักสมมติให้อเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เพียงง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง และมีเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำ ออปแอมป์จึงเปรียบเสมือนเป็นอุปกรณ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์แมต칭 (IMPEDANCE MATCHING) ที่ดีตัวหนึ่ง

3. กระแสไบอัสด้านอินพุต

เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์ไม่เป็นอนันต์ดังนั้นจึงมีกระแสค่าน้อยๆ (มีหน่วยเป็น นาโน ถึง ไมโครแอมแปร์) ไหลผ่านขั้วอินพุตทั้งสอง ซึ่งค่าเฉลี่ยของกระแสดังกล่าวถูกเรียกว่าเป็นกระแสไบอัสด้านอินพุต กระแสจะก่อให้เกิดความไม่สมดุลย์ในวงจรภายใน ซึ่งจะเป็ผลกระทบท่อภาคเอาท์พุตด้วย ดังนั้นกระแสนี้ควรถูกกำจัดให้มีค่าต่ำสุด

4. แรงดันออฟเซต (OFFSET) ที่เอาท์พุต

แรงดันออฟเซตที่เอาท์พุตเกิดขึ้นจากกระแสไบอัสด้านอินพุตซึ่งในทางอุดมคติเมื่อแรงดันอินพุตระหว่างขั้วทั้งสองมีค่าเท่ากัน แรงดันที่เอาท์พุตควรเป็นศูนย์ แต่โดยทั่วไปมักไม่เป็นเช่นนั้นคือ มักมีแรงดันหนึ่งปรากฏที่เอาท์พุตขณะที่อินพุตเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้โดยการป้อนแรงดันหรือกระแสออฟเซตแล้วปรับจนได้ $V_{out} = 0$ โวลต์

5. กระแสออฟเซตที่อินพุต

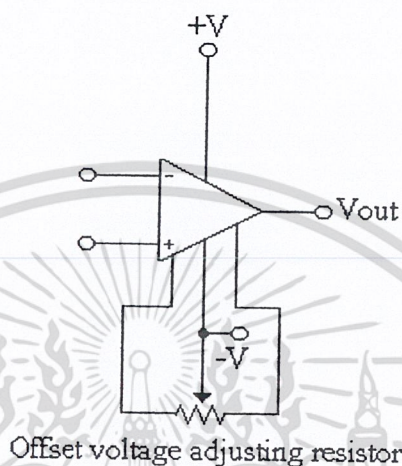
ในการปรับแรงดันออฟเซตที่เอาท์พุตให้มีค่าเป็นศูนย์ กระแสอินพุตทั้งสองขั้วควรมีค่าเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า เราต้องจ่ายกระแสให้แก่อินพุตขั้วหนึ่งมากกว่าอีกขั้วหนึ่งเสมอ

6. แรงดันออฟเซตที่อินพุต

ในอุดมคติแรงดันเอาท์พุตจะเท่ากับศูนย์ก็ต่อเมื่อแรงดันระหว่างขั้วอินพุตเป็นศูนย์เช่นกัน แต่ในทางปฏิบัติความไม่สมดุลย์ภายในวงจรมักทำให้เราต้องป้อนแรงดันค่าหนึ่งแก่อินพุตใดๆ

เอกสารนี้เพื่อทำให้แรงดันเอาท์พุตเป็นศูนย์ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การปรับออฟเซทให้เป็นศูนย์ (OFFSET NULLING)



รูปที่ 2.18 วงจรที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้แก่อปแอมป์

ในการปรับแรงดันเอาต์พุตให้เป็นศูนย์หรือการปรับแรงดันออฟเซทที่อินพุตให้เป็นศูนย์นั้น เราอาจใช้ชื่อ OFFSET NULLING ที่ผู้ผลิตได้เตรียมไว้ให้แล้ว โดยให้ศึกษาข้อมูลรายละเอียดของอปแอมป์เบอร์นั้นๆ รูปที่ 2.18 แสดงวงจรที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้แก่อปแอมป์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบวงจรให้เรียบร้อยและเช็คอุปกรณ์ที่นำมาต่อ
2. ลดระดับสัญญาณอินพุตจนเหลือศูนย์ ถ้ามีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับอินพุตอยู่ ให้ตรวจสอบดังนี้
 - 2.1 ถ้าตัวต้านทานมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณอินพุตตั้งแต่ 1% ขึ้นไป ปลดตัวต้านทานไว้เช่นเดิม
 - 2.2 หากตัวต้านทานดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากัน ให้นำแหล่งกำเนิดสัญญาณอินพุตนั้นออก แล้วต่อตัวต้านทานที่มีขนาดเท่ากับอินพุตอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดอินพุตเข้าแทน
 - 2.3 ต่อโหนดเข้ายังขั้วเอาต์พุต
 - 2.4 ป้อนไฟตรงให้วงจร
 - 2.5 วัดแรงดันที่เอาต์พุตด้วย โวลท์มิเตอร์หรือออสซิลโลสโคป
 - 2.6 ปรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้จน V_{out} มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ถอดอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้าไป แล้วต่อวงจรดังเดิม แต่ห้ามแตะต้องตัวต้านทานปรับค่าได้ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออุปกรณ์โซลิตสเตททุกชนิดรวมทั้งออปแอมป์ ดังนั้นผลกระทบจากอุณหภูมิจะทำให้กระแสแรงดันออฟเซ็ทเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนแปลงอันเกิดขึ้นจากอุณหภูมิว่าคริปท์ ดังนั้นในขณะที่ทำงานควรตรวจสอบด้วยว่าออปแอมป์จะมีเปอร์เซ็นต์การผิดพลาดมากน้อยเพียงใดหากอุณหภูมิเปลี่ยนไป

9. การชดเชยความถี่

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับออปแอมป์ที่ใช้ในย่านความถี่สูงก็คือการออสซิลเลต (OSCILLATION) ซึ่งเกิดอัตรการขยายที่มีค่าค่อนข้างสูงของออปแอมป์เอง และยังเกิดจากการเลื่อนเฟส (PHASE SHIFT) ณ จุดต่างๆ ภายในวงจร เป็นผลให้เราไม่สามารถควบคุมอัตรการขยายของสัญญาณป้อนกลับได้ วิธีแก้ปัญหาก็คือต่อตัวเก็บประจุชดเชยให้แก่วงจร ซึ่งจะทำให้อัตรการขยายของออปแอมป์มีขนาดลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

10. อัตราสลูว์ (SLEW RATE)

อัตราสลูว์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับเวลาดังสมการ

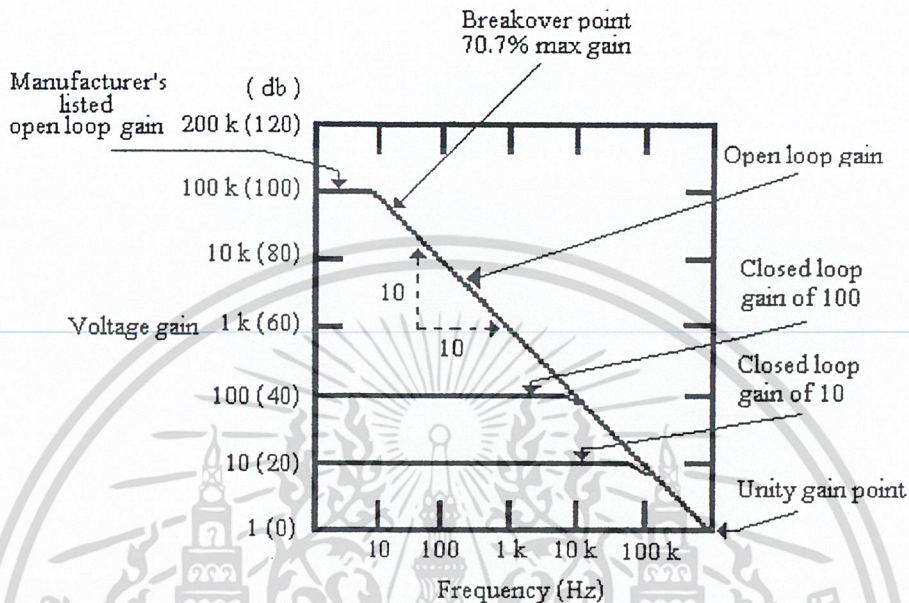
อัตราสลูว์ = การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาต์พุต/การเปลี่ยนแปลงเวลา

11. การตอบสนองต่อความถี่

อัตรขยายของออปแอมป์จะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะพบว่าอัตรขยายที่ผู้ผลิตแสดงไว้ในคาต้าชีท (DATA SHEET) จะเป็นอัตรขยายที่ความถี่ 0 เฮิรท์ซ หรือไฟตรง (ซึ่งแสดงให้เห็นความถี่สูงสุดของออปแอมป์) ในการทำงานแบบลูปเปิด จะเห็นได้ว่าวงจรมีเสถียรภาพต่ำมาก นั่นคือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสิบเท่า อัตรขยายจะลดลง 10 เท่าทันที

โดยทั่วไปแบนด์วิดท์ของวงจรมักหมายถึงช่วงความถี่ที่อัตรขยายมีค่า 70.7% ของอัตรสูงสุด จากตัวอย่างในรูป แบนด์วิดท์ของออปแอมป์ขณะเปิดลูป จะมีค่าประมาณ 10 เฮิรท์ซ ดังนั้นหากต้องการให้วงจรถูกออกแบบขึ้นสามารถทำงานได้ที่ความถี่อินพุตสูงๆ จะต้องป้อนสัญญาณจากเอาต์พุตกลับมายังอินพุต (การป้อนกลับแบบลบ) ซึ่งจะทำให้อัตรขยายของลูปปิดลดลง แต่ในขณะเดียวกันความถี่ที่ต้องการขยายเท่ากับ 70.7% ของอัตรขยายสูงสุดก็จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรเท่ากัน ส่วนจุดที่มีอัตรขยายเท่ากับหนึ่ง (UNITY GAIN POINT) จะแสดงความถี่สูงสุดของออปแอมป์เมื่ออัตรขยายมีค่าเป็นหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 อัตราขยายของออปแอมป์จะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

12. ผลคูณของอัตราขยายและแบนด์วิดท์

จากที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่แล้วมาว่า เมื่ออัตราขยายลดลงเท่าใดความถี่ก็จะสูงขึ้นด้วยจำนวนเท่าของค่านั้นด้วย ซึ่งแสดงว่าผลคูณระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิดท์ซึ่งจะมีค่าคงที่เสมอไป และเราสามารถหาค่านั้นได้จากจุดซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง (ค่านี้จะหาได้จากค่าตัดยี่สิบ) ผลคูณนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณความถี่สูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้ ตัวอย่างเช่นหากเราพบว่าความถี่ที่อัตราขยายมีค่าเท่ากับหนึ่ง มีค่าเป็น 1 เมกะเฮิรตซ์และอัตราขยายของวงจรที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 100 ดังนั้น ความถี่สูงสุดที่เราประมาณไว้ควรมีค่าอยู่ใน

$$BW = 1,000,000/100 = 10 \text{ กิโลเฮิรตซ์}$$

13. อัตราการลดสัญญาณชนิดคอมมอนโหมด (CMRR)

COMMON MODE REJECTION RATIO เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของออปแอมป์ที่ได้มาจากภาคอินพุตที่เป็นดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์ หมายความว่า หากสัญญาณที่เข้ามายังขั้วอินพุตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองมีเฟสตรงกันและยังมีขนาดเท่ากัน สัญญาณทั้งสองนี้จะถูกจำกัดทิ้งไป ดังนั้นเอาท์พุทจะเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณที่มีขนาดต่างกันและมีเฟสต่างกันจะเรียกว่าอยู่ในคิฟเฟอร์เรนเชียลโหมด

14. หน่วยเดซิเบล (dB)

การคำนวณอัตราขยายของวงจรใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_x = X_{OUT}/X_{IN}$$

โดยที่ X อาจเป็นแรงดันหรือกระแสก็ได้และโดยทั่วไปนิยมหาอัตราขยายจากสมการ

$$dB = 20 \text{ Log } AV$$

2.4.4 ค่าใช้งานต่างๆ ที่ควรเข้าใจ

การนำไอซีออปแอมป์มาใช้ ผู้ใช้ควรศึกษาค่าชี้ของบริษัผู้ผลิตให้ละเอียดเสียก่อน เพื่อป้องกันออปแอมป์ชำรุดหรือเสียหาย ค่าต่างๆ ที่ควรรู้ได้แก่

1. แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง
2. กำลังที่สูญเสียในตัวไอซี ซึ่งกำลังสูงสุดที่อุปกรณ์สามารถปลดปล่อยออกมา

โดยที่อุณหภูมิไม่สูงจนทำให้ไอซีพัง

3. แรงดันสูงสุดระหว่างขั้วอินพุท
4. แรงดันสูงสุดที่อินพุทแต่ละขั้ว
5. ความสามารถในการทนภาวะลัดวงจรที่เอาท์พุท
6. อุณหภูมิที่ใช้งาน
7. อุณหภูมิที่ไ้เก็บอุปกรณ์
8. อุณหภูมิของขาอุปกรณ์ และอุณหภูมิที่ไอซีสามารถทนได้ในขณะที่ถูกบัดกรี

2.4.5 ชนิดของออปแอมป์และลักษณะรูปแบบต่างๆ

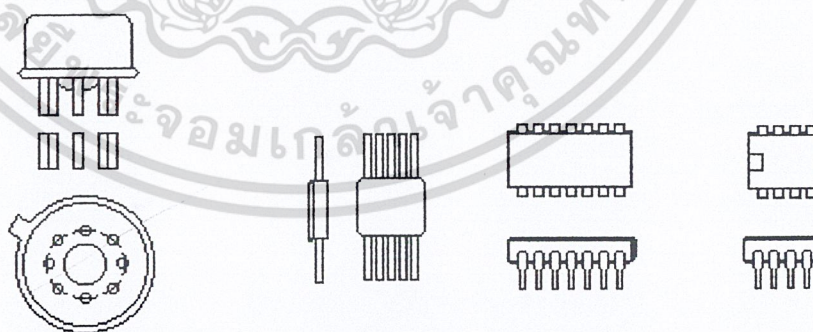
ออปแอมป์ได้ถูกค้นพบขึ้นเป็นเวลานานพอสมควรแล้ว การนำออปแอมป์ในรูปแบบของไอซี ซึ่งสามารถใช้งานได้ค่านั้นจะเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1963 เท่านั้น นำโดยการเสนออปแอมป์เบอร์ μA 702 ของบริษัท FAIRCHILD SEMICONDUCTOR จนถึงปัจจุบันออปแอมป์ได้ถูกออกแบบพัฒนาขึ้นจนมีความสามารถสูงกว่าเดิมมาก แต่อย่างไรก็ตาม เรายังสามารถแบ่งชนิด

เอกสารนี้ของออปแอมป์ได้เป็นกลุ่มหรือตระกูล ดังตารางที่ 1
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่ม	ลักษณะการใช้งาน	คุณสมบัติพิเศษ
1	ใช้กับงานทั่วไป	ใช้งานได้ในช่วงความถี่ DC ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์
2	ใช้กับสัญญาณ DC ได้ดี	มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมากทำให้กระแสไบอัสมีค่าต่ำ
3	ใช้กับสัญญาณ AC ได้ดี	มีแบนด์วิดท์กว้างมากและอัตราสลับมีค่าสูง
4	ใช้กับแรงดันสูงและวงจรที่ต้องใช้กำลังมาก	สามารถใช้ขับโหลดได้โดยตรง
5	ชนิดที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว	เช่น ออปแอมป์ชนิดที่สามารถโปรแกรมได้

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของออปแอมป์

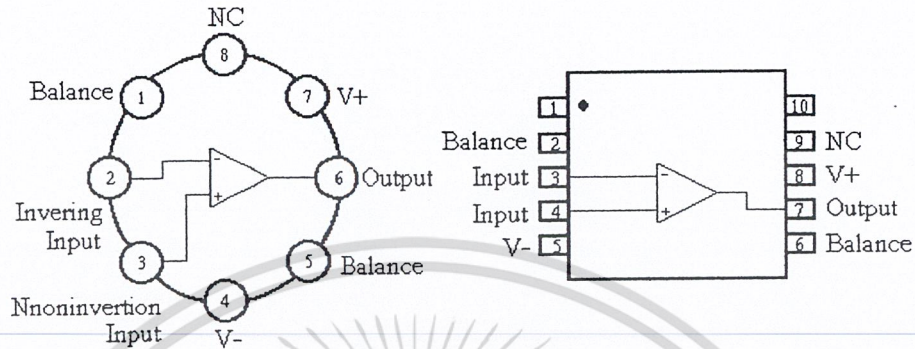
โดยทั่วไปตามท้องตลาด เราสามารถพบภาชนะในการบรรจุออปแอมป์ในลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.20 คือเป็นแบบภาชนะโลหะ ภาชนะแบบแบน DIP (DUAL IN LINE PACKAGE) และ MINI DIP



TO - 99, TO - 100, TO - 5 Metal package Plastic, ceramic glass / metal flat - pack Plastic, ceramic glass / metal DIP Mini - CIP

รูปที่ 2.20 ออปแอมป์แบบ DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

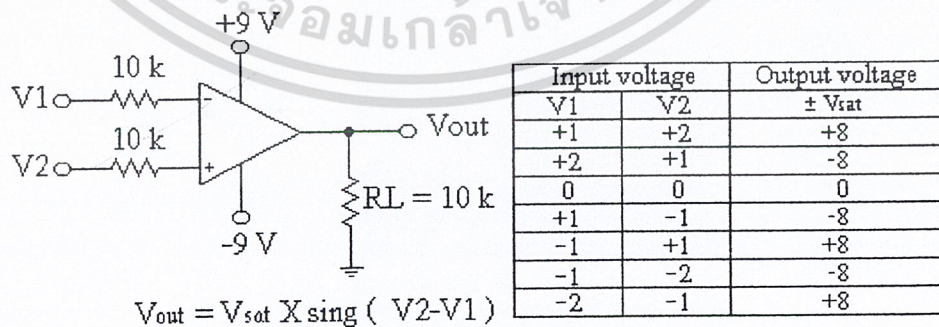


รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขาต่างๆ ออกจากภาชนะที่ใช้บรรจุออปแอมป์

2.5 วงจรออปแอมป์พื้นฐาน

2.5.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (คอมพาราเตอร์)

การทำงานเป็นคอมพาราเตอร์ในขณะเปิดดูนั้น ออปแอมป์จะสามารถเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่างขั้วอินพุตทั้งสองได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยใช้หลักเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างขั้วอินพุตที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อแรงดันที่ขั้วลบมีค่าเป็นบวกสูงกว่าแรงดันอินพุตที่ขั้วบวกสัญญาณที่เอาต์พุตจะเป็นลบ และมีขนาดเกือบเท่ากับ $-V_{CC}$ จากแหล่งจ่ายดังรูปที่ 2.22

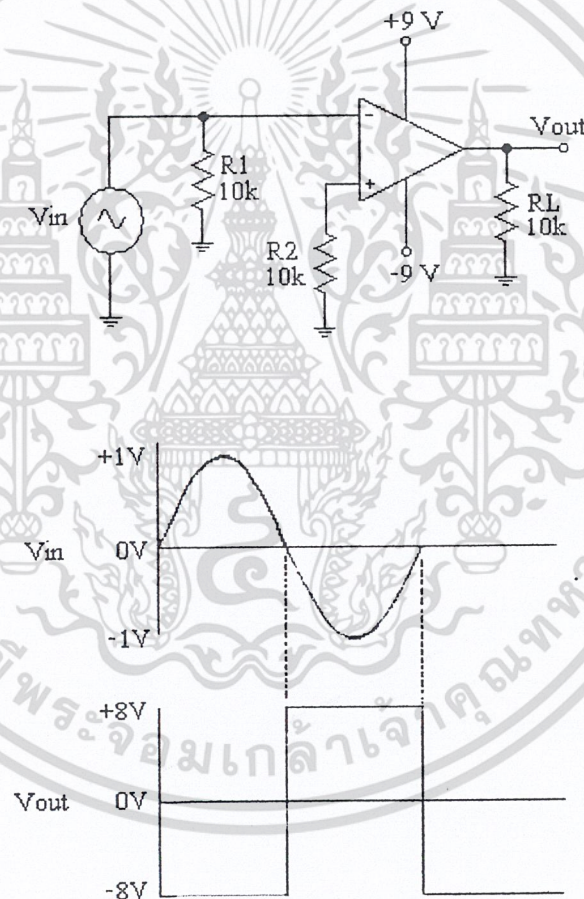


รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่างขั้วทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

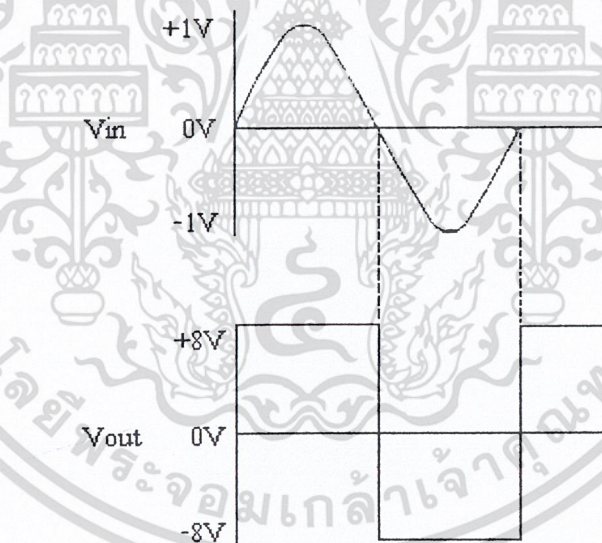
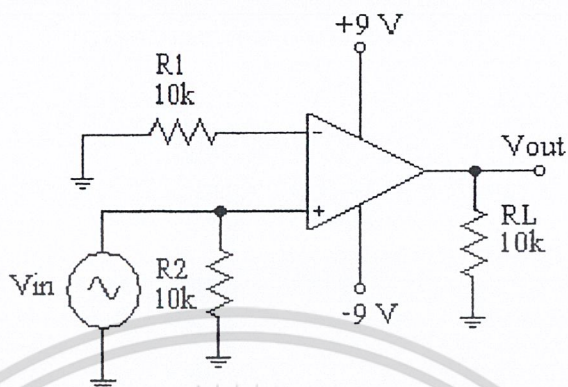
2.5.2 การตรวจวัดสัญญาณรูปชานัน

จากคุณสมบัติของคอมพาราเตอร์ เราสามารถนำออปแอมป์มาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดแรงดันของสัญญาณที่เปลี่ยนไป โดยให้แรงดันที่ขั้วหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่แรงดันป้อนให้ให้แก่อีกขั้วหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป แรงดันที่เอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.23 โดยเราให้แรงดันอ้างอิงเท่ากับศูนย์ที่ขั้วบวกของอินพุต ดังนั้นเมื่ออินพุตที่ขั้วลบสูงกว่าศูนย์แรงดันที่เอาต์พุตจะมีขนาดเป็น $-V_{CC}$ และจะเป็น $+V_{CC}$ เมื่อแรงดันลดลงต่ำกว่าศูนย์



รูปที่ 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เอาต์พุต

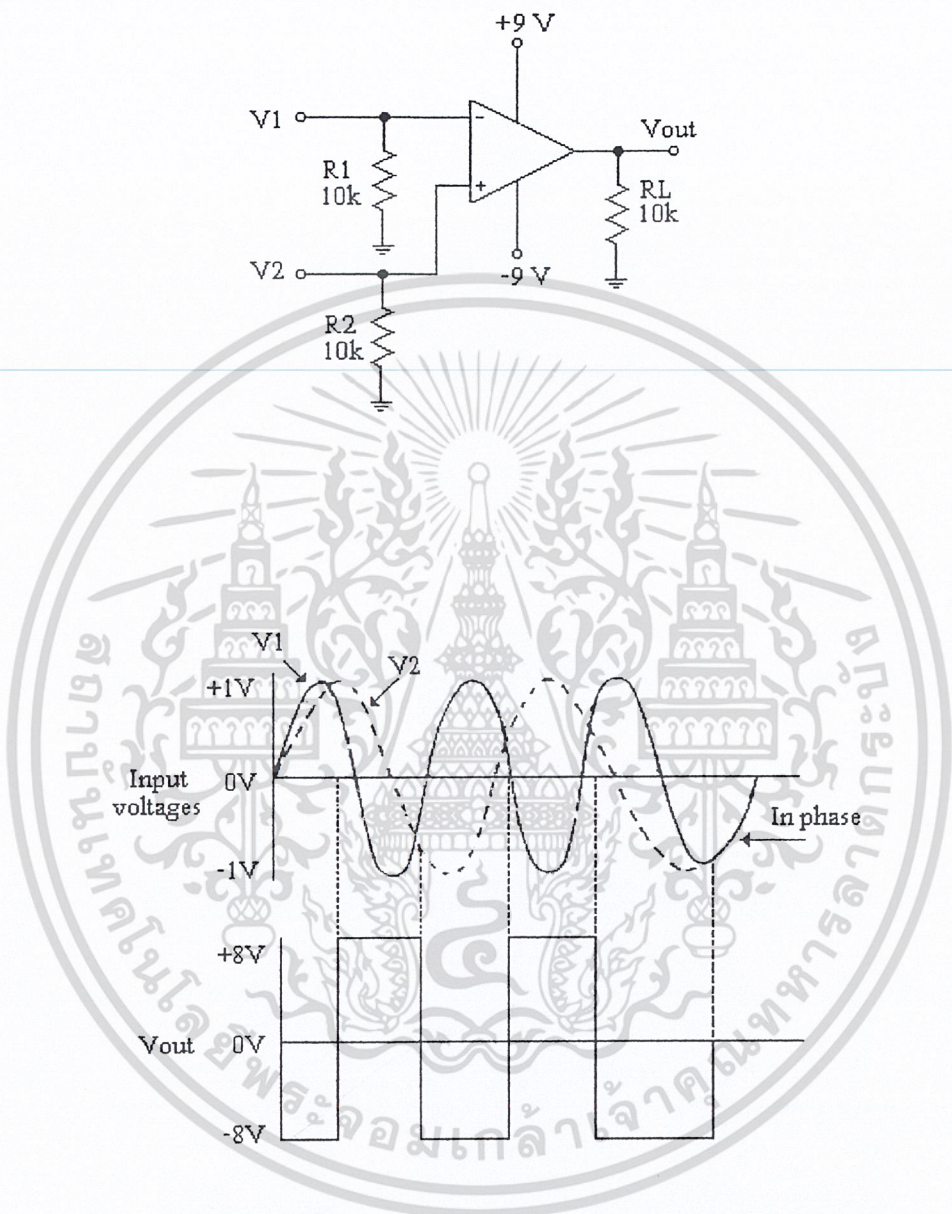
จากวงจรในรูปที่ 2.23 จะพบว่าเฟสของอินพุตและเอาต์พุตจะตรงกันข้ามเสมอ ดังนั้นในกรณีที่เรต้องการให้อินพุตและเอาต์พุตมีเฟสตรงกัน เราสามารถสลับการทำงานของขั้วอินพุตได้ดังรูปที่ 2.24 โดยการเปลี่ยนให้ขั้วลบทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิงแทน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงการเปลี่ยนให้ขั้วลบทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิงแทน

2.5.3 วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ

วงจรคอมพาราเตอร์อาจถูกใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบเฟสสัญญาณสองตัว ซึ่งแต่ละตัวอาจมีความถี่ไม่แน่นอน นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตั้งแต่ใดก็ตามที่เฟสและขนาดของสัญญาณอินพุตทั้งสองตรงกัน เอาท์พุทของออปแอมป์จะมีค่าเป็นศูนย์ทันทีดังแสดงในรูปที่ 2.25 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



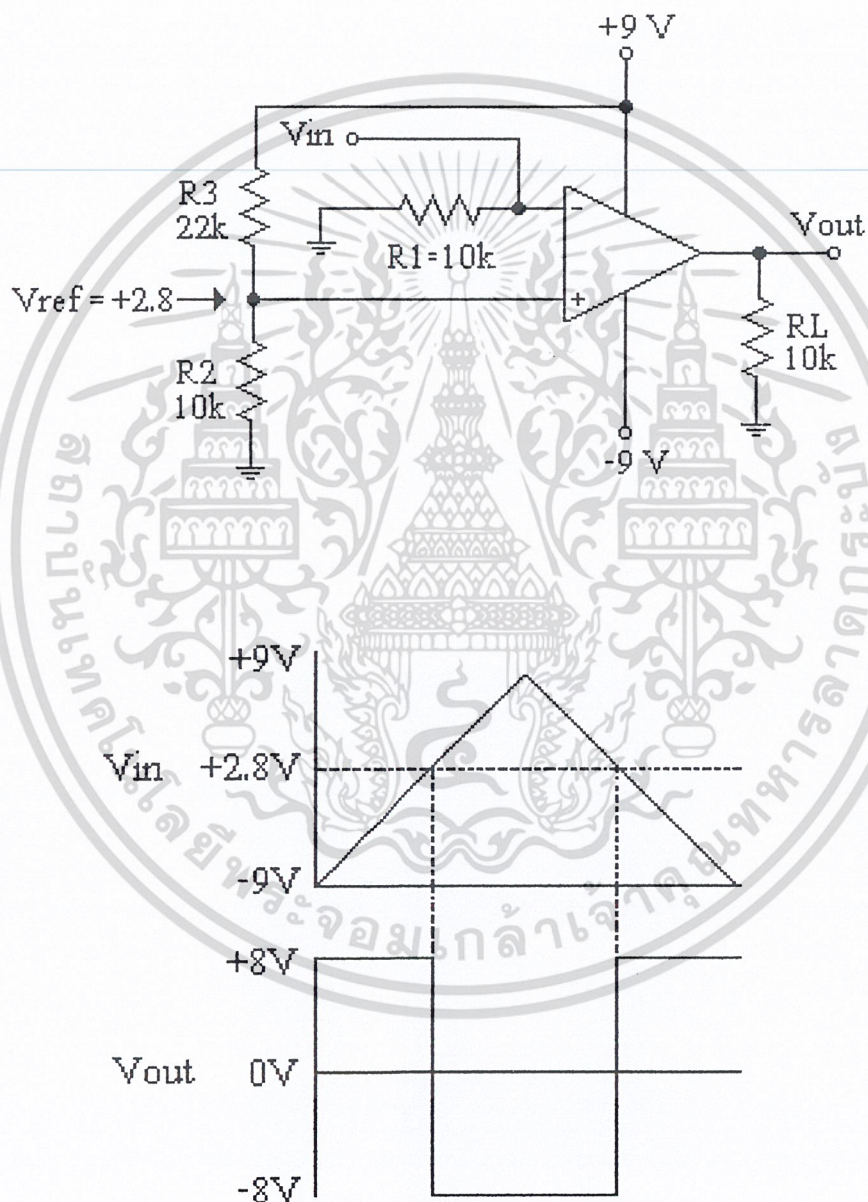
รูปที่ 2.25 แสดงเฟสและขนาดของสัญญาณอินพุตทั้งสองตรงกัน

2.5.4 วงจรตรวจจับระดับแรงดัน

นอกจากนี้เราสามารถใช่วงจรคอมพาราเตอร์สำหรับตรวจวัดสัญญาณระดับสัญญาณว่ามีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงหรือยัง โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับที่ได้ศึกษามา ต่างกันเพียงการป้อนแรงดันอ้างอิงเท่านั้นแทนที่จะป้อนศักดากราวด์เช่นเดิม โดยที่แรงดันอ้างอิง V_{ref} จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $V_{ref} = R2 / (R2 + R3) (+V)$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้เราป้อนแรงดันอ้างอิงที่ขั้วบวก และป้อนสัญญาณที่ต้องการจะวัด ณ ขั้วอินพุตลบ ดังนั้นสัญญาณที่เอาท์พุทจึงมีลักษณะกลับเฟสอินพุท 180 องศา ส่วนรูปที่ 2.26 เป็นการตรวจระดับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นลบค่าหนึ่ง

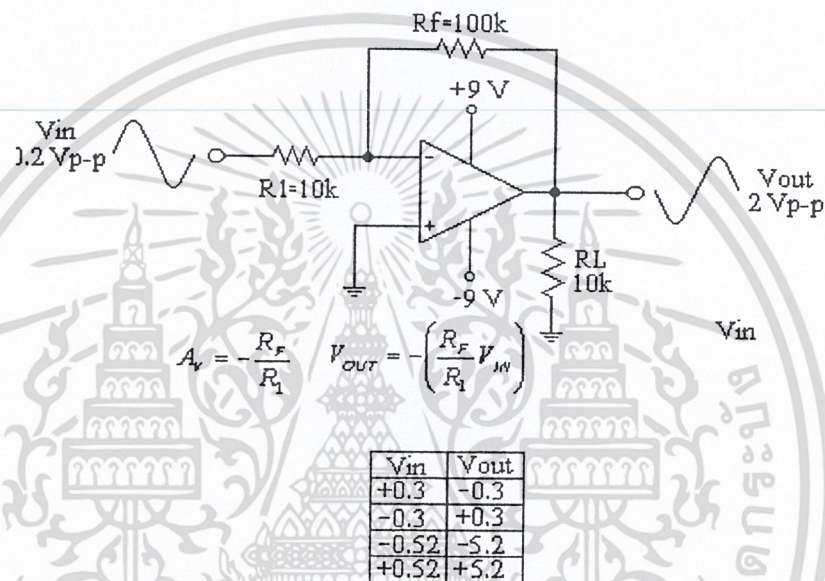


รูปที่ 2.26 แสดงการตรวจระดับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นลบค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 วงจรขยายกลับเฟส (อินเวอร์ตติ้งแอมป์)

โดยทั่วไปวงจรขยายจะหมายถึงวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณอินพุตหลายๆ มาเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดสูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสัญญาณที่ว่าอาจเป็นได้ทั้งแรงดันหรือกระแส ในลักษณะเดียวกันวงจรขยายของออปแอมป์ก็คือวงจรที่มีอัตราขยายแรงดันสูงมาและนอกจากนี้เรายังสามารถควบคุมอัตราขยายของออปแอมป์ได้โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกเพียงไม่กี่ตัวดังได้อธิบายมาแล้ว



รูปที่ 2.27 แสดงวงจรขยายกลับเฟสแบบมาตรฐาน

รูปที่ 2.27 แสดงวงจรขยายกลับเฟสแบบมาตรฐาน ซึ่งวิธีที่ใช้เป็นลูปปิด เรียกว่าการป้อนกลับแบบลบ โดยนำเอาต์พุตซึ่งกลับเฟสกลับอินพุตมาป้อนที่จุดอินพุตอีกที ผลก็คือวงจรภายในออปแอมป์จะพยายามปรับเอาต์พุตจนกระทั่งความต่างศักย์ระหว่างอินพุตมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จากสมการอัตราขยายแรงดัน AV

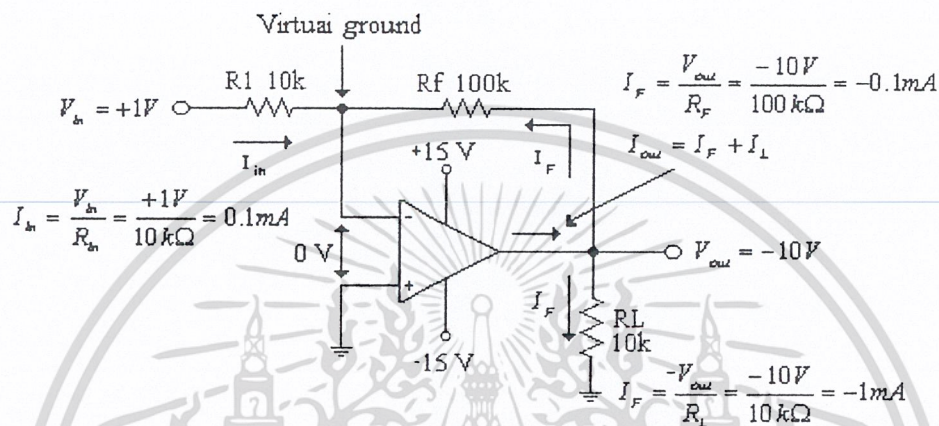
$$AV = V_{out} / V_{in}$$

เราสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าค่าขยายแรงดัน AV ของออปแอมป์เมื่อใช้ในโหมดของลูปปิด จะสามารถหาได้ด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ AV = Rf/Rin นั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาวจรในรูปที่ 2.28 และจากข้อกำหนด 2 ข้อที่เคยกำหนดมาแล้วคือ

1. ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอินพุทเป็นศูนย์
2. กระแสเข้าขั้วอินพุทใดๆ เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.28 วงจรขยายกลับเฟส

โดยใช้หลักการจากข้อกำหนดที่ 1 ซึ่งทำให้ขั้วอินพุทลบบมีศักย์ค่าเทียบเท่ากับกราวด์ เราสามารถเขียนได้ว่า กระแส I_{in} จะมีค่า

$$I_{in} = V_{in} / R_{in} = 1 \text{ โวลท์} / 10 \text{ กิโลโอห์ม} = 0.1 \text{ มิลลิแอมป์}$$

จากข้อกำหนดที่ 2 เราพบว่ากระแสที่ไหลผ่าน R_f ก็จะเท่ากับกระแส I_{in} ดังนั้นเราจึงสามารถแรงดันที่เอาท์พุทกับกราวด์ โดยที่กระแส I_f จะมีค่า

$$I_f = -V_{out} / R_f$$

และเนื่องจาก $I_{in} = I_f$ ดังนั้น

$$V_{in} / R_{in} = -V_{out} / R_f$$

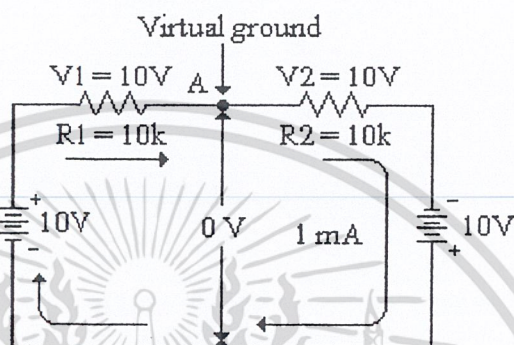
นั่นคือ $AV = V_{out} / V_{in} = -R_f / R_{in}$

ดังนั้นในการหา V_{out} ของออปแอมป์เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

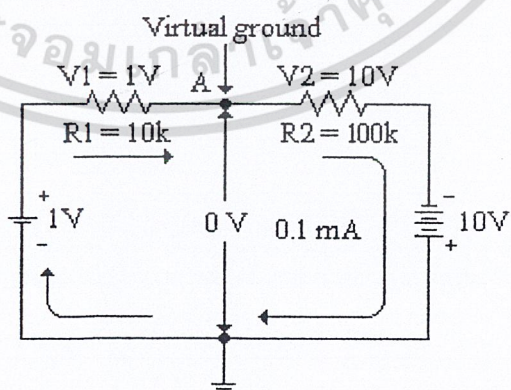
$$V_{out} = AV V_{in} = -R_f / R_{in} V_{in}$$

โดยมีเครื่องหมายลบแสดงการกลับเฟสของเอาต์พุตเทียบกับอินพุต



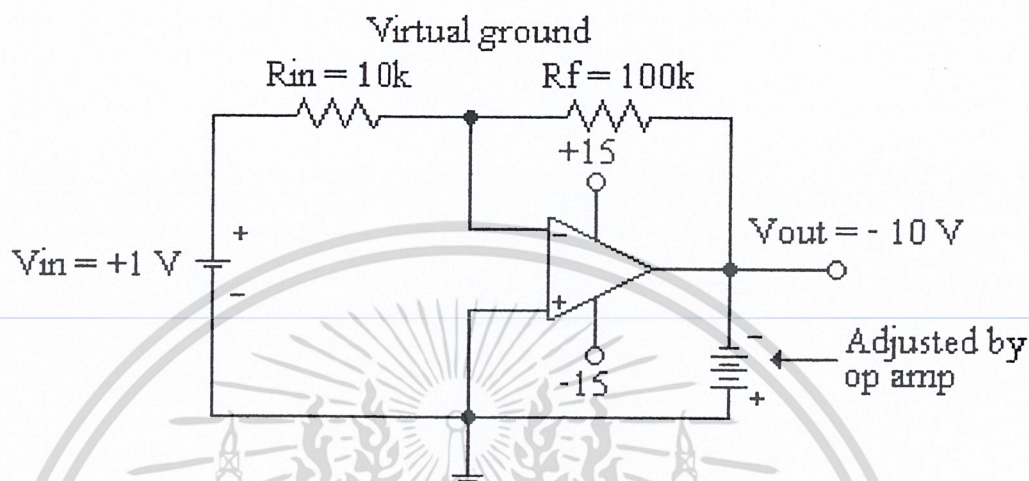
รูปที่ 2.29 แสดงวงจรที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ขนาด 10 โวลต์

รูปที่ 2.29 แสดงวงจรที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ขนาด 10 โวลต์ต่ออนุกรม 2 ตัว โดยมีตัวต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม จากกฎของโอห์มกระแสไหลในวงจรจะมีค่า 1 มิลลิแอมป์ นั่นคือจะมีแรงดันไฟ 10 โวลต์ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว ดังนั้นหากพิจารณาศักดาไฟฟ้าของลูปนี้จะพบว่าจุด A จะมีศักดาไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทั้งๆที่จุดนี้ไม่ได้สัมผัสกับกราวด์



รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดกราวด์เสมือน โดยที่แรงดันไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 อธิบายกราวด์เสมือนที่เกิดขึ้นที่จริงในวงจรขยายอินพุต

2.5.6 อินพุตอิมพีแดนซ์ขณะปิดลูป

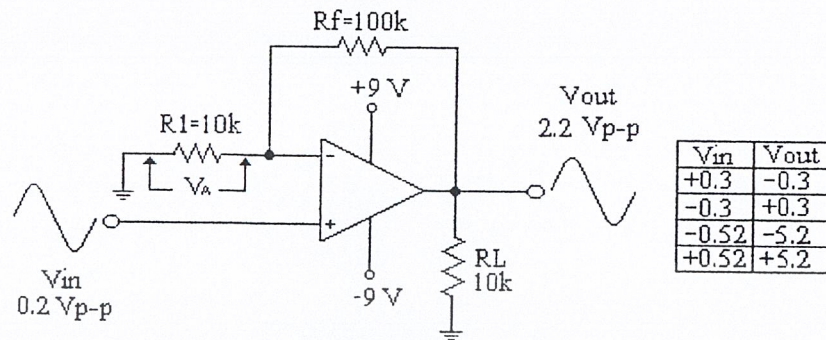
จากที่กล่าวมาแล้วได้กล่าวถึงอินพุตอิมพีแดนซ์ของอินพุตขณะปิดลูป ซึ่งมีค่าเป็นอนันต์แต่ในขณะทำงานเป็นอินเวอร์ตติ้งแอมป์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรเปลี่ยนไปโดยที่อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรในรูปที่ 2.27 จะมีค่า

$$Z_{in} = V_{in} / I_{in} = R_{in}$$

2.5.7 วงจรขยายไม่กลับเฟส (นั้่นอินเวอร์ตติ้งแอมป์)

วงจรขยายไม่กลับเฟสหรือนั้่นอินเวอร์ตติ้งแอมป์ จะแตกต่างกับอินเวอร์ตติ้งแอมป์ ในแง่ของอัตราขยายและเฟสของเอาต์พุต แต่อย่างไรก็ตามอัตราขยายแรงดันของวงจรมั้่นอินเวอร์ตติ้งก็ยังคงควบคุมจากอุปกรณ์ภายนอกเช่นเดิม โดยเราจะวิเคราะห์ห้่วงจรเพื่อหาค่าขยายสำหรับวงจรชนิดนี้

จากรูปที่ 2.32 แรงดันอินพุตจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วบวก และมีแรงดัน V_A ซึ่งเกิดจากการแบ่งแรงดันของเอาต์พุตคร่อมตัวต้านทาน R_1 จากคุณสมบัติของอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ว่า สั้คคาที่ขั้วอินพุตลบจะถูกบังคับให้มีขนาดเข้าใกล้สั้คคาที่ขั้วอินพุตบวกเสมอ



$$A_v = -\frac{R_f}{R_1} + 1 \quad V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_{in}$$

รูปที่ 2.32 วงจรอินเวอร์ตติ้งที่แรงดันอินพุตจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วบวกจะได้ว่า

$$V_{in} = V_A$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนค่าขยายแรงดัน V_A ได้เท่ากับ

$$A_V = V_{out} / V_A$$

และเนื่องจาก V_A เกิดการแบ่งแรงดันของ V_{out} จะได้

$$V_A = R_{in} / R_f + R_{in} V_{out}$$

เมื่อจัดสมการใหม่จะได้

$$V_{out} / V_A = R_f + R_{in} / R_{in}$$

$$\text{หรือ } A_V = V_{out} / V_A = R_f / R_{in} + 1$$

$$\text{นั่นคือ } V_{out} = (R_f / R_{in} + 1) V_{in}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางอยู่ใกล้ขดลวดทั้งสอง) และความถี่ที่เปลี่ยนไปจะถูกป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณเสียงทำให้เกิดเสียงเตือนให้ผู้ตรวจทราบ

วงจรสมบรูณ์จะแสดงให้เห็นถึงวงจรต่างๆ ของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ และรวมไปถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องรวมกับวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 จะแสดงแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ

3.2 การพันขดลวดค้นหา

3.2.1 การออกแบบ

ออกแบบโดยเลือกขนาดของเบอร์ลวดให้มีขนาดใหญ่พอสมควร เพื่อลดการสูญเสียของกระแสเนื่องจากค่าความต้านทานภายในของขดลวด เพราะจำนวนรอบต้องมากพอที่จะส่งออกไปเหนี่ยวนำกับขดลวดภายนอก แต่จะต้องไม่มากเกินไป โดยที่ขดลวดค้นหาจะถูกพันเป็นขดวงกลมบนแกนอากาศ ทั้งขดลวดภาคส่งและภาครับ เมื่อได้ขดลวดค้นหาแล้วก็นำไปวัดหาค่าความเหนี่ยวนำ (ค่า L) เพื่อที่จะนำค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ไปคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุ (C) ที่จะนำมาต่อรวมกับขดลวดภาคส่ง ซึ่งค่าตัวเก็บประจุนี้จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์กับค่าความเหนี่ยวนำ

ด้านขดลวดภาครับก็ต้องคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุมาร่วมด้วย เพื่อกรองเอาเฉพาะความถี่ที่รับมาจากขดลวดภาคส่ง

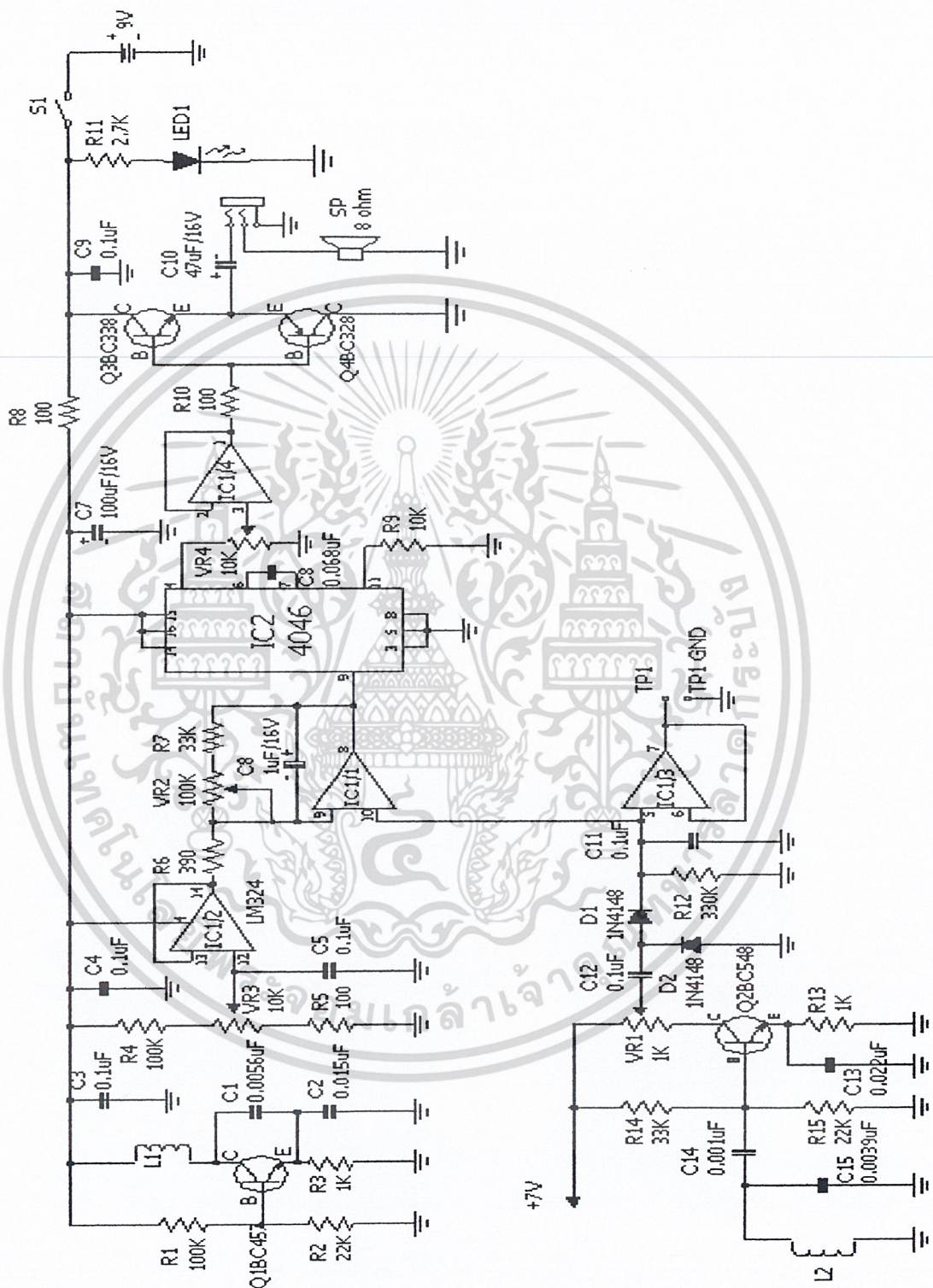
3.2.2 การพันขดลวดค้นหา

ส่วนด้านการพันขดลวดค้นหา (Search Coil) มีข้อมูลในการทำดังนี้
ขดลวดภาคส่ง (Field Coil)

ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 26 โดยพันเป็นวงกลม 30 รอบตามเข็มนาฬิกา บนแกนอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

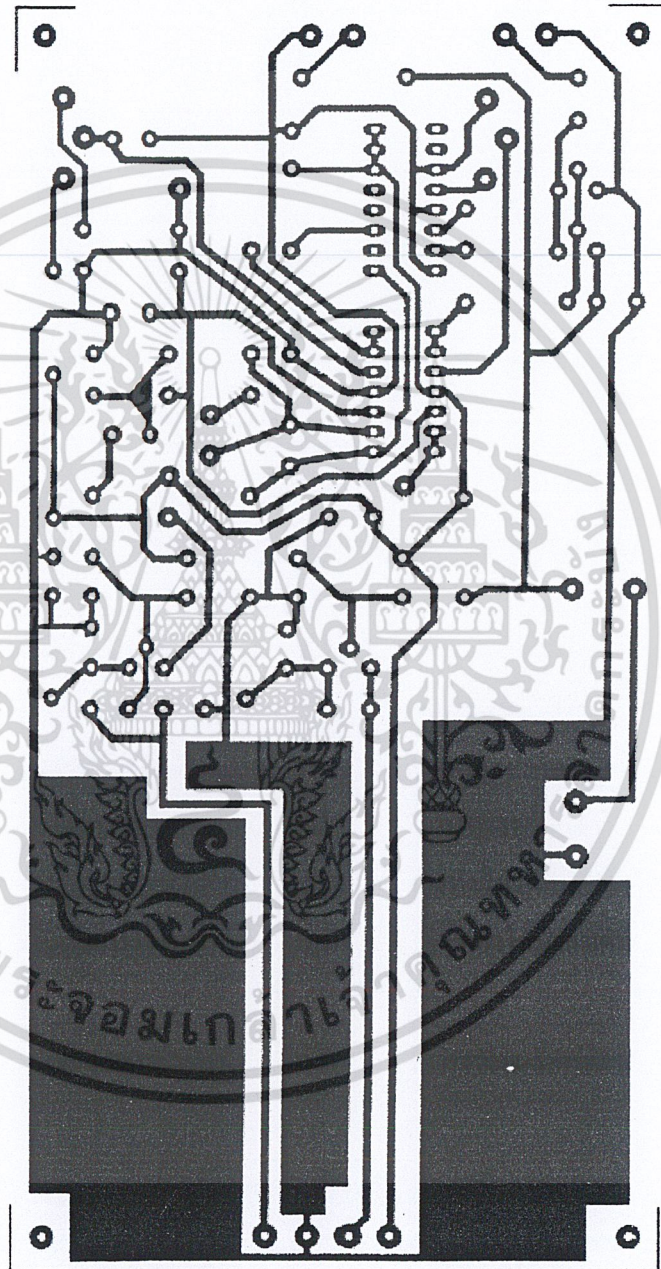
ขดลวดภาครับ (Detector Coil)

ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 26 โดยพันเป็นวงกลม 90 รอบตามเข็มนาฬิกา บนแกนอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 นิ้ว



รูปที่ 3.2 วงจรเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบการใช้งาน

1. ปรับ SEARCHCOIL ให้ขนานกับพื้นและห่างจากพื้นดินประมาณ 2-3 เซนติเมตร
2. ปรับก้านให้ได้ระยะพอดีกับความต้องการ โดยคลายตัวล็อกด้วยการหมุน และเลื่อนก้านตรวจจับตามระยะที่ต้องการ
3. เปิดเครื่องตรวจจับวัตถุระเบิดชนิดโลหะโดยการกด SWITCH พร้อมทั้งปรับ VOLUME ตั้งระดับเสียงตามความต้องการ
4. ปรับปุ่ม SENSITIVITY ตามต้องการว่าต้องการความไวขนาดเท่าไรในการตรวจจับ โดยหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเป็นการเพิ่มความไวในการตรวจจับ ถ้าหมุนกลับทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นการลดความไวในการตรวจจับ
5. เมื่อเครื่องพร้อมที่จะทำงาน ในการตรวจจับควรเคลื่อนตำแหน่งของ SEARCHCOIL สลับซ้ายขวาไปในทิศทางข้างหน้า
6. เมื่อเครื่องตรวจจับวัตถุระเบิดชนิดโลหะตรวจพบโลหะจะทำการส่งเสียงให้ผู้ใช้งานทราบโดยผ่านทางลำโพงหรือผ่านทางหูฟังแล้วแต่ผู้ใช้จะเลือกใช้ตามความต้องการ
7. การดูแลรักษาเครื่องทำได้โดยพยายามอย่าใช้เครื่องกระทบกระเทือนอย่างแรง ไม่ควรเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ อย่าใช้น้ำยาเคมีเช็ด ควรใช้ผ้าแห้งปกติเช็ดทำความสะอาด

4.2 การทดสอบเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ

การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับ โดยวัดเป็นความลึกของวัตถุที่ตำแหน่งความไวสูง จะตรวจจับได้ลึกกว่าตำแหน่งความไวต่ำ และความสามารถในการตรวจจับยังขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของวัตถุโลหะอีกด้วย ในการทดสอบนี้ได้ใช้วัตถุโลหะขนาดเล็กมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร สามารถตรวจได้ลึกประมาณ 10 เซนติเมตรที่ความไวสูง และวัตถุโลหะขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร สามารถตรวจได้ลึกประมาณ 14 เซนติเมตรที่ความไวสูง

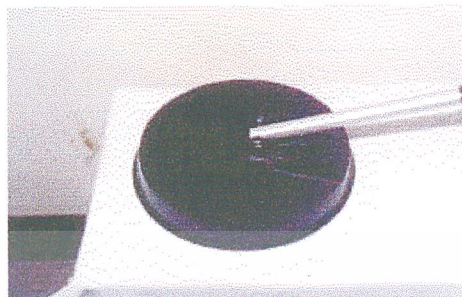
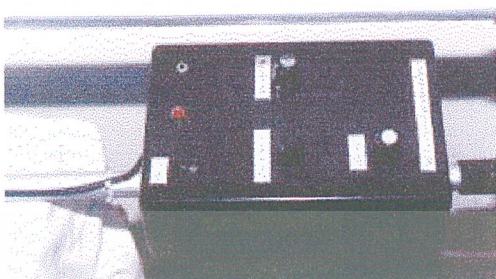
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ตารางบันทึกผลการทดสอบ

ระยะห่างที่ทำการตรวจจับ (เซนติเมตร)	ความสามารถในการตรวจจับ	
	วัตถุขนาดเล็ก	วัตถุขนาดใหญ่
2	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
3	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
4	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
5	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
6	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
7	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
8	ตรวจจับได้	ตรวจจับได้
9	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง	ตรวจจับได้
10	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง	ตรวจจับได้
11	ตรวจจับไม่ได้	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง
12	ตรวจจับไม่ได้	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง
13	ตรวจจับไม่ได้	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง
14	ตรวจจับไม่ได้	ตรวจจับได้เฉพาะอย่าง
15	ตรวจจับไม่ได้	ตรวจจับไม่ได้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปถ่ายเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะมีอยู่ด้วยกันหลายตัวแปร สรุปได้ดังนี้คือ

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวด จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถ้าสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดมีความเข้มมาก ก็จะทำให้ความไวในการค้นหาโลหะดีขึ้น ส่วนขนาดของเส้นลวดทองแดงที่ใช้พันขดลวดจะมีขนาดที่ใหญ่ เพื่อลดการสูญเสียของกระแส เนื่องจากความต้านทานภายในของขดลวด และต้องพันขดลวดให้มีจำนวนมากพอที่จะสร้างสนามแม่เหล็กให้มีความเข้ม ที่จะไปเหนี่ยวนำกับโลหะภายนอก และการพันขดลวดให้มีรัศมีกว้าง เพื่อที่จะทำให้การค้นหาโลหะสามารถทำได้ในบริเวณที่กว้างตามไปด้วย การเลือกขนาดของขดลวดควรเลือกให้เหมาะสม ถ้าเลือกใช้ขดลวดใหญ่เกินไป ก็จะทำให้มีน้ำหนักมากและสิ้นเปลืองพลังงาน

ขนาดของโลหะที่ค้นหา มีผลต่อระยะห่างที่สามารถค้นหาได้นั้นคือ ถ้าวัตถุค้นหานั้นมีขนาดใหญ่ระยะการค้นหาที่จะสูง แต่ถ้าวัตถุมีขนาดเล็กระยะที่สามารถค้นหาได้ก็จะต่ำตามไปด้วย ความถี่ที่ใช้ก็มีผลต่อระยะในการค้นหาโลหะ คือถ้าความถี่ที่ใช้เป็นความถี่ที่สูงก็จะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น ทำให้สามารถค้นหาโลหะได้ในระยะที่สูงขึ้นด้วยแต่ถ้าความถี่ที่ใช้สูงเกินไป จะมีข้อเสียคือ ถ้าในบริเวณที่ใช้ค้นหาโลหะเป็นดินที่มีแร่ธาตุผสมอยู่มาก จะทำให้เครื่องให้สัญญาณที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นควรเลือกใช้ความถี่ที่พอดีๆ

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาทดลอง โครงการเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ โดยใช้สนามแม่เหล็ก มีมากมายหลายส่วน กล่าวคือทำให้เข้าใจถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบโครงการ โดยเริ่มจากการออกแบบวิธีการสร้าง และการพันขดลวดให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ ทฤษฎีของวงจรกำเนิดความถี่ วงจรแปลงแรงดันดีซี วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ ทฤษฎีด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเหนี่ยวนำ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรขยายแรงดันผลต่างและวงจรแสดงผลแบบเสียง ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่กล่าวมา เป็นส่วนที่เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังช่วยให้มีประสบการณ์ในด้านการวางแผนการดำเนินงานในส่วนต่างๆ รู้จักการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง การเลือกใช้อุปกรณ์ การเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม และด้านการทำงานเป็นกลุ่ม ส่งเสริมความรู้การนำเสนอผลงาน การค้นคว้าหาข้อมูลการจัดทำรายงาน ผลงาน และความรับผิดชอบต่อการทำงาน เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้มีหลายส่วน แต่ส่วนที่สำคัญและสามารถนำไปใช้ได้ดี ก็คือเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะที่สร้างขึ้นมา เพื่อก่อให้เกิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ และหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ที่ต้องการนำไปใช้งานในด้านการรักษาความปลอดภัยในสถานที่ต่างๆ นอกจากนี้ลักษณะรูปร่างของเครื่องยังมีขนาดที่เหมาะสม น้ำหนักเบา ประหยัดพลังงาน และใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพง แต่มีประสิทธิภาพในการตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะได้ในระยะที่เหมาะสมเป็นอย่างดี

ปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะ

5.1 วงจรที่ออกแบบเป็นการค้นหาโลหะ ซึ่งจะแยกเป็นชนิดโลหะที่ใช้ทำวัตถุที่ตรวจพบได้เท่านั้น ไม่สามารถระบุได้ว่าวัตถุนั้นเป็นอะไร หากต้องการแยกแยะให้รู้ว่าวัตถุที่ตรวจพบนั้นเป็นอะไรก็ต้องนำไปพัฒนาเพิ่มเติม โดยต้องคำนึงถึงความถี่ต่างๆ ที่มีผลกับโลหะแต่ละประเภทจะไม่เท่ากัน

5.2 การจัดทำชุดขดลวดค้นหาต้องระมัดระวังและคำนึงถึงการส่งผ่านสัญญาณ(Coupling) ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดรับ - ส่ง, อัตราส่วนระหว่างขดลวดรับ - ส่ง, ความถี่ที่เหมาะสมของชุดขดลวดค้นหา, รูปแบบของชุดขดลวดค้นหา เพื่อให้วงจรสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงหรือรบกวนสนามแม่เหล็กได้มากที่สุด ทำให้ยากต่อการเข้าใจและจัดทำชุดขดลวดค้นหา

5.3 ค่าความไวของวงจร ยังไม่สามารถตรวจหาหรือแยกแยะโลหะที่มีขนาดเล็กออกจากโลหะที่มีขนาดใหญ่ หรือที่อยู่ในระดับที่ลึกมากๆ ได้

5.4 วงจรที่ได้ออกแบบยังไม่ได้ทดลองในสถานะที่มีการรบกวนของความถี่ต่างๆ กับตัวเครื่องตรวจหาวัตถุระเบิดชนิดโลหะ จึงไม่ได้สรุปผลว่าจะมีผลกระทบอย่างไรบ้างควรระมัดระวังในจุดนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. WILLIAM H.J., "Engineering Electromagnetics," McGraw-Hill, New York, 1989.
2. RAMO, S., J.R. Whinery, and R. Vanduzer, "Fields and Waves in Communication, " John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
3. เฉลิมพล น้ำค้าง, "ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก" บริษัท พิมพ์ดี, 2538
4. วิโรจน์ อัครรังสี, ชัชวาท เต็มฤทธิ์วงศ์ และ กรชฎี ใสศติศย์, "การใช้งานออปแอมป์ และลิเนียร์ไอซี", ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, หน้า 101-128, 2536
5. สุรพล เกษฐาน, "การออกแบบ มัลติเพลเยอร์ ชนิดพื้นบนแกนอากาศ", เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 180, หน้า 197-200, 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4046BC Micropower Phase-Locked Loop

General Description

The CD4046BC micropower phase-locked loop (PLL) consists of a low power, linear, voltage-controlled oscillator (VCO), a source follower, a zener diode, and two phase comparators. The two phase comparators have a common signal input and a common comparator input. The signal input can be directly coupled for a large voltage signal, or capacitively coupled to the self-biasing amplifier at the signal input for a small voltage signal.

Phase comparator I, an exclusive OR gate, provides a digital error signal (phase comp. I Out) and maintains 90° phase shifts at the VCO center frequency. Between signal input and comparator input (both at 50% duty cycle), it may lock onto the signal input frequencies that are close to harmonics of the VCO center frequency.

Phase comparator II is an edge-controlled digital memory network. It provides a digital error signal (phase comp. II Out) and lock-in signal (phase pulses) to indicate a locked condition and maintains a 0° phase shift between signal input and comparator input.

The linear voltage-controlled oscillator (VCO) produces an output signal (VCO Out) whose frequency is determined by the voltage at the VCO_{IN} input, and the capacitor and resistors connected to pin C1_A, C1_B, R1 and R2.

The source follower output of the VCO_{IN} (demodulator Out) is used with an external resistor of 10 kΩ or more.

The INHIBIT input, when high, disables the VCO and source follower to minimize standby power consumption. The zener diode is provided for power supply regulation, if necessary.

Features

- Wide supply voltage range: 3.0V to 18V
- Low dynamic power consumption: 70 μW (typ.) at f_o = 10 kHz, V_{DD} = 5V
- VCO frequency: 1.3 MHz (typ.) at V_{DD} = 10V
- Low frequency drift: 0.06%/°C at V_{DD} = 10V with temperature
- High VCO linearity: 1% (typ.)

Applications

- FM demodulator and modulator
- Frequency synthesis and multiplication
- Frequency discrimination
- Data synchronization and conditioning
- Voltage-to-frequency conversion
- Tone decoding
- FSK modulation
- Motor speed control

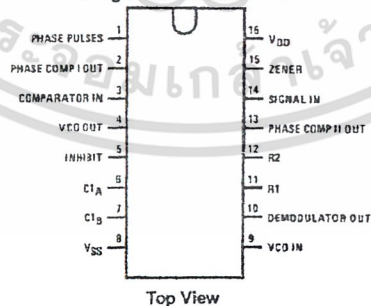
Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
CD4046BCM	M16A	16-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150" Narrow Body
CD4046BCN	N16E	16-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Connection Diagram

Pin Assignments for SOIC and DIP



Block Diagram

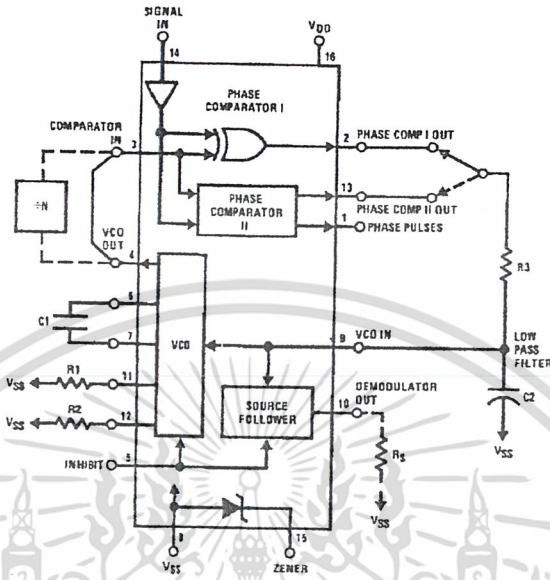


FIGURE 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings(Note 1)

(Note 2)

DC Supply Voltage (V_{DD})	-0.5 to +18 V_{DC}
Input Voltage (V_{IN})	-0.5 to V_{DD} +0.5 V_{DC}
Storage Temperature Range (T_S)	-65°C to +150°C
Power Dissipation (P_D)	
Dual-In-Line	700 mW
Small Outline	500 mW
Lead Temperature (T_L)	
(Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

DC Supply Voltage (V_{DD})	3 to 15 V_{DC}
Input Voltage (V_{IN})	0 to V_{DD} V_{DC}
Operating Temperature Range (T_A)	-40°C to +85°C

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. They are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Recommended Operating Conditions" and "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: $V_{SS} = 0V$ unless otherwise specified.

DC Electrical Characteristics (Note 2)

Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		+25°C		+85°C		Units		
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min		Max	
I_{DD}	Quiescent Device Current	Pin 5 = V_{DD} , Pin 14 = V_{DD} , Pin 3, 9 = V_{SS} $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$									
					20	0.005	20		150	μA	
					40	0.01	40		300	μA	
				80	0.015	80		600	μA		
			Pin 5 = V_{DD} , Pin 14 = Open, Pin 3, 9 = V_{SS} $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$								
					70	5	55		205	μA	
		530		20	410		710	μA			
				1500	50	1200		1800	μA		
V_{OL}	LOW Level Output Voltage	$V_{DD} = 5V$	0.05		0	0.05		0.05	V		
		$V_{DD} = 10V$	0.05		0	0.05		0.05	V		
		$V_{DD} = 15V$	0.05		0	0.05		0.05	V		
V_{OH}	HIGH Level Output Voltage	$V_{DD} = 5V$	4.95		4.95	5		4.95	V		
		$V_{DD} = 10V$	9.95		9.95	10		9.95	V		
		$V_{DD} = 15V$	14.95		14.95	15		14.95	V		
V_{IL}	LOW Level Input Voltage Comparator and Signal In	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.5V$ or 4.5V		1.5		2.25	1.5		1.5	V	
		$V_{DD} = 10V, V_O = 1V$ or 9V		3.0		4.5	3.0		3.0	V	
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$ or 13.5V		4.0		6.25	4.0		4.0	V	
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage Comparator and Signal In	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.5V$ or 4.5V	3.5		3.5	2.75		3.5	V		
		$V_{DD} = 10V, V_O = 1V$ or 9V	7.0		7.0	5.5		7.0	V		
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$ or 13.5V	11.0		11.0	8.25		11.0	V		
I_{OL}	LOW Level Output Current (Note 4)	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.4V$	0.52		0.44	0.88		0.36	mA		
		$V_{DD} = 10V, V_O = 0.5V$	1.3		1.1	2.25		0.9	mA		
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	3.8		3.0	8.8		2.4	mA		
I_{OH}	HIGH Level Output Current (Note 4)	$V_{DD} = 5V, V_O = 4.6V$	-0.52		-0.44	-0.88		-0.36	mA		
		$V_{DD} = 10V, V_O = 9.5V$	-1.3		-1.1	-2.25		-0.9	mA		
		$V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$	-3.6		-3.0	-8.8		-2.4	mA		
I_{IN}	Input Current	All Inputs Except Signal Input									
		$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 0V$ $V_{DD} = 15V, V_{IN} = 15V$		-0.3		10^{-5}	-0.3		-1.0	μA	
				0.3		10^{-5}		0.3	μA		
C_{IN}	Input Capacitance	Any Input (Note 3)					7.5		pF		
P_T	Total Power Dissipation	$f_b = 10$ kHz, $R_1 = 1$ M Ω , $R_2 = \infty$, $C_{XO_N} = C_{MW}/2$ $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$									
						0.07				mW	
						0.6					mW
						2.4					mW

Note 3: Capacitance is guaranteed by periodic testing.

Note 4: I_{OH} and I_{OL} are tested one output at a time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4046BC

AC Electrical Characteristics (Note 5)

 $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_L = 50\text{ pF}$

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
VCO SECTION						
I_{DD}	Operating Current	$f_o = 10\text{ kHz}$, $R1 = 1\text{ M}\Omega$, $R2 = \infty$, $\zeta X_{OIN} = \zeta_{\Delta\Delta}/2$ $V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		20 90 200		μA μA μA
f_{MAX}	Maximum Operating Frequency	$C1 = 50\text{ pF}$, $R1 = 10\text{ k}\Omega$, $R2 = \infty$, $\zeta X_{OIN} = \zeta_{\Delta\Delta}$ $V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$	0.4 0.6 1.0	0.8 1.2 1.6		MHz MHz MHz
	Linearity	$V_{COIN} = 2.5\text{V} \pm 0.3\text{V}$, $R1 \geq 10\text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{COIN} = 5\text{V} \pm 2.5\text{V}$, $R1 \geq 400\text{ k}\Omega$, $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{COIN} = 7.5\text{V} \pm 5\text{V}$, $R1 \geq 1\text{ M}\Omega$, $V_{DD} = 15\text{V}$		1 1 1		% % %
	Temperature-Frequency Stability No Frequency Offset, $f_{MIN} = 0$	$\%/\text{C} \leq 1/\phi$, $\zeta_{\Delta\Delta}$ $R2 = \infty$ $V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		0.12–0.24 0.04–0.08 0.015–0.03		$\%/\text{C}$ $\%/\text{C}$ $\%/\text{C}$
	Frequency Offset, $f_{MIN} \neq 0$	$V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		0.08–0.12 0.05–0.1 0.03–0.06		$\%/\text{C}$ $\%/\text{C}$ $\%/\text{C}$
V_{COIN}	Input Resistance	$V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		10^8 10^8 10^8		M Ω M Ω M Ω
VCO	Output Duty Cycle	$V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		50 50 50		% % %
t_{THL}	VCO Output Transition Time	$V_{DD} = 5\text{V}$		90	200	ns
t_{THL}		$V_{DD} = 10\text{V}$		50	100	ns
t_{THL}		$V_{DD} = 15\text{V}$		45	80	ns
PHASE COMPARATORS SECTION						
R_{IN}	Input Resistance	$V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$	1 0.2 0.1	3 0.7 0.3		M Ω M Ω M Ω
	Comparator Input	$V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		10^8 10^8 10^8		M Ω M Ω M Ω
	AC-Coupled Signal Input Voltage Sensitivity	$C_{SERIES} = 1000\text{ pF}$ $f = 50\text{ kHz}$ $V_{DD} = 5\text{V}$ $V_{DD} = 10\text{V}$ $V_{DD} = 15\text{V}$		200 400 700	400 800 1400	mV mV mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Electrical Characteristics (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
DEMODULATOR OUTPUT						
VCO _{IN} - V _{DEM}	Offset Voltage	RS ≥ 10 kΩ, V _{DD} = 5V		1.50	2.2	V
		RS ≥ 10 kΩ, V _{DD} = 10V		1.50	2.2	V
		RS ≥ 50 kΩ, V _{DD} = 15V		1.50	2.2	V
	Linearity	RS ≥ 50 kΩ				
		VCO _{IN} = 2.5V ±0.3V, V _{DD} = 5V		0.1		%
		VCO _{IN} = 5V ±2.5V, V _{DD} = 10V		0.6		%
		VCO _{IN} = 7.5V ±5V, V _{DD} = 15V		0.8		%
ZENER DIODE						
V _Z	Zener Diode Voltage	I _Z = 50 μA	6.3	7.0	7.7	V
R _Z	Zener Dynamic Resistance	I _Z = 1 mA		100		Ω

Note 5: AC Parameters are guaranteed by DC correlated testing.

Phase Comparator State Diagrams

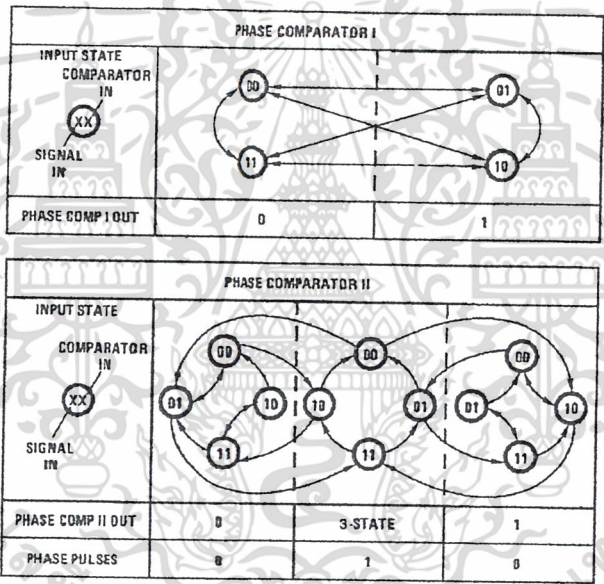


FIGURE 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Waveforms

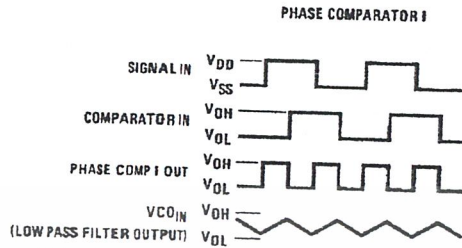


FIGURE 3. Typical Waveform Employing Phase Comparator I in Locked Condition

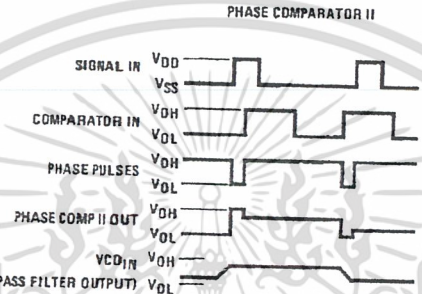


FIGURE 4. Typical Waveform Employing Phase Comparator II in Locked Condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

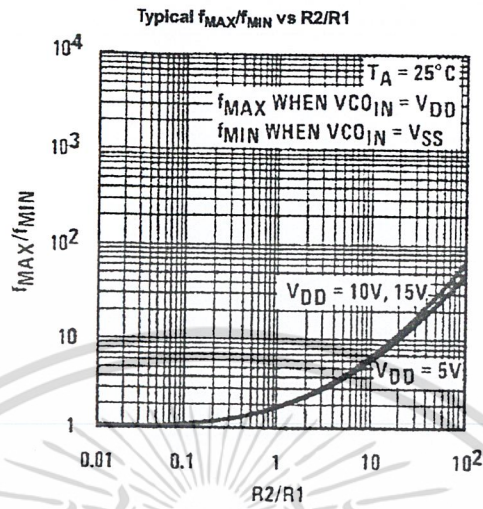


FIGURE 7.

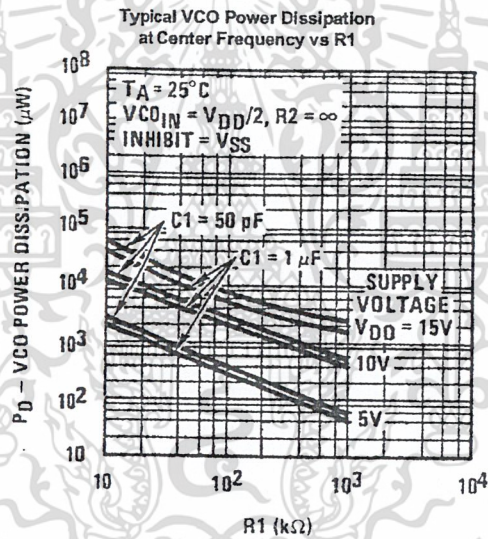


FIGURE 8.

Note: To obtain approximate total power dissipation of PLL system for no-signal input: Phase Comparator I, $P_D(\text{Total}) = P_D(f_c) + P_D(f_{\text{MIN}}) + P_D(R_S)$; Phase Comparator II, $P_D(\text{Total}) = P_D(f_{\text{MIN}})$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

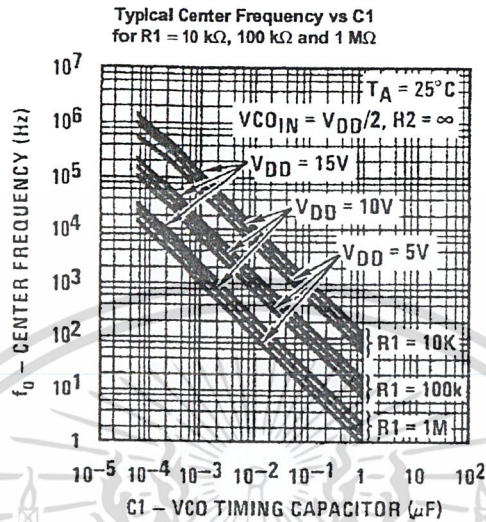


FIGURE 5.

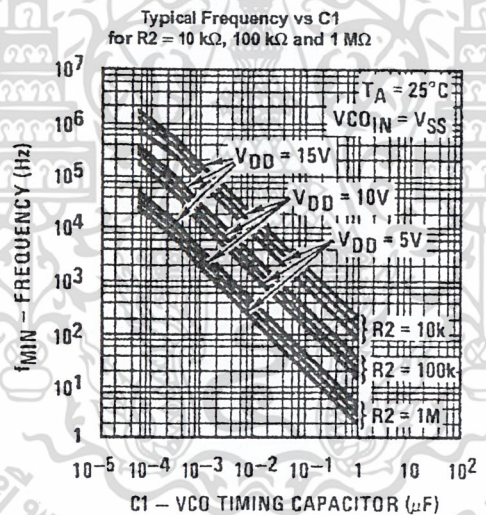


FIGURE 6.

Note: To obtain approximate total power dissipation of PLL system for no-signal input: Phase Comparator I, P_D (Total) = P_D (f₀) + P_D (f_{MIN}) + P_D (R₂); Phase Comparator II, P_D (Total) = P_D (f_{MIN}).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

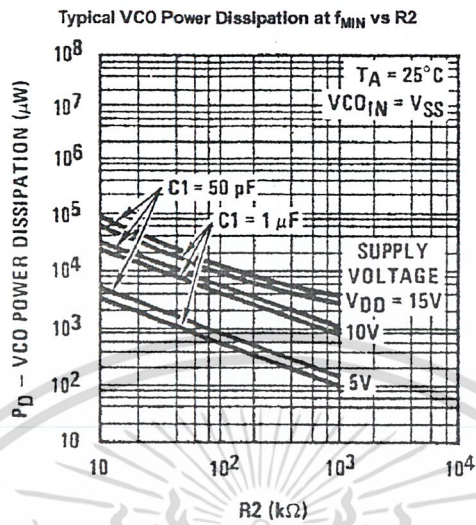


FIGURE 9.

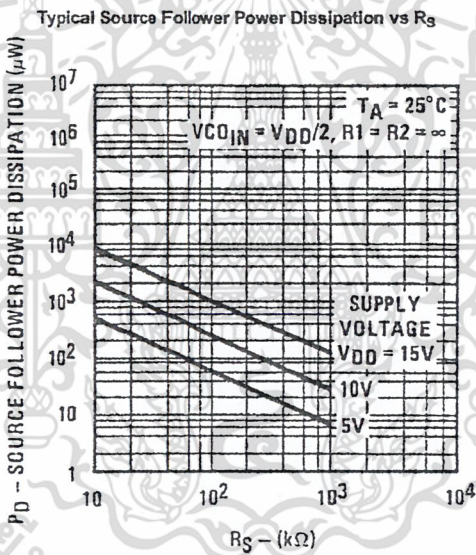


FIGURE 10.

Note: To obtain approximate total power dissipation of PLL system for no-signal input: Phase Comparator I, $P_D(Total) = P_D(f_c) + P_D(f_{MIN}) + P_D(R_S)$; Phase Comparator II, $P_D(Total) = P_D(f_{MIN})$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

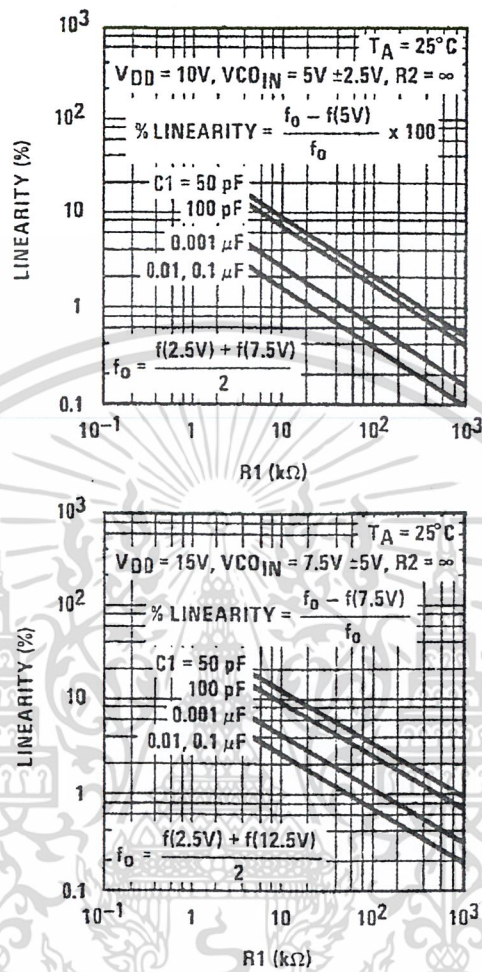


FIGURE 11. Typical VCO Linearity vs R1 and C1

Note: To obtain approximate total power dissipation of PLL system for no-signal input Phase Comparator I, $P_D(\text{Total}) = P_D(f_a) + P_D(f_{\text{MIN}}) + P_D(R_S)$; Phase Comparator II, $P_D(\text{Total}) = P_D(f_{\text{MIN}})$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Information

This information is a guide for approximating the value of external components for the CD4046B in a phase-locked-loop system. The selected external components must be within the following ranges: R1, R2 ≥ 10 kΩ, R_S ≥ 10 kΩ, C1 ≥ 50 pF.

In addition to the given design information, refer to Figure 5, Figure 6, Figure 7 for R1, R2 and C1 component selections.

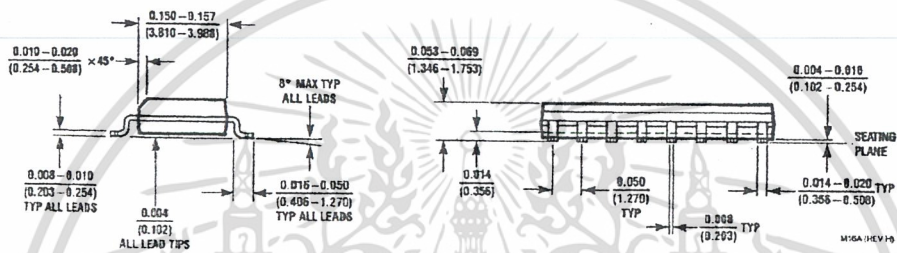
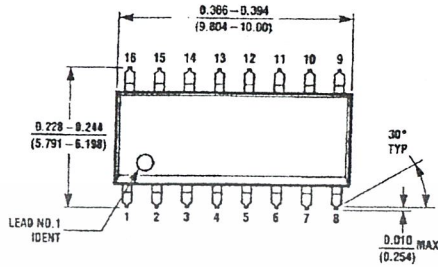
Characteristics	Using Phase Comparator I		Using Phase Comparator II	
	VCO Without Offset R2 = ∞	VCO With Offset	VCO Without Offset R2 = ∞	VCO With Offset
VCO Frequency				
For No Signal Input	VCO in PLL system will adjust to center frequency, f ₀		VCO in PLL system will adjust to lowest operating frequency, f _{min}	
Frequency Lock Range, 2f _L	2f _L = full VCO frequency range			
Frequency Capture Range, 2f _C	2f _C = f _{max} - f _{min}			
Loop Filter Component Selection		$2f_C \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{R1}}$	$f_C = f_L$	
Phase Angle Between Single and Comparator	90° at center frequency (f ₀), approximating 0° and 180° at ends of lock range (2f _L)		Always 0° in lock	
Locks on Harmonics of Center Frequency	Yes		No	
Signal Input Noise Rejection	High		Low	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

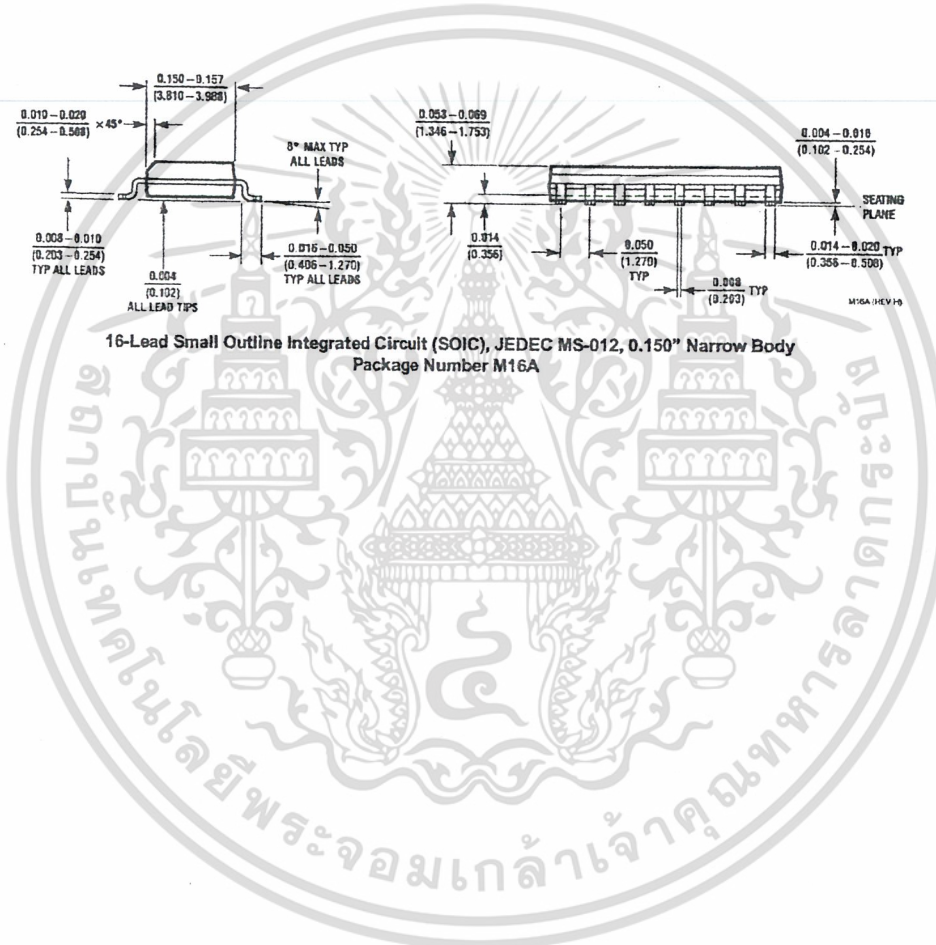
Characteristics	Using Phase Comparator I		Using Phase Comparator II	
	VCO Without Offset R2 = ∞	VCO With Offset	VCO Without Offset R2 = ∞	VCO With Offset
VCO Component Selection	<p>Given: f_o. Use f_o with Figure 5 to determine R1 and C1.</p>	<p>Given: f_o and f_L. Calculate f_{min} from the equation $f_{min} = f_o - f_L$.</p> <p>Use f_{min} with Figure 6 to determine R2 and C1.</p> <p>Calculate $\frac{f_{max}}{f_{min}}$ from the equation $\frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{f_o + f_L}{f_o - f_L}$.</p> <p>Use $\frac{f_{max}}{f_{min}}$ with Figure 7 to determine ratio R2/R1 to obtain R1.</p>	<p>Given: f_{max}. Calculate f_o from the equation $f_o = \frac{f_{max}}{2}$.</p> <p>Use f_o with Figure 5 to determine R1 and C1.</p>	<p>Given: f_{min} and f_{max}. Use f_{min} with Figure 6 to determine R2 and C1.</p> <p>Calculate $\frac{f_{max}}{f_{min}}$.</p> <p>Use $\frac{f_{max}}{f_{min}}$ with Figure 7 to determine ratio R2/R1 to obtain R1.</p>
<p>References</p> <p>G.S. Moschytz, "Miniaturized RC Filters Using Phase-Locked Loop", BSTJ, May, 1965. Floyd Gardner, "Phaselock Techniques", John Wiley & Sons, 1966.</p>				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted

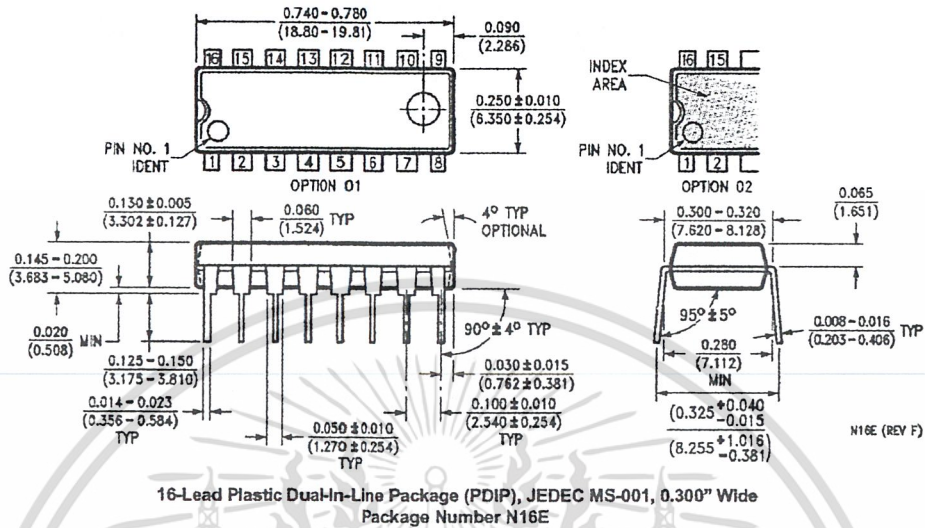


16-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150" Narrow Body
Package Number M16A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

www.fairchildsemi.com

Fairchild does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and Fairchild reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM124/LM224/LM324/LM2902 Low Power Quad Operational Amplifiers

General Description

The LM124 series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage
- The unity gain cross frequency is temperature compensated
- The input bias current is also temperature compensated

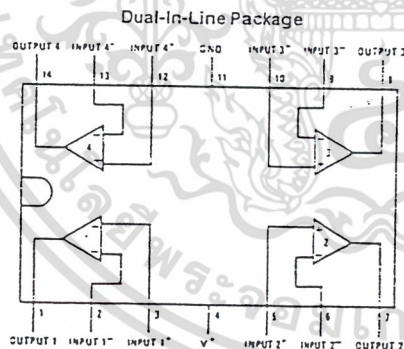
Advantages

- Eliminates need for dual supplies
- Four internally compensated op amps in a single package
- Allows directly sensing near GND and V_{OUT} also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz
(temperature compensated)
- Wide power supply range:
Single supply 3V to 32V
or dual supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very low supply current drain (700 μA)—essentially independent of supply voltage
- Low input biasing current 45 nA
(temperature compensated)
- Low input offset voltage 2 mV
and offset current 5 nA
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to $V^- - 1.5V$

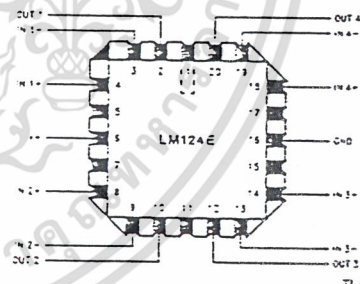
Connection Diagram



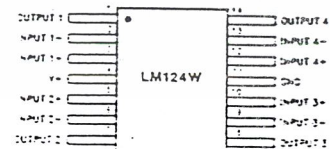
Top View

Order Number LM124J, LM124AJ, LM124J/883**,
LM124AJ/883*, LM224J, LM224AJ, LM324J, LM324M,
LM324AM, LM2902M, LM324N, LM324AN or LM2902N
See NS Package Number J14A, M14A or N14A

**LM124A available per JMS510/11005
***LM124 available per JMS510/11005

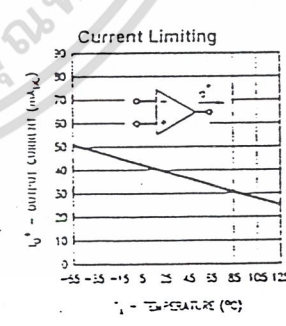
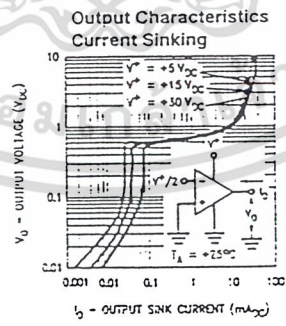
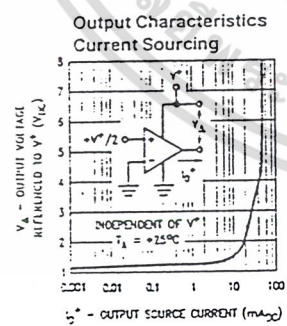
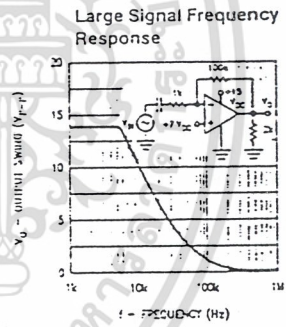
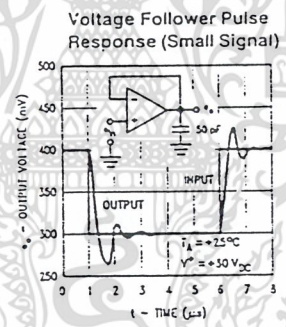
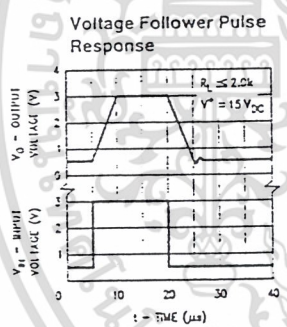
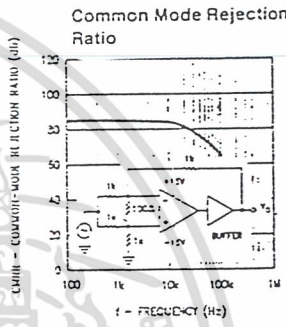
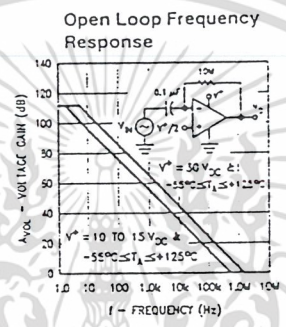
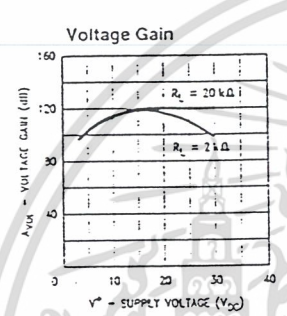
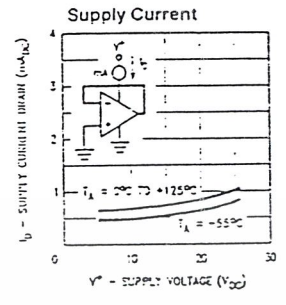
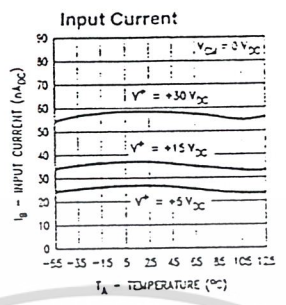
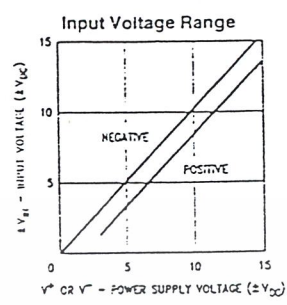


Order Number LM124AE/883 or LM124E/883
See NS Package Number E20A



Order Number LM124AW/883 or LM124W/883
See NS Package Number W14B

Typical Performance Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications. (Note 9)

Parameter	LM124/LM224/LM324	LM2902	LM124/LM224/LM324	LM324A	LM124/LM224/LM324	LM324A	LM124/LM224/LM324	LM324A	LM124/LM224/LM324	LM324A	LM124/LM224/LM324	LM324A
Supply Voltage, V^+ ($V_{EE} < 0.3V$) (Note 3)	32V	26V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V
Differential Input Voltage	32V	26V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V	32V
Input Voltage	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.26V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V	0.3V to 1.32V
Input Current	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA	50 mA
Power Dissipation (Note 1)	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW	1130 mW
Molded DIP	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW	1260 mW
Cavity DIP	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW	800 mW
Small Outline Package (On Amplifier) (Note 2)	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Output Short Circuit to GND ($I_{OL} < 0.3V$) (Note 3)	0°C to 170°C	0°C to 165°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C	0°C to 170°C
Operating Temperature Range	-25°C to 105°C	-40°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C	-25°C to 105°C
LM324/LM324A	55°C to 125°C		55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C	55°C to 125°C
LM224/LM224A												
LM124/LM124A												

Electrical Characteristics $V^+ = 1.50V$ (Note 4), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A		LM224A		LM324A		LM124/LM224		LM324A		LM124/LM224		LM324A		Units						
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max			
Input Offset Voltage (Note 5) $T_A = 25^\circ C$		1	2	1	3	1	3	1	3	2	3	2	3	2	3	2	7	7	7	mV		
Input Bias Current (Note 6)	$I_{BQ(1)}$ or $I_{BQ(2)}$, $V_{CM} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$	20	50	40	80	45	100	45	100	45	100	45	100	45	100	45	250	250	250	nA		
Input Offset Current	$I_{BQ(1)} - I_{BQ(2)}$, $V_{CM} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$	2	10	2	15	5	30	5	30	5	30	5	30	5	30	5	50	50	50	nA		
Input Common Mode Voltage Range (Note 7)	$V^+ = 30V$, (LM2902, $V^+ = 26V$), $T_A = 25^\circ C$	0	V^+	1.5	0	V^+	1.5	0	V^+	1.5	0	V^+	1.5	0	V^+	1.5	0	V^+	1.5	0	V	
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ On All Op Amps $V^+ = 30V$ (LM2902 $V^+ = 26V$) $V^+ = 5V$	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	1.5	3	mA
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = 15V$, $R_L = 2 k\Omega$, $V_O = 1V$ to $11V$, $T_A = 25^\circ C$	60	100	50	100	25	100	25	100	50	100	25	100	50	100	25	100	25	100	25	100	V/mV
Common Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0V$ to $V^+ = 1.5V$, $T_A = 25^\circ C$	70	85	70	85	65	85	65	85	70	85	65	85	70	85	65	85	65	85	65	85	dB
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5V$ to $30V$ (LM2902, $V^+ = 5V$ to $26V$), $T_A = 25^\circ C$	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	65	100	dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameter	Conditions	LM124			LM224			LM324			LM2902			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Amplifier to-Amplifier Coupling (Note 6)	$f = 1 \text{ kHz to } 20 \text{ kHz, } T_A = 25^\circ\text{C}$ (Input float)	...	120	...	...	120	...	...	...	...	120	...	...	dB
Output Current	Source $V_{IN} = 1\text{V, } V_{IN} = 0\text{V, } V_I = 15\text{V, } V_O = 2\text{V, } T_A = 25^\circ\text{C}$	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	mA
	Sink $V_{IN} = 1\text{V, } V_{IN} = 0\text{V, } V_I = 15\text{V, } V_O = 2\text{V, } T_A = 25^\circ\text{C}$	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	mA
Short Circuit to Ground	$V_{IN} = 1\text{V, } V_{IN} = 0\text{V, } V_I = 15\text{V, } V_O = 200 \text{ mV, } T_A = 25^\circ\text{C}$	12	50	12	50	12	50	12	50	12	50	12	50	μA
	(Note 2) $V_I = 15\text{V, } T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 5)	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	nA
Input Offset Voltage	(Note 5)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	mV
Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	7	20	7	20	7	20	7	20	7	20	7	20	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	$I_{IN}(1) = I_{IN}(2) = V_{CM} = 0\text{V}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	nA
Input Offset Current Drift	$R_S = 0\Omega$	10	200	10	200	10	300	10	300	10	300	10	300	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$I_{IN}(1) \text{ or } I_{IN}(2)$	40	100	40	100	40	200	40	200	40	300	40	500	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 7)	$V_I = +30\text{V}$ (LM2902, $V_I = 26\text{V}$)	0	$V_I - 2$	0	$V_I - 2$	0	$V_I - 2$	0	$V_I - 2$	0	$V_I - 2$	0	$V_I - 2$	V
Large Signal Voltage Gain	$V_I = +15\text{V}$ (V_O Swing = 1V to 11V)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	V/mV
	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	V
Output Voltage Swing	$V_I = 30\text{V, } V_I = 26\text{V}$ (LM2902, $V_I = 26\text{V}$)	27	20	27	20	27	20	27	20	27	20	27	20	V
	$V_I = 5\text{V, } R_L = 10 \text{ k}\Omega$	5	20	5	20	5	20	5	20	5	20	5	20	mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics $V_1 = 1.5\text{V}$ (Note 4) unless otherwise stated (Continued)

Parameter	Conditions	LM124A		LM224A		LM324A		LM124/LM224		LM324		LM2902		Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Current	Source	$V_O = 2\text{V}$												mA
		$V_{IN}^+ = 1\text{V}, V_{IN}^- = 0\text{V}, V_1 = 15\text{V}$												
	Sink	$V_{IN}^+ = 1\text{V}, V_{IN}^- = 0\text{V}, V_1 = 15\text{V}$												

Note 1: For operating at high temperatures, the LM324/LM224/LM2902 must be derated based on a T_J of 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 65°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224/LM224A and LM124/LM124A can be derated based on a T_J of 150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to dissipate the power which is dissipated in the integrator circuit.

Note 2: Short circuit, from the output to V_1 can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V_1 . At values of supply voltage in excess of 1.5V, continuous short circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Dissipative dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

Note 3: This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. If it is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diodes (overdrive) for the line driver, the input is driven negative. This is not destructive and normal output status will re-establish within the input voltage level (or to ground for a line driver). Those specifications are limited to -55°C to 125°C for the LM124/LM124A. With the LM224/LM224A, all temperature specifications are limited to -40°C to 105°C . For the LM324/LM324A, all temperature specifications are limited to -25°C to 105°C . T_A is T_J for the LM2902.

Note 4: $V_O = 0\text{V}$ with V_1 from 5V to 30V; and over the full input common-mode range (0V to $V_1 - 1.5\text{V}$) for LM2902, V_1 from 5V to 26V.

Note 5: The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

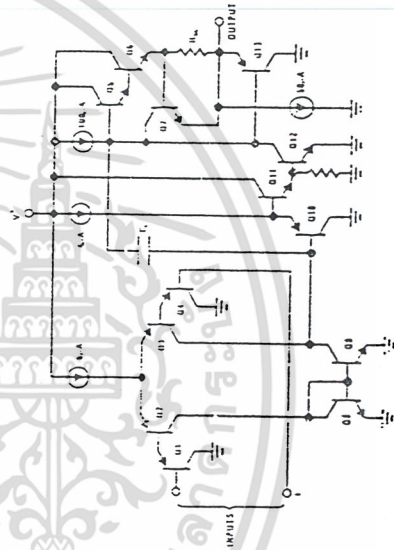
Note 6: The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V (at 25°C). The upper limit of the common-mode voltage range is $V_1 - 1.5\text{V}$ (at 25°C), but either or both inputs can go to 1.2V without damage (1.25V for LM2902), independent of the magnitude of V_1 .

Note 7: Due to proximity of external components, ensure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be deducted as this type of capacitance increases at higher frequencies.

Note 8: Refer to JE-1512/AX for LM124A military specifications and refer to JE125/12/IX for LM123 military specifications.

Note 9: Human body model, i.e. 100 pF in series with 100 μF .

Schematic Diagram (Each Amplifier)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้