

# ปริญญานิพนธ์

เครื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กแบบตัวเลข

DIGITAL FLUX DENSITY METER



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
บัณฑิตวิทยาลัย

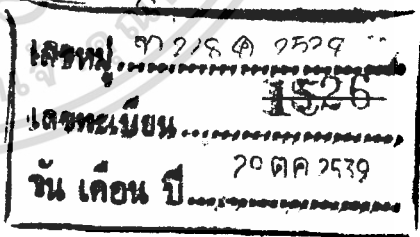
นายวิทศักดิ์ จุ้ยสุขะ

นายปริญญาธิ์ แสงศรี

นายสมศักดิ์ พลรักษา



A021295



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแบบตัวเลข


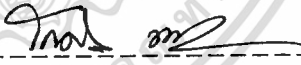
DIGITAL FLUX DENSITY METER

- ชื่อนักศึกษา 1. นายวิทศักดิ์ จุ้ยสุขะ รหัสประจำตัว 37031111  
2. นายปริญญา แสงศรี รหัสประจำตัว 37031114  
3. นายสมศักดิ์ พลรักษา รหัสประจำตัว 37031133

หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

1. อาจารย์วิสุทธิ อธิพรธรรม  
2. อาจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์  
3. อาจารย์กิติพงศ์ มะโน

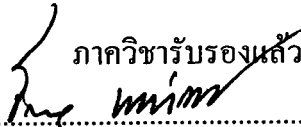
คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
1. อาจารย์วิสุทธิ อธิพรธรรม	
2. อาจารย์โกศล ทรายู	
3. _____	_____
4. _____	_____
5. _____	_____

วันเดือนปีที่สอบ วันที่ 9 พฤษภาคม 2539 เวลา 15.00 ถึง 16.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม



ภาควิชารับรองแล้ว



ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่..... เดือน..... พ.ศ. 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

DIGITAL FLUX DENSITY METER

## ผู้จัดทำ

1. นายทวีศักดิ์ จุ้ยสุขะ
2. นายปริญทร แสงศรี
3. นายสมศักดิ์ พลรักษา

## อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม.....  
(อาจารย์วิสุทธิ์ อธิพรธรรม)

ลงนาม.....  
(อาจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์)

ลงนาม.....  
(อาจารย์กิติพงศ์ มะโน)

## หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

DIGITAL FULX DENSITY METER

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
2. เพื่อวิเคราะห์ และออกแบบวงจรส่วนแสดงผลของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
3. เพื่อสร้างเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
4. เพื่อทดลองใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
5. เพื่อนำเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลขไปใช้งานในห้องทดลอง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการทำงานของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
2. สามารถออกแบบวงจรส่วนแสดงผลของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
3. สามารถสร้างวงจรส่วนแสดงผลของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
4. สามารถนำเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลขไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

นายทวีศักดิ์	จួយุชชะ
นายปริญทร	แสวงศรี
นายสมศักดิ์	พลรักษา

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วิสุทธิ อธิพรธรรม

อาจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

อาจารย์กิติพงศ์ มะโน

ปีการศึกษา 2538

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข โดยใช้แผงแสดงผลแบบผลึกเหลวขนาด 3.5 หลักเป็นตัวแสดงผล การทำงานของวงจรภาคแสดงผลใช้ไอซีตัวเดียว ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและควบคุมการแสดงผลของ LCD เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแบบตัวเลขนี้สามารถวัดได้ตั้งแต่ 20 เกาส์ถึง 20 กิโลเกาส์ และวัดกับสนามแม่เหล็กที่มีความถี่สูงสุดได้ 500 เฮิร์ต โดยมีความผิดพลาดในการวัดประมาณ  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์

## II

# DIGITAL FLUX DENSITY METER

MR.TAWEESAK JUISUKA

MR.PARINTHORN SAWEANGSEE

MR.SOMSAK POLRUKSA

### ADVISORS

MR.WISUIT ATIPORNTUM

MR.PHERAWUTH SUWANJAN

MR.KITIPHONG MANO

1995

### ABSTRACT

This thesis presents the digital flux density meter by use Liquid Crystal Display (LCD) 3.5 digits. The operation of display circuit section use single ship Integrate Circuit (IC) to control that can change the analog signal to digital signal and control display of LCD. This digital flux density meter can be measure from 20 gauss to 20 kilogauss and measure frequency of magnetic field for 500 herzt maximum with error approximate  $\pm 5$  percent.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลงไปได้ โดยอาศัยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากคณาจารย์  
ประจำภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม และความกรุณาอย่างยิ่งจาก อาจารย์วิสุทธิ อธิพรธรรม ซึ่ง  
ได้ช่วยเหลือคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทั้งให้คำแนะนำปรึกษาปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัทโยโกกาวา ประเทศไทยจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล  
การทำโครงการตลอดจนรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ คุณงยุทธ รอดภัย วิศวกรฝ่ายจัดการระบบคอมพิวเตอร์ประจำบริษัท  
อาหารสยาม จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ทำโครงการ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจน  
เครื่องพิมพ์เอกสารแบบเลเซอร์เพื่อใช้ในการจัดทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนปริญญา-  
นิพนธ์สำเร็จลงได้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ผู้บังเกิดเกล้าผู้เป็นแรงกำลังใจอันยิ่งใหญ่  
ทั้งกำลังใจ กำลังทรัพย์ และเป็นผู้ให้ตลอดมา

อนึ่ง ประโยชน์ และคุณความดีใดๆ ที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์นี้ขอมอบให้แก่ คุณพ่อ  
คุณแม่ ผู้ให้กำเนิด ครูบาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชามาตั้งแต่ต้น และผู้ให้ความช่วย  
เหลือ ตลอดจนผู้ที่ให้กำลังใจเสมอมาจนปริญญาานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

## IV

### สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
คำอธิบายสัญลักษณ์	XII
คำอธิบายศัพท์	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	4
2.2.1 สนามไฟฟ้า	4
2.2.2 สนามแม่เหล็ก	7
2.3 สมการของแมกซ์เวลล์	9
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ (HALL EFFECT)	13
2.4.1 ฮอลล์เจนนอร์เตอร์	16
2.4.2 ชนิดของฮอลล์	17
2.5 แผลงแสดงผลแบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display; LCD)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1	ข้อดีของแผงแสดงผลแบบ LCD	20
2.5.2	โครงสร้างของ LCD	21
2.5.3	LCD แบบนีเมติกชนิดเกลียว	22
2.5.4	การแสดงผลแบบต่างๆ ของ LCD	23
2.5.5	คุณสมบัติทางแสง	24
2.5.6	มุมมอง	24
2.5.7	ความเร็วของการแสดงผล	25
2.5.8	การขับ LCD	26
2.5.9	เทคนิคการต่อใช้งาน LCD	27
2.5.10	หลักในการพิจารณาเลือกใช้ LCD	31
2.6	วงจรการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter)	32
2.6.1	วงจรแบบเปรียบเทียบขนานหรือแบบเฟลซ	34
2.6.2	วงจรเอชดีที่ใช้ในการอินทีเกรต (Integrate A/D Circuits)	33
2.6.3	วงจรเปลี่ยนสัญญาณเอชดีที่ใช้กับวงจรมับ และวงจรตีทูประกอบกัน	39
2.6.4	การสุ่มและการคงค่า (Sample and Holds)	42
2.6.5	การป้องกันความผิดพลาดจากสัญญาณแอนะล็อกของอินพุตวงจร A/D	42
2.7	วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)	50
2.8	วงจรกำเนิดกระแสคงที่ (Constant Current Circuit)	56
2.9	วงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator Circuit)	58
2.9.1	วงจรลดทอนแบบแอล (L-Type Attenuator)	58
2.9.2	วงจรลดทอนแบบไพน์ ( $\pi$ -Network Attenuation)	60
<b>บทที่ 3 การออกแบบการสร้างและการทำงาน</b>		61
3.1	กล่าวนำ	61
3.2	หลักการการทำงานของเครื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กแบบตัวเลข	61
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	65
3.3.1	ไอซีควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผล	65
3.3.2	การเลือกค่าอุปกรณ์สำหรับ ICL 7106	68
3.3.3	รายละเอียดในการออกแบบใช้งาน ICL 7106	70

## VI

3.3.4	ตัวแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)	70
3.4	การออกแบบวงจร	71
3.4.1	วงจรส่วนแสดงผล	71
3.4.2	การออกแบบย่านการวัด	75
3.5	การสร้างและการปรับแต่ง	77
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลองผลการทดลอง และทดสอบ</b>	<b>78</b>
4.1	กล่าวนำ	78
4.2	วิธีการใช้และบำรุงรักษาเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข	78
4.3	การทดลองวัดแม่เหล็กที่ทราบค่าและขั้วแม่เหล็กที่ทราบค่าแน่นอน	78
4.3.1	การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กขนาด 1 กิโลเกาส์ โดยใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข	78
4.3.2	การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ฮอสซิลโลสโคป	80
4.4	การทดลองวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กกับแท่งแม่เหล็กมาตรฐานเพื่อหาความผิดพลาดจากการวัดในย่านที่สูงขึ้น	82
4.4.1	การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวัดที่สร้างขึ้น	82
4.4.2	การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กมาตรฐานด้วยฮอสซิลโลสโคป	82
<b>บทที่ 5</b>	<b>บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา</b>	<b>84</b>
5.1	สรุป	84
5.2	ปัญหา	84
5.3	แนวทางแก้ไข และพัฒนา	85
5.3.1	แนวทางแก้ไข	85
5.3.2	แนวทางการพัฒนา	85
ภาคผนวก ก	รูปต้นแบบเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข	87
ภาคผนวก ข	วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข	92
ภาคผนวก ค	คู่มือการใช้งานเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข	100
ภาคผนวก ง	รายการข้อมูลและคุณสมบัติของอุปกรณ์	104
<b>บรรณานุกรม</b>		<b>129</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VII

### สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นแรงของสนามไฟฟ้ารอบประจุไฟฟ้าบวกซึ่งมีขนาดเล็ก	6
รูปที่ 2.2 (ก) ฟลักซ์ไฟฟ้าผ่านพื้นที่ A ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า E จะมีขนาด EA (ข) หาก A เอียงทำมุม $\theta$ กับแนวตั้งฉากกับ E พื้นที่ซึ่งผล $A' = A \cos \theta$ ดังนั้น ฟลักซ์ไฟฟ้าจะเป็น $\Psi = E a \cos \theta$	7 7
รูปที่ 2.3 แรงแม่เหล็ก $F_m$ ที่กระทำกับอนุภาคที่มีขนาดประจุไฟฟ้า $q$ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B จะมีขนาด $F_m = qvB$ และทิศทางตั้งฉาก $v$ และ B	9
รูปที่ 2.4 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิด ฟลักซ์สุทธิที่ไหลผ่านผิว a เป็นศูนย์ผ่านพื้นผิว b เป็นบวก $(+Q/\epsilon_0)$ และที่ผ่านพื้นผิว c $(-Q/\epsilon_0)$	10
รูปที่ 2.5 (ก) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในแท่งฉนวนปิดเป็นศูนย์ (ข) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในฉนวนปิดเพียงขั้วเดียวจะเป็นศูนย์	11 11
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นรอบฟลักซ์แม่เหล็กนั้น	12
รูปที่ 2.7 (ก) ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟคในสารกึ่งตัวนำ (ข) ปรากฏการณ์มุมของฮอลล์	13 13
รูปที่ 2.8 หลักการของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์	16
รูปที่ 2.9 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจนเนอเรเตอร์	17
รูปที่ 2.10 ผังการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิตช์	18
รูปที่ 2.11 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดแลตซ์	18
รูปที่ 2.12 ผังการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นเบอร์ TL3103	19
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ LCD	21
รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้างแบบนีเมติก (ข) โครงสร้างแบบโครเรสเทอริก	22 22

## VIII

รูปที่ 2.15 การแสดงผลเชิงบวก	23
รูปที่ 2.16 การแสดงผลของ LCD แบบต่าง ๆ	23
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับแรงดัน	25
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลย์ของ LCD	26
รูปที่ 2.19 การสลับเฟสของการขับโดยตรงมี Exclusive OR Gate ควบคุมแรงดันส่ง ไปให้ส่วนต่าง ๆ	27
รูปที่ 2.20 ตัวเลขหนึ่งตัวพร้อมจุดทศนิยม (8 ส่วน) โดยใช้มัลติเพล็กซ์ 1:3	28
รูปที่ 2.21 การต่อแบบธรรมดา	29
รูปที่ 2.22 การต่อแบบแบ่งตัวนำ	30
รูปที่ 2.23 การต่อแบบพอลีย์	30
รูปที่ 2.24 การต่อวงจร parallel comparator A/D converter	33
รูปที่ 2.25 ผังการทำงานของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	34
รูปที่ 2.26 ความชันของสัญญาณแรมป์	35
รูปที่ 2.27 ผังการทำงานของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล	36
รูปที่ 2.28 เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์เทียบกับเวลา	36
รูปที่ 2.29 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบเคลต์ต้า-ซิกมา	39
รูปที่ 2.30 วงจรแอนะล็อกแบบวงจรมัลติเพล็กซ์ที่สร้างโดยวงจรมัลติเพล็กซ์และวงจรมัลติเพล็กซ์	39
รูปที่ 2.31 วงจรแอนะล็อกที่สร้างขึ้นจากวงจรมัลติเพล็กซ์/ลง และวงจรมัลติเพล็กซ์	40
รูปที่ 2.32 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ Successive Approximation	41
รูปที่ 2.33 ความผิดพลาดจากสัญญาณแอนะล็อกทางอินพุตเปลี่ยนแปลง	42
รูปที่ 2.34 รูปสัญญาณที่เกิดจากเคลมปลิงแรงดันอินพุตในอุดมคติ	44
รูปที่ 2.35 ผังการทำงานการจัดส่วนป้องกันทางอินพุต	44
รูปที่ 2.36 วงจรป้องกันอย่างง่ายโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเคลมปลิงแรงดัน	44
รูปที่ 2.37 การต่อทรานซิสเตอร์อิมิตเตอร์ตามแทนซีเนอร์ไดโอด	46
รูปที่ 2.38 การต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดันอ้างอิงใช้กับทรานซิสเตอร์	46
รูปที่ 2.39 (ก) การใช้ซีเนอร์ไดโอดรักษาระดับแรงดันอ้างอิง (ข) การต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับความละเอียดของแรงดันอ้างอิง	47
รูปที่ 2.40 การต่อซีเนอร์ไดโอดคอนนักรวมกับขาอิมิตเตอร์ เพื่อเพิ่มช่วงแรงดันการป้องกัน	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IX

รูปที่ 2.41 การใช้ไดโอด $D_2$ ป้องกันการไหลย้อนกลับที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เมื่อ ทรานซิสเตอร์ทำงาน	48
รูปที่ 2.42 การเพิ่มทรานซิสเตอร์เพื่อป้องกันแรงดันอินพุตที่เป็นลบ	49
รูปที่ 2.43 การแบ่งแรงดันอ้างอิงให้กับทรานซิสเตอร์ด้วยตัวต้านทาน $R_1$ - $R_3$	49
รูปที่ 2.44 การจัดวงจรป้องกันโดยจำกัดค่าแรงดันอินพุตไม่เกิน $\pm 10$ โวลต์	50
รูปที่ 2.45 วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดียว	51
รูปที่ 2.46 ผังการทำงานของวงจรขยายคอมมอนอิมิตเตอร์ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดียว	51
รูปที่ 2.47 วงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับการป้อนกลับที่คอลเลกเตอร์	53
รูปที่ 2.48 วงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับการป้อนกลับที่อิมิตเตอร์	53
รูปที่ 2.49 การป้อนกลับที่อิมิตเตอร์พร้อมกับตัวเก็บประจุ $C_E$	54
รูปที่ 2.50 วงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับการป้อนกลับแบบแบ่งแรงดัน	55
รูปที่ 2.51 (ก) วงจรจ่ายกระแสคงที่	53
(ข) วงจรจ่ายกระแสคงที่ที่มีกราวด์อ้างอิง	56
รูปที่ 2.52 (ก) สัญลักษณ์ของวงจรถ้าเนคกระแสคงที่ในวงจร	58
(ข) การชดเชยอุณหภูมิด้วย LED	58
รูปที่ 2.53 วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit)	59
รูปที่ 2.54 วงจรลดทอนแบบ T-Network	60
รูปที่ 2.55 การหาค่าการลดทอนของวงจรแบบ T-Network	61
รูปที่ 2.56 วงจรลดทอนแบบ $\pi$ -Network	61
รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของวงจรส่วนวัดความเข้มแสงแม่เหล็ก	63
รูปที่ 3.2 ผังการทำงานของวงจรส่วนแสดงผล	64
รูปที่ 3.3 ส่วนวงจรภาคแอนะล็อกของ ICL 7106	65
รูปที่ 3.4 การต่อ Exclusive-OR Gate เพื่อขับส่วนที่เป็น Decimal point	66
รูปที่ 3.5 วงจรส่วนดิจิทัลของ ICL 7106	67
รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณพิกษาของ ICL 7106	68
รูปที่ 3.7 LCD ขนาด 3.5 หลัก แบบธรรมดา	71
รูปที่ 3.8 วงจรส่วนแสดงค่าความเข้มแสงแม่เหล็ก	73
รูปที่ 3.9 วงจรส่วนแสดงขั้วแม่เหล็ก	73

รูปที่ 4.1 การวัดแท่งแม่เหล็กมาตรฐาน โดยใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก แบบตัวเลข	79
รูปที่ 4.2 ผังการต่อออสซิลโลสโคป	80
รูปที่ 4.3 การต่อออสซิลโลสโคป	80
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG	81
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG โดยใช้ย่านการวัด 20 KG	82
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG โดยใช้ย่านการวัด 10 KG	83
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG โดยใช้ย่านการวัด 5 KG	83
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG โดยใช้ย่านการวัด 2 KG	83



# XI

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างส่วนมัลติเพล็กซ์กับจำนวนจุดต่อ	28
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตที่เป็นแอนะล็อกกับเอาต์พุตที่เป็นดิจิตอล	32
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ย่านการวัด, ค่าความต้านทาน และแรงดัน	76
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กขนาด 1KG	79
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กค่า 1 KG ที่ย่านการวัดต่างๆ	82



## คำอธิบายสัญลักษณ์

F	แรงเกิดจากการกระทำของประจุ
E	สนามไฟฟ้า
q	ประจุทดสอบ
$\Psi$	ฟลักซ์ไฟฟ้า
A	พื้นที่ภาคตัดขวาง
F <sub>m</sub>	แรงแม่เหล็ก
B	สนามแม่เหล็ก
$\mu_0$	เพอร์มิอิตีวี่แม่เหล็กสุญญากาศ
G	เกาส์เป็นหน่วยของความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก
$\Phi$	ฟลักซ์แม่เหล็ก
$\epsilon_0$	ค่าเพอร์มิอิตีวี่ของสุญญากาศ
Q	ผลรวมประจุไฟฟ้าภายในผิว
E <sub>n</sub>	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวตั้งฉากกับผิว
B <sub>n</sub>	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นที่
$\Delta S$	พื้นที่ส่วนหนึ่งของผิวที่ปิดสนิท
$\Delta\phi$	การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก
$\Delta t$	การเปลี่ยนแปลงของเวลา
B <sub>T</sub>	องค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก B
E <sub>T</sub>	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า E
$\Delta L$	ระยะทาง
I	กระแสไฟฟ้า
$\Delta E$	การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า
V	แรงเคลื่อนไฟฟ้า
e	อิเล็กตรอน
$\epsilon_H$	สนามของฮอลล์
J	ความหนาแน่นของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### XIII

$R_e$	ค่าคงตัวของอิเล็กทรอนิกส์
$R_h$	ค่าคงตัวของโฮล
$n_e$	อิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
$p_e$	อิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$\mu$	ความคล่องตัว
$\sigma_e$	ค่าโมบิลิตีของอิเล็กทรอนิกส์
$\mu_e$	ความคล่องตัวของอิเล็กทรอนิกส์
$A$	อัตราขยายแรงดัน
$a$	ค่าอัตรการลดทอน
$R_{INT}$	ตัวต้านทานอินที่เกรเตอร์
$I_{INT}$	กระแสอินที่เกรเตอร์
$C_{INT}$	ตัวเก็บประจุอินที่เกรเตอร์
$f_{OSC}$	ความถี่ออสซิลเลเตอร์
$C_{OSC}$	ตัวเก็บประจ้ออสซิลเลเตอร์
$R_{OSC}$	ตัวต้านทานออสซิลเลเตอร์
$t_{OSC}$	เวลาการเกิดออสซิลเลเตอร์
$V_{INFS}$	แรงดันอินพุตเต็มสเกล
$C_{AZ}$	ตัวเก็บประจุปรับศูนย์อัตโนมัติ
$C_{REF}$	ตัวเก็บประจุอ้างอิง

## คำอธิบายศัพท์

<b>Alingment layer</b>	ชั้นจັคระบบรับแสง เป็นส่วนประกอบของแผงแสดงผลแบบผลึกเหลว ใช้สำหรับกั้นแสงที่เข้ามากระทบ LCD
<b>Anisotropy</b>	คุณสมบัติทางแสงของโมเลกุลซึ่งทำให้แสงส่องผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกไปได้
<b>Bypasses</b>	การผ่านของสัญญาณ โดยอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวใดตัวหนึ่งเป็นตัวผ่าน เช่น บายพาสคาปาซิเตอร์
<b>Conversion time</b>	ช่วงเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ หรือเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณ เช่น การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
<b>Drift velocity</b>	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
<b>Hall angle</b>	มุมของฮอลล์หรือมุมของการเกิดฮอลล์
<b>Hall coefficient</b>	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์หรือค่าคงตัวของฮอลล์
<b>Hall emf</b>	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์
<b>Hall effect</b>	ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสนามไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก
<b>Hall field</b>	สนามฮอลล์หรือสนามของฮอลล์ สนามนี้จะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก
<b>Hall mobility</b>	ความคล่องตัวของฮอลล์
<b>Hall voltage</b>	แรงดันของฮอลล์ โดยค่าของแรงดันจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างฮอลล์ และความเข้มของสนามแม่เหล็ก
<b>Indium / Tin oxide</b>	สารประกอบออกไซด์ของดีบุก และอินเดียมซึ่งใช้ทำ LCD
<b>Intercept</b>	จุดที่แรงดันค่าหนึ่งทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์
<b>Lorence force</b>	แรงกระทำต่ออิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก
<b>Saturate clampig</b>	การยกระดับจนถึงจุดอิ่มตัว เกิดขึ้นในวงจรระดับสัญญาณที่ใช้ซีเนอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summing point	จุดร่วมของไอซีคอนเวเตอร์ เมื่อใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายกระแส
Viscosity	ความเหนียวของผลึกเหลวซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยรอบของผลึกเหลว



# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีและความเจริญทางด้านระบบดิจิทัลก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก จึงได้มีการนำเอาระบบดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัดและทดสอบประเภทต่างๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากระบบดิจิทัลมีความละเอียดถูกต้อง และแม่นยำสูงแล้วยังสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กจัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในห้องทดลอง โดยเฉพาะการทดลองที่เกี่ยวกับการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องมาจากความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีผลอย่างมากในการติดต่อสื่อสาร เพราะจะบอกให้ทราบถึงความแรงของสัญญาณที่รับได้ และที่ส่งออกไป นอกจากนี้ยังบอกให้ทราบถึงระดับความอันตรายของเส้นแรงแม่เหล็กต่อสิ่งมีชีวิตอีกด้วย เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนมากจะเป็นระบบแอนะล็อก หรือระบบที่อ่านข้อมูลจากหน้าปัทม์แบบเข็มซึ่งโดยอาศัยหลักการของขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil) ซึ่งมักจะเกิดปัญหาเรื่องความละเอียดและความถูกต้องแม่นยำ ดังนั้น การนำเอาเทคโนโลยีการแสดงผลแบบตัวเลข มาใช้จึงเป็นการแก้ปัญหาได้อย่างดี และยังเป็นการประหยัดเงินตราต่างประเทศได้อีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากเครื่องมือวัดประเภทนี้มีราคาแพง เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก และนำผลการศึกษาที่ได้ไปออกแบบ แล้วทำการสร้างเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบแสดงผลด้วยตัวเลข ตลอดจนการทดสอบเครื่องมือวัดที่ได้สร้างขึ้น และการนำเอาเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนี้ไปใช้งานจริงในห้องทดลองได้

### 1.3 ขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาหลักการแสดงผลด้วยระบบตัวเลข โดยมีไอซีแสดงผลแบบดิจิทัล เป็นตัวควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผล โดยมีรายละเอียดและขอบเขตในการศึกษาคงต่อไปนี้

1.3.1 ระบบการแสดงผลด้วยตัวเลข

1.3.2 การแสดงผลด้วยตัวแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)

1.3.3 การใช้ไอซีตัวเดียวควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผล

1.3.4 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital converter)

1.3.5 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากที่ได้ทำปริญญานิพนธ์นี้แล้ว คาดว่าจะได้รับประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

1.4.1 มีความรู้ในการทำงานของเครื่องมือวัดความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

1.4.2 มีความรู้ในหลักการของปรากฏการณ์ ฮอลล์เอฟเฟกต์

1.4.3 มีความรู้ในการทำงานของไอซีตัวเดียวที่ใช้ควบคุมส่วนแสดงผล

1.4.4 สามารถนำเครื่องที่สร้างขึ้นไปใช้ประโยชน์ในห้องทดลองได้

### 1.5. เนื้อหาโดยสังเขป

ในปริญญานิพนธ์จะประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 เรื่อง ได้แก่ บทนำ, ทฤษฎีและหลักการ, การออกแบบการสร้างและการทำงาน, การทดลองและผลการทดลอง และบทสรุป ข้อเสนอแนะต่างๆ

บทนำ จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับความเป็นมาของการทำปริญญานิพนธ์ วัตถุประสงค์ และขอบเขตการทำปริญญานิพนธ์ รวมไปถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ บทนี้เป็นรายละเอียดของทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำปริญญานิพนธ์นี้ เช่น ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก และฟลักซ์แม่เหล็ก, ทฤษฎีของฮอลล์เอฟเฟกต์ แนวคิด และทฤษฎีของการแสดงผลด้วยตัวเลข เป็นต้น

บทที่ 3 การออกแบบการสร้าง และการทำงาน กล่าวถึงเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ ตลอดจนรายละเอียดของการออกแบบ และการสร้างโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองผลการทดลอง และทดสอบ ประกอบไปด้วยรายละเอียดของผล  
การทดลอง วิธีการทดลอง และทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 สรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา บทนี้เป็นการสรุปผลการทดลอง และ  
ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดจนการแก้ไข และแนวทางการพัฒนาปริญญาานิพนธ์นี้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นกรอธิบายเกี่ยวกับ หลักการ และทฤษฎีต่างๆ พร้อมทั้งสมการที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็ก และการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ พร้อมด้วยรายละเอียดของวงจรต่างๆ เช่น วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล, วงจรลดทอน, วงจรขยาย, วงจรจ่ายกระแสคงที่, วงจรป้องกันอินพุตของวงจรเอชดี และ รายละเอียดของแผงแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)

#### 2.2 ทฤษฎีสถานมไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับฟลักซ์แม่เหล็กนั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับเรื่องสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก่อน เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับสนามทั้งสองอย่างมาก

##### 2.2.1 สนามไฟฟ้า

จากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) กล่าวว่า ประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะผลักรันและประจุไฟฟ้าต่างกันจะดูดกัน โดยที่เราเรียกแรงที่ประจุ 2 ตัว กระทำต่อกันว่า แรงไฟฟ้าสถิตย (Electrostatic force) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์พื้นฐานของแรงกระทำระหว่างประจุจากสมการข้างต้น สามารถพิจารณาได้จากแนวความคิดของสนามไฟฟ้าได้ โดยแยกออกเป็นสองส่วน คือ การเกิดสนาม

ไฟฟ้าจากประจุหนึ่งตัว กับอีกส่วนหนึ่งเป็นการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของประจุนี้อีกตัวหนึ่ง

ในส่วนแรกนั้น ประจุไฟฟ้าอนุภาค  $q_1$  จะทำให้เกิดอิทธิพลเชิงไฟฟ้า หรือสนามไฟฟ้า  $E_1$  ในบริเวณรอบประจุนั้น ไม่ว่าจะมียีกประจุไฟฟ้าหนึ่งปรากฏอยู่หรือไม่ก็ตาม

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

แต่อีกส่วนหนึ่งนั้น ประจุไฟฟ้าตัวหนึ่ง  $q_2$  เมื่ออยู่ในอิทธิพลของสนามดังกล่าวแล้ว แสดงการตอบสนองต่ออิทธิพลของสนามนั้น ซึ่งปรากฏเป็นแรงมีขนาดและทิศทาง

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

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

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

หน่วยของสนามไฟฟ้า  $E$  มีหน่วยเป็นแรงต่อประจุไฟฟ้า หรือนิวตันต่อคูโลมบ์ (N/C) หรือบางครั้งอาจอยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะทาง หรือ โวลต์ต่อเมตร (V/m)

จากสมการ (2.4) จะพบว่า แรงของสนามไฟฟ้าจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับประจุ แต่เป็นอิสระกับความเร็วประจุ และทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดที่พิจารณาจะมีทิศทางขนานกับแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งนำไปวางทดสอบที่ตำแหน่งนั้น อีกทั้งสนามไฟฟ้าจากหลาย

ประจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของแต่ละสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต่างๆ ที่กระทำที่จุดนั้น

จากแนวคิดเรื่องสนามไฟฟ้าสามารถนำไปสู่แนวคิดเรื่อง ความหนาแน่นของเส้นแรงแสนามไฟฟ้าว่าเป็นสัดส่วนกัน บริเวณใดมีเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามาก ที่นั่นก็就会有ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงตามไปด้วย ทั้งนี้ เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะแผ่ออกรอบประจุที่ทำให้เกิดสนามในทุกทิศทาง ดังรูปที่ 2.1 และขนาดของสนาม  $E$  เป็นสัดส่วนกับ  $1/r^2$  ดังสมการ (2.2) แนวทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นทิศทางเดียวกับแรงจากสนามไฟฟ้ากระทำต่อประจุในสนาม หากประจุนั้นเป็นบวก

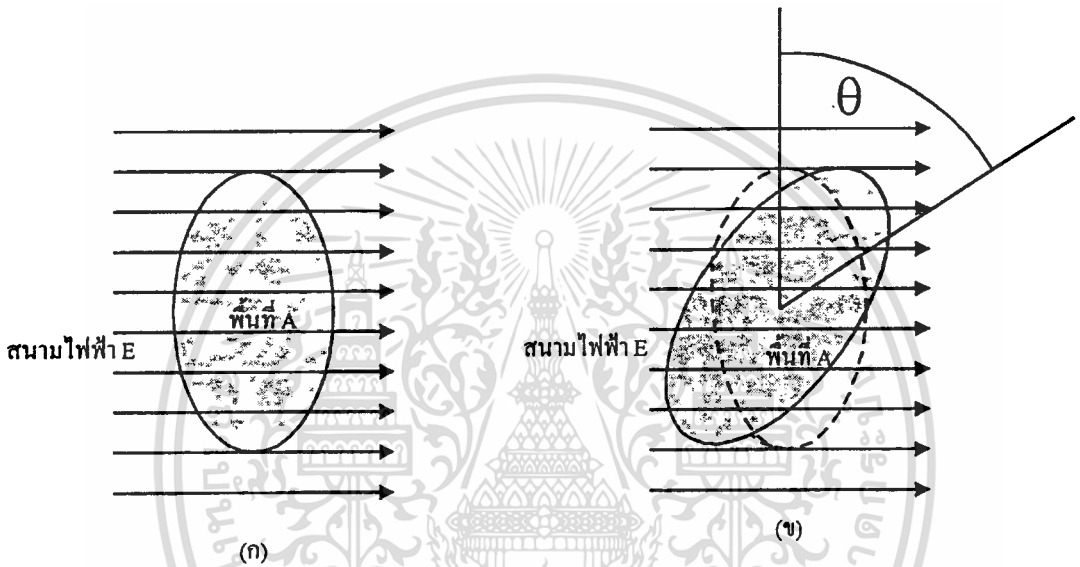


รูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กของสนามไฟฟ้ารอบประจุไฟฟ้าบวกซึ่งมีขนาดเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบกับของไหลปริมาณคงที่ที่ไหลผ่านพื้นที่ ซึ่งมีขนาด และรูปร่างต่างๆ กัน เช่น กระแสน้ำไหลจากจุดเริ่มต้นผ่านท่อขนาดต่างๆ กันไปสู่จุดสุดท้าย โดยที่ปริมาณของน้ำทั้งหมดที่ไหลผ่านพื้นที่ต่างๆ ย่อมเท่ากัน แต่ปริมาณของน้ำที่ไหลต่อหน่วยพื้นที่ ย่อมแตกต่างกัน ในทำนองเดียวกัน เส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเริ่มต้นจากประจุบวกผ่านบริเวณต่างๆ ไปสู่ประจุลบก็อาจถือได้ว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดเทียบได้กับปริมาณกระแสน้ำทั้งหมดหรือฟลักซ์ ในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่เทียบได้กับปริมาณกระแสน้ำต่อหน่วยพื้นที่หรือ

ความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux density) ทำให้ทราบนิยามของฟลักซ์ไฟฟ้าว่าเป็นผลคูณของสนามไฟฟ้า  $E$  และพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งทำมุม  $\theta$  กับทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ดังนี้

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



รูปที่ 2.2 (ก) ฟลักซ์ไฟฟ้าผ่านพื้นที่  $A$  ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า  $E$  จะมีขนาด  $EA$   
 (ข) หาก  $A$  เอียงทำมุม  $\theta$  กับแนวตั้งฉากกับ  $E$  พื้นที่ซึ่งผล  $A' = A \cos \theta$   
 ดังนั้น ฟลักซ์ไฟฟ้าจะเป็น  $\Psi = EA \cos \theta$

### 2.2.2 สนามแม่เหล็ก

สมการของคูลอมบ์ ซึ่งแสดงแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุสองตัว นั้น ใช้เฉพาะกรณีที่ประจุใดประจุหนึ่งในสองประจุนั้นเคลื่อนที่ถ้าหากประจุทั้งสองต่างก็เคลื่อนที่แรงกระทำระหว่างประจุทั้งสอง จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่หาได้ใน สมการของคูลอมบ์ แรงที่เพิ่มเข้ามานี้ เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่ นั่นคือ แรงแม่เหล็กเป็นแรงที่กระทำระหว่างกระแสไฟฟ้าสองกระแส ซึ่งจะต่างจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดจากประจุเมื่ออยู่กับที่กระทำกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าแรงแม่เหล็กหาได้จากกรณานำสมการ (2.1) คูณเข้ากับอัตราส่วนกำลังสองระหว่าง  $v$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของประจุทั้งสอง และ  $c$  เป็นความเร็วของแสง ดังนี้

$$F_m = \frac{kq_1q_2}{r^2} \left( \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) สามารถแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแรงที่ได้จากไฟฟ้าสถิตย์ และ ส่วนที่สองเป็นอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังนี้

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

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

เราสามารถเขียนสมการ (2.7),(2.8) ใหม่ให้อยู่ในรูปทั่วไป เพื่อให้เป็นนิยามของสนามแม่เหล็ก  $B$  หรือ เรียกว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรือความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction) ได้ดังนี้

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

$$\text{เมื่อ } k' = \frac{k}{c^2}$$

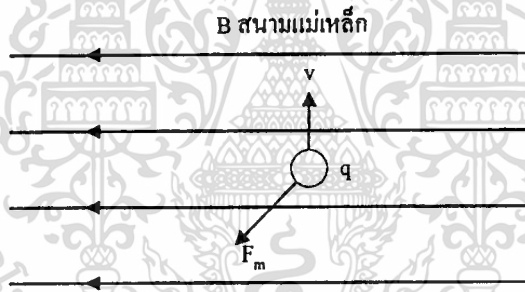
$$B = k' v \frac{q}{r^2} \quad (2.10)$$

โดยที่สนามแม่เหล็ก  $B$  มีหน่วยเป็น เทสลา (Tesla) หรือ  $\text{Ns/Cm}$  หรือ  $\text{N/Am}$  หรือ  $\text{kg/C s}$

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

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

จากสมการ (2.11) ขนาดของแรงจากสนามแม่เหล็ก นั้นนอกจากเป็นส่วนหนึ่งกับทั้งขนาด และ ความเร็วของประจุไฟฟ้าในอิทธิพลของสนามแม่เหล็กแล้ว ยังขึ้นอยู่กับทิศทางซึ่งประจุนั้นเคลื่อนที่ด้วย นอกจากนี้ ทิศทางของแรงจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่อยู่ที่อิทธิพลนั้นตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางเคลื่อนที่ของประจุนั้นด้วย



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

### 2.3 สมการของแมกซ์เวลล์

กฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งอธิบายสนามไฟฟ้าได้โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้านั้น

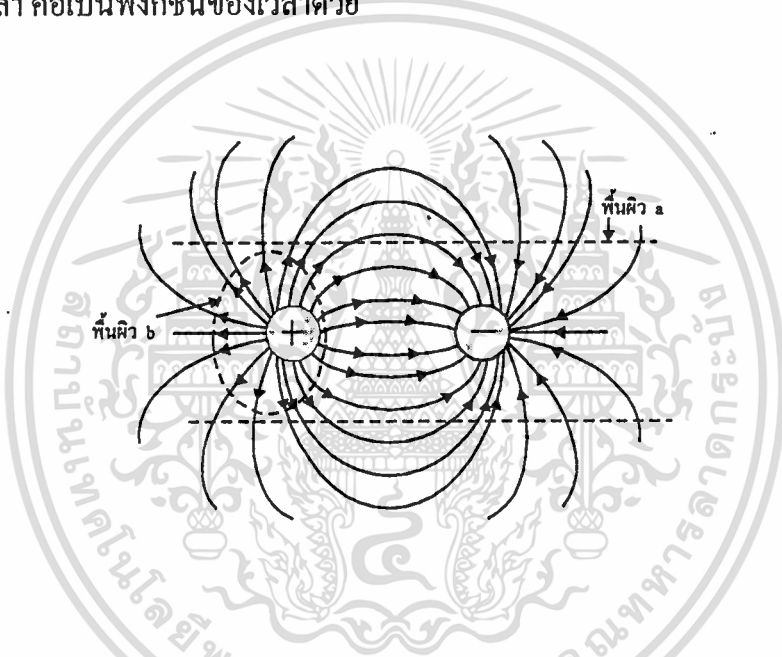
กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้ากล่าวว่าฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดหรือผลรวมขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ซึ่งอยู่ตามแนวตั้งฉาก และ ผ่านออกมาจากผิวที่ปิดสนิทจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมของประจุที่อยู่ในผิวนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi = \Sigma(E_n \Delta S) = \frac{1}{\epsilon_0} \Omega \quad (2.12)$$

โดยจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายประจุด้วย ทั้งนี้ เส้นแรงไฟฟ้าเริ่มจากประจุไฟฟ้าบวกและไปสิ้นสุดที่ประจุไฟฟ้าลบ

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้าเริ่มใช้กับปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต อันเป็นกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ไม่แปรกับเวลา และกฎนี้สามารถใช้ได้กับกรณีเมื่อสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา คือเป็นฟังก์ชันของเวลาด้วย



รูปที่ 2.4 ฟลักซ์จากสองประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน ฟลักซ์สุทธิที่ไหลผ่านผิว a เป็นศูนย์ผ่านพื้นผิว b เป็นบวก  $(+Q/\epsilon_0)$  และที่ผ่านพื้นผิว c  $(-Q/\epsilon_0)$

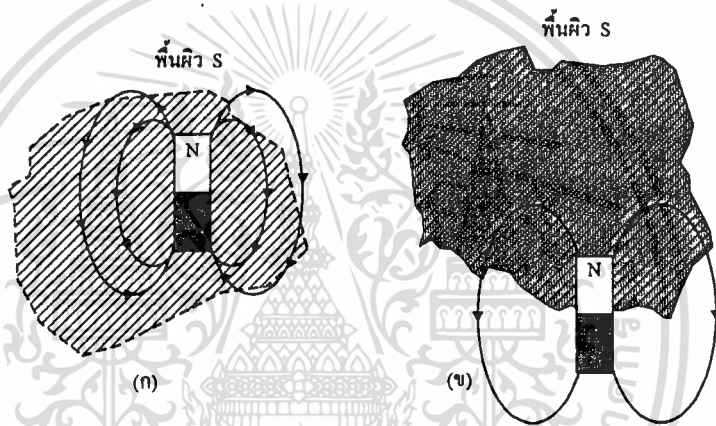
กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก (Gauss's law for magnetism) กฎนี้ใช้อธิบายสนามแม่เหล็ก มีความคล้ายคลึงและคู่กับกฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้าสถิตย์

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ กล่าวว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวที่ปิดสนิท ซึ่งภายในอาจมีหรือไม่มีแท่งแม่เหล็กเลยก็ตาม จะเป็นศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Phi = \Sigma(B_n \Delta S) = 0 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า สมการ (2.12) และ (2.13) มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งสมการ (2.13) นี้อาจเขียนแทนได้จากสมการ (2.12) โดยการแทน  $\Psi$  และ  $E$  ด้วย  $\Phi$  และ  $B$  ตามลำดับ ส่วนทางขวามือสมการเป็นศูนย์เนื่องมาจากการทดลองยังไม่เคยพบว่ามีขั้วแม่เหล็กเดี่ยวไม่เหมือนประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ ซึ่งอยู่เป็นอิสระได้โดยลำพัง หมายถึงว่า ในผิวที่ปิดใดๆ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านออกไปจากผิวต้องผ่านสวนกลับเข้าไปในผิวด้วย ผลลัพธ์สุทธิจึงเป็นศูนย์เสมอ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเป็นปริมาณโดยตรงกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ด้วย กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ใช้ได้ทั้งกรณีที่สนามแม่เหล็กคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา



รูปที่ 2.5 (ก) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในผิวปิดเป็นศูนย์  
(ข) ฟลักซ์สุทธิจากแท่งแม่เหล็กที่อยู่ภายในผิวปิดเพียงขั้วเดียวจะเป็นศูนย์

จากผลสรุปที่กล่าวไว้ว่า “ จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปจากเดิม ” หรือหากมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น

กฎของฟาราเดย์ และเฮนรีสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Faraday Henry’s law of induce electromotive force) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และ ฟลักซ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป  $\Delta\Phi$  กับเวลา  $\Delta t$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเท่ากับค่าลบของอัตราการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

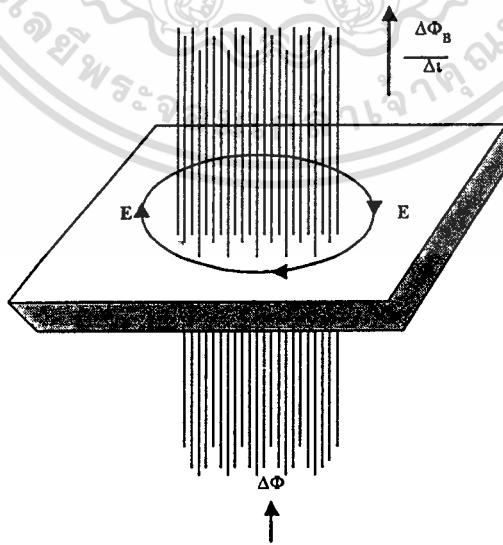
$$\text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

เครื่องหมายลบปรากฏในสมการ เพื่อเป็นการแสดงว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีทิศทางที่ต่อต้าน การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎเกณฑ์ทั่วไปในธรรมชาติ ที่ว่า หากมีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีพยายามที่จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงนั้น

ทั้งนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคืองานที่ต้องกระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุไฟฟ้าในการที่จะทำให้ประจุไฟฟ้า เคลื่อนที่ไปตามเส้นล้อมรอบฟลักซ์แม่เหล็กที่พิจารณาไว้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อาจเขียนให้อยู่ในรูปเป็นผลบวกของผลคูณ ของแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าหนึ่งหน่วย คือ  $E_T$  หรือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า  $E$  เมื่อคิดในแนวขนานกับระยะทางคิดเป็นช่วงสั้นๆ  $\Delta L$  ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นซึ่งล้อมฟลักซ์แม่เหล็กนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

หรืออีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามไฟฟ้ารอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้ เป็นค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ล้อมปิดดังกล่าว



รูป 2.6 การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กกับเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ซึ่งจะเกิดขึ้นรอบฟลักซ์แม่เหล็กนั้น ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้านี้ระบุว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กรอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่หนึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและตั้งฉากกับพื้นที่ที่ล้อมปิดนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

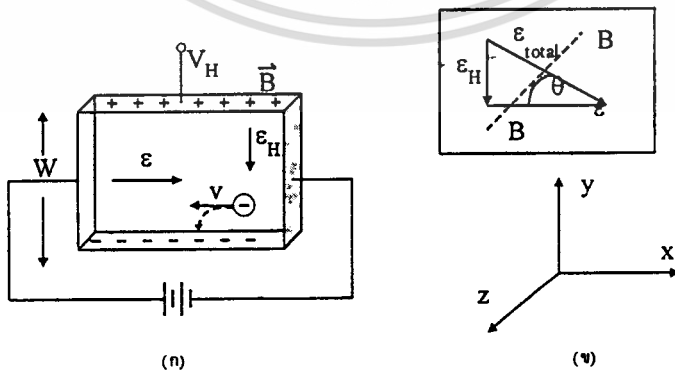
$$\Sigma(B_T \Delta L) = \mu_0 I \tag{2.15}$$

เมื่อ  $B_T$  เป็นองค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่ขนานกับระยะทาง  $\Delta L$  ที่ล้อมปิดบริเวณสนามแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นไม่เพียงเฉพาะบริเวณใกล้กับที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นด้วยหากสนามไฟฟ้าแปรไปกับเวลา ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Sigma(B_T \Delta L) = \mu_0 \left( I + \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) \tag{2.16}$$

หรืออีกนัยหนึ่ง การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กรอบเส้นที่ล้อมปิดพื้นที่บริเวณหนึ่งไว้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงไฟฟ้าในบริเวณนั้น

### 2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟค (HALL EFFECT)



รูปที่ 2.7 (ก) ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟคในสารกึ่งตัวนำ

(ข) ปรากฏการณ์มุมของฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำดังในรูปที่ 2.7 เมื่อมีสนามแม่เหล็ก (ทิศทางตั้งฉากกับ  $J$  และ พุ่งออกจากกระดาษ) อิเล็กตรอนจะได้รับแรงลอเรนซ์ และเคลื่อนที่โค้งลงด้านล่าง ทำให้พิวด้านล่างเป็นลบเมื่อเทียบกับพิวด้านบน และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นในทิศทาง  $-Y$  เรียกว่า สนามของฮอลล์ (Hall field) สนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง  $+Y$  ในสภาวะคงที่ แรงจากสนามแม่เหล็ก และจากสนามของฮอลล์จะเท่ากัน

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

ในกรณีของอิเล็กตรอนเนื่องจาก  $J = -en v$

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

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

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

และในกรณีของโฮลก็จะอยู่ในรูปเดียวกัน ยกเว้นประจุของโฮลซึ่งเป็นบวก และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เป็นบวกด้วย

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



ในกรณีที่มีพาหะนำประจุชนิดเดียว จาก  $eE_H = eBv$  หรือ  $v = E_H / B$  และจากนิยามของความคล่องตัว ( $v$  ในที่นี้คือ Drift velocity) ดังนั้น  $\mu$  คือ สนามไฟฟ้าในแนว  $x$  หรือคือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแบตเตอรี่หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายนอกนั่นเอง ดังรูปที่ 2.7

เนื่องจากผิวของศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Constant potential) จะตั้งฉากกับเส้นของสนามไฟฟ้า ดังนั้น จะเห็นได้ว่าจะมีจุดบางจุด เช่น B และ B' ซึ่งมีความต่างศักย์เป็นศูนย์ จากรูปที่ 2.7  $E_H / E$  มีค่าเท่ากับ  $\tan \theta$  ดังนั้น  $\mu$  นี้เรียกว่ามุมของฮอลล์ ดังนั้น

$$\mu = \frac{\tan \theta}{B} \tag{2.21}$$

ความคล่องตัวนี้ยังอาจวัดได้อีกวิธีหนึ่งจากการทดลองของฮอลล์ คือ ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น แทนค่า  $ne$  จากสมการ (2.19) จะได้

$$\sigma_c = ne \mu_c \tag{2.22}$$

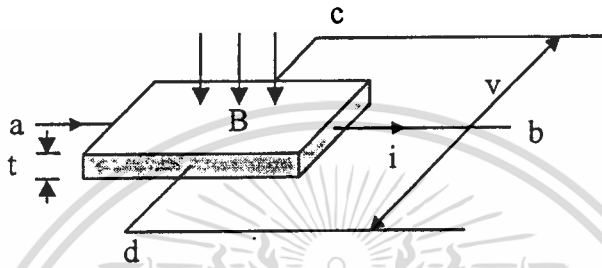
สำหรับกรณีของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ จะได้สมการคล้ายๆ กัน ดังนั้นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถวัดได้จากสภาพการนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากสารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ค่า  $\sigma R$  นี้เรียกว่า ความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และเขียนย่อๆ ว่า  $\mu_H$

จะเห็นได้ว่าวิธีการของฮอลล์เอฟเฟกต์ทำให้สามารถวัดความหนาแน่นของพาหะนำประจุ และความคล่องตัวของพาหะนำประจุในสารกึ่งตัวนำได้

ในกรณีที่ต้องพิจารณาทั้งอิเล็กตรอน และโฮลพร้อมๆ กัน ต้องมีการแก้ไขสมการใหม่ให้ถูกต้อง จากรูปที่ 2.7.(ก) สนามไฟฟ้า  $E$  อยู่ในทิศ  $X$  และขณะเดียวกันสนามแม่เหล็ก  $B$  อยู่ในทิศ  $Z$  เนื่องจากสนาม  $E$  จะเกิดกระแส โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนไปทางซ้าย และโฮลไปทางขวา การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลในสนามแม่เหล็กนี้ทำให้มันได้รับแรงลอเรนซ์ และทิศทางเปลี่ยนไป คือทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่ลงไปสู่ผิวด้านล่าง (ดูรูป 2.7 (ก)) และเกิดการหักล้างกันขึ้น การหักล้างนี้จะไม่หมดไปอย่างสิ้นเชิง และทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่

ผิวด้านล่าง เนื่องจากสารจะต้องเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นจะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นที่ผิวคอนบน และเกิดสนามไฟฟ้าในแกน Y ขึ้น ซึ่งเรียกว่าสนามของฮอลล์

### 2.4.1 ฮอลล์เอฟเฟกต์

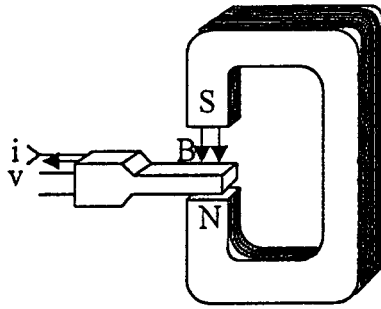


รูปที่ 2.8 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์

ในรูปที่ 2.8 ให้กระแส  $i$  (A) ไหลผ่านไปนในสารกึ่งตัวนำเช่นเจอร์มาเนียมที่มีความหนา  $t$ (m) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์  $B$  (Wb/m<sup>2</sup>) ในแนวตั้งฉากกับระนาบ (plane) ของสารกึ่งตัวนำนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $v$  (V) ขึ้นในแนวตั้งฉากกับทั้ง  $B$  และ  $i$  ดังนี้

$$v = \frac{\eta i B}{t} \quad (2.23)$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) และ  $\eta$  (m<sup>3</sup>/C) เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) ถ้าทราบค่า  $\eta$ ,  $t$  และ  $I$  เราจะหา  $B$  ได้โดยการวัด  $v$



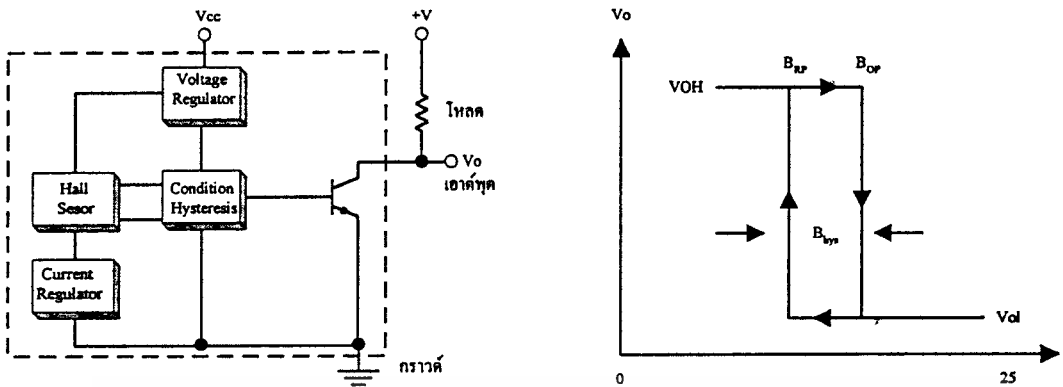
รูปที่ 2.9 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจเนอเรเตอร์

ฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีขนาดเล็กมาก ( $t$  มีค่าอยู่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) จนสามารถนำไปใช้วัดความหนาแน่นของฟลักซ์ในที่แคบๆ เช่น แสดงในรูป 2.9 ได้ ความไวของเครื่องนี้สามารถวัดได้ถึงระดับ  $10^{-4}$  (Wb/m<sup>2</sup>) การปรับเทียบทำได้โดยการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall emf) ในความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ทราบค่าแล้ว เกาส์มิเตอร์ที่ใช้ฮอลล์เจเนอเรเตอร์ โดยทั่วไปจะมีแม่เหล็กถาวรชิ้นเล็กๆ ซึ่งให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ทราบค่าติดอยู่ด้วยเพื่อใช้ในการปรับเทียบ

#### 2.4.2 ชนิดของฮอลล์

ฮอลล์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ ชนิดเป็นสวิตช์, ชนิดเป็นตัวลatches (latch) และชนิดเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น ชนิดสวิตช์ และชนิดลatches เป็นอุปกรณ์ทางดิจิทัลคือ จะมีเอาต์พุตเพียงสองสถานะ ไม่เปิดก็ปิด ในขณะที่ฮอลล์แบบเชิงเส้นจะให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก

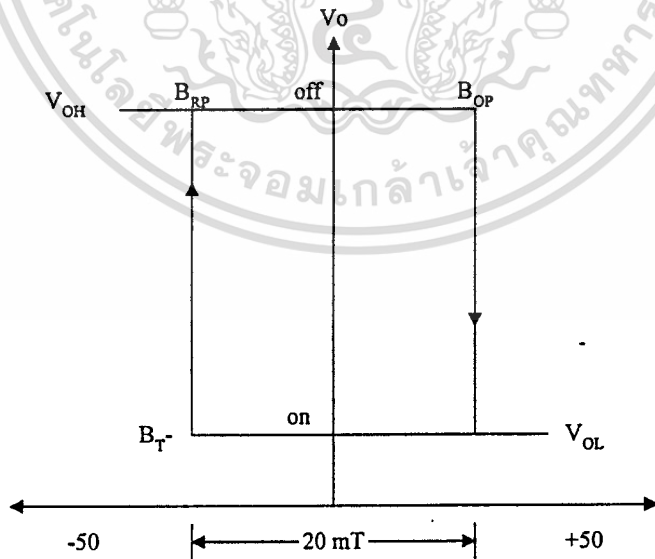
2.4.2.1 ฮอลล์ชนิดสวิตช์ (switch hall device) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในภาวะปกติ “ปิด” และ จะ “เปิด” เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก และจะปิดเมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิตช์

รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันของฮอลล์ชนิดสวิตช์ และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มจนถึงค่า  $B_{RP}$  แล้วจะได้แรงเคลื่อน  $V_{OH}$  สภาวะเช่นนี้คือ “เปิด” แต่เมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจะถึง  $B_{OP}$  จะได้แรงดัน  $V_{OL}$  สภาวะเช่นนี้คือ “ปิด”

2.4.2.2 ฮอลล์ชนิดแลตซ์ (Latch hall device)



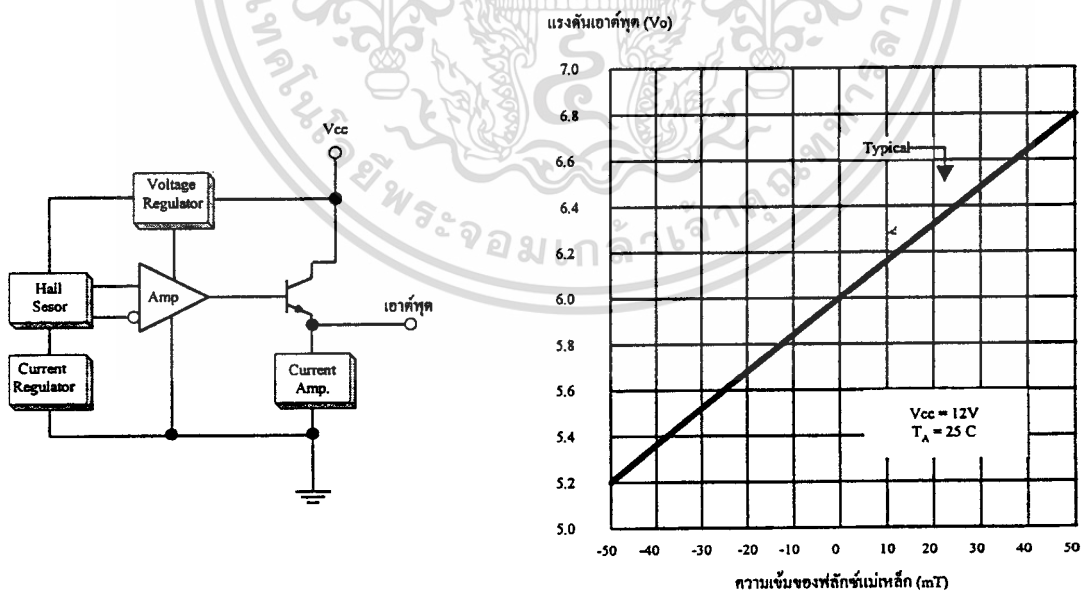
รูปที่ 2.11 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดแลตซ์

ฮอลล์ชนิดแอสแตซ์เป็นฮอลล์ที่จะเปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กบวกและจะปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กลบ ซึ่งต่างจากฮอลล์ชนิดสวิตช์ รูปที่ 2.11 เป็นการตอบสนองของฮอลล์ชนิดแอสแตซ์ จะเห็นว่าฮอลล์จะเปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กเพื่อแอสแตซ์เป็น 20 มิลลิเทสลา และจะปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กเป็น -25 มิลลิเทสลา

2.4.2.3 ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น (Linear hall device)

ถ้าเพิ่มสนามแม่เหล็กให้แก่ฮอลล์ แล้วทำให้แรงดันที่เกิดขึ้น เพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นแล้วเรียกฮอลล์แบบนี้ว่าฮอลล์ชนิดเชิงเส้น ซึ่งจะไม่เกิดการ เปิด/ปิด แบบฮอลล์ชนิดสวิตช์ คือไม่เกิดฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ความไวของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีประมาณ 16 มิลลิโวลต์ต่อมิลลิเทสลา ซึ่งสามารถนำฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมาหาขั้วของสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเรียกว่าจุดอินเตอร์เซปต์(Intercept point)

ถ้าแรงดันของฮอลล์ค่ามากกว่าจุดอินเตอร์เซปต์แล้ว แสดงว่าขณะนั้นขั้วของสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ แต่ค่าของแรงดันฮอลล์น้อยกว่าจุดอินเตอร์เซปต์ แสดงว่าสนามแม่เหล็กขณะนั้นเป็นขั้วใต้ เรานำคุณสมบัตินี้ไปหาดำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้



รูปที่ 2.12 ฟังงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นเบอร์

TL3103

รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรม และการตอบสนองของฮอลล์ ชนิดเชิงเส้นเบอร์ TL3103 ภายในไอซีเบอร์นี้มีฮอลล์ชนิดเชิงเส้นคอยรับรู้ (sensor) กระแสที่จ่ายให้แก่ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นจะต้องคงที่ โดยต้องต่อตัวจ่ายกระแสคงที่ให้แก่ฮอลล์เอาต์พุตจากฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีค่าค่า ดังนั้นจึงต้องขยายเพื่อให้ได้แรงดันที่สูงพอเมื่อนำไปใช้งาน

เนื่องจากฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการทำงานของฮอลล์ ภายในไอซีจะต้องมีส่วนชดเชยอุณหภูมิ ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นที่ดีจะต้องมีความเที่ยงตรง ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิใช้งานปกติ แรงดันที่วัดได้ไม่ควรผิดพลาดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันที่อุณหภูมิปกติ

แรงดันจากชนิดเชิงเส้นมีค่าน้อยมากเป็นมิลลิโวลต์ เราต้องขยายให้เป็นโวลต์ตัวอย่างเช่น เอาต์พุตของ TL3103 ขณะที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ (Intercept) แรงดันมีค่าสูงถึง 5 โวลต์ และถ้าหากสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตของ TL3103 ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

## 2.5 แผงแสดงผลแบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display;LCD)

LCD เป็นตัวแสดงผลที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน มีโครงสร้างเป็นผลึกคริสตัลเหลว โดยที่ผลึกเหลวเป็นสารที่รวมกันเป็นสัดส่วนของเหลวกับผลึก จุดหลอมเหลวของสารชนิดนี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เรียกว่า เมโซเฟส (Mesophase) โมเลกุลของสารสามารถเคลื่อนที่ได้เหมือนของเหลว แต่สารชนิดนี้ถูกจัดเป็นประเภทเดียวกับผลึกซึ่งเป็นของแข็ง ในปี พ.ศ.2513 มีการค้นพบว่า ในสารผลึกเหลวสามารถเปลี่ยนตัวเองจากใสกลายเป็นทึบแสงและจากทึบแสงกลายเป็นใสได้โดยการป้อนแรงดันเข้าไป คุณสมบัตินี้ก็คือหลักการพื้นฐานของ LCD

### 2.5.1 ข้อดีของแผงแสดงผลแบบ LCD

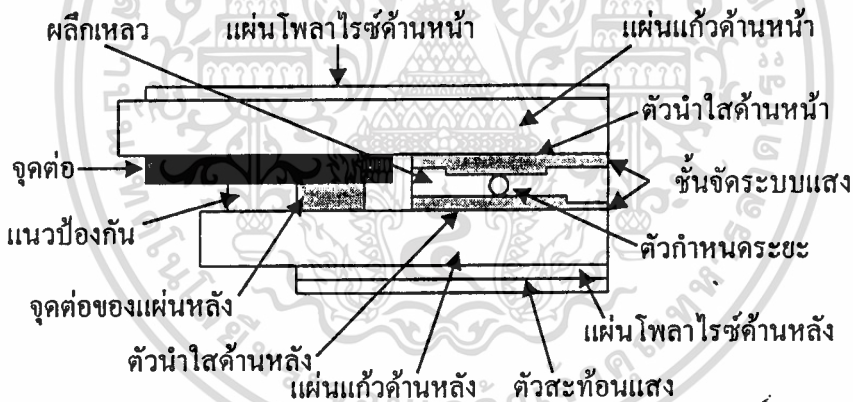
1. บางเบาและพกพาสะดวก มีความหนาเพียงไม่กี่มิลลิเมตร
2. ใช้พลังงานน้อย เนื่องจากต้องการกำลังงาน และแรงดันต่ำ ทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน แม้จะมีเพียงแบตเตอรี่ขนาดเล็กเป็นตัวจ่ายกำลัง และยังสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ซีมอส (CMOS) ได้ด้วย
3. เป็นตัวแสดงผลแบบพาสซีฟ (Passive display) เพราะว่า LCD ไม่ได้กำเนิดแสงเอง การอ่านค่าที่ตัวแสดงผลต้องใช้แสงสว่างจากภายนอก แต่ความเข้มของการแสดงผลไม่ได้จางลงเมื่อแสงสว่างจากภายนอกเพิ่มขึ้น หากต้องการอ่านค่าในที่มืด ทำได้โดยใช้แสงส่องมาจาก

ด้านหลังของแผง LCD ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เชื้อถื้อได้ ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างและมีอายุการใช้งานนาน
5. ใช้งานได้กว้างขวาง ด้วยข้อดีต่างๆ มากมาย เช่น นาฬิกา, เครื่องคิดเลข, เครื่องมือวัดต่างๆ จึงมีผู้ผลิตมากทำให้มีราคาถูก

## 2.5.2 โครงสร้างของ LCD

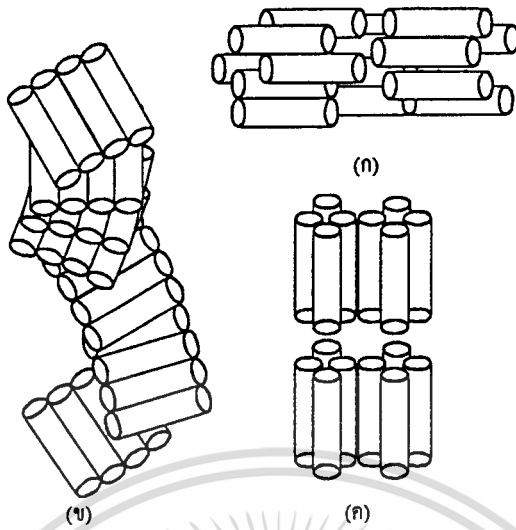
LCD ประกอบไปด้วยแผ่นแก้วสองแผ่นประกบกัน โดยเว้นช่องกลางไว้ประมาณ 6 ถึง 10 ไมโครเมตร (ดูรูปที่ 2.13) ผิวด้านในของแผ่นของแผ่นแก้วเคลือบด้วยตัวนำไฟฟ้าชนิดใสที่ไว้แสดง ตัวอักษร, สัญลักษณ์ หรือ เครื่องหมายต่างๆ ทำมาจากสารประเภทอินเดียม-ทินออกไซด์ (Indium-/Tin Oxide; ITO) ระหว่างตัวนำไฟฟ้าชนิดใสกับผลึกเหลวจะมีชั้นสารที่ทำให้โมเลกุลของผลึกรวมตัวกันในทิศทางที่แสงส่องออกมาเรียกว่าชั้นจัดระบบแสงหรือชั้นที่หันเหเข้าหาแสง



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ LCD

ระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสองจะถูกจำกัดโดยตัวจัดระยะ ชนิดของผลึกที่นิยมใช้กันคือแบบนีเมติก (Nematic) ดังรูปที่ 2.14 (ก) โมเลกุลของผลึกแบบนีเมติกจะวางขนานกันไปเป็นแนวตรงคล้ายเส้นลวดยาวถ้าหากว่าวางกลับทิศทางจะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไป ตัวคริสตอลเหลวที่สามารถแสดงเครื่องหมายพิเศษต่างๆ ได้คือแบบโครเรสเตอร์ริก (Cholesteric) และแบบสเมคติก (Smectic) ดังรูปที่ 2.14 (ข) และ (ค) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้างแบบนี้เมติก

(ข) โครงสร้างแบบ โครเรสเทอริก

(ค) โครงสร้างแบบสมเมติก

### 2.5.3 LCD แบบนีเมติกชนิดเกลียว

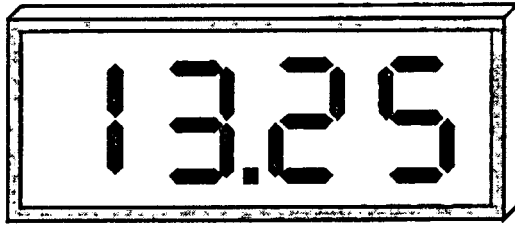
การทำงานของ LCD แบบนีเมติกชนิดเกลียว (Twisted Nematic; TN) โมเลกุลของผลึกจะถูกจัดโดยชั้นจัดระบบรับแสง ตำแหน่งของการรับแสงระหว่างแผ่นล่าง และแผ่นบนจะต่างกัน 90 องศา โมเลกุลของผลึกเหลวจะบิดเป็นเกลียวต่างกัน 90 องศา เมื่อแสงจากด้านล่างผ่านโมเลกุลของผลึกที่เป็นเกลียวขึ้นไปยังแผ่นบน จะทำให้ตำแหน่งของแสงหมุนไป 90 องศาด้วยปรากฏการณ์นี้เกิดจากคุณสมบัติแอนนิโซโทรปี (Anisotropy) ทางแสงของโมเลกุล ทำให้แสงลอดผ่านแผ่นโพลาริซซ์ออกไปได้

ถ้ามีแรงดันป้อนให้ตัวนำไฟฟ้าชนิดใส คุณสมบัติแอนนิโซโทรปีทางไฟฟ้าของโมเลกุลจะทำให้การวางตัวของโมเลกุลเปลี่ยนไป แสงจะผ่านผลึกเหลวด้วยทิศทางคงเดิม จึงไม่สามารถผ่านแผ่นโพลาริซซ์ด้านบนออกไปได้

เมื่อเราหยุดป้อนแรงดัน โมเลกุลก็จะเรียงตัวเหมือนเดิมอีกครั้ง แสงก็จะสามารถทะลุผ่านไปได้ การทำงานของ LCD แบบนี้เรียกว่า การแสดงผลเชิงบวก (Positive image display)

### ดังรูปที่ 2.15

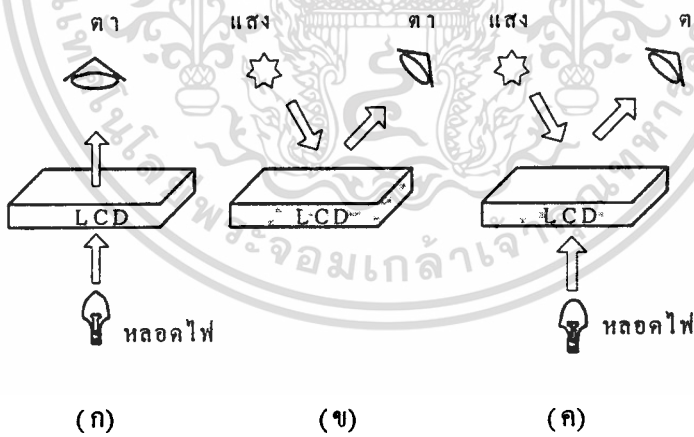
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การแสดงผลเชิงบวก

ถ้าวงแผ่นโพลาริซซีให้หมุนไปมากกว่า 90 องศา ผลที่เกิดขึ้นจะตรงข้ามกันคือ LCD จะมีคทึบเมื่อไม่มีแรงดันป้อน แต่จะเป็นแสงใเมื่อป้อนแรงดัน เรียกการทำงานแบบนี้ว่า การแสดงผลเชิงลบ (Negative image display)

#### 2.5.4 การแสดงผลแบบต่างๆ ของ LCD



รูปที่ 2.16 การแสดงผลของ LCD แบบต่าง ๆ

LCD สามารถแสดงผลให้เราเห็นได้โดยอาศัยหลักการ 3 แบบคือ

1. แบบสะท้อน (Reflective mode) จะมีสารประเภทโลหะเคลือบอยู่ที่แผ่นหลังของจอ LCD เช่น อลูมิเนียมฟอสฟอรัส จะทำการสะท้อนแสงจากภายนอกผ่านตัวแสดงผลไปยังตาของเรา แบบนี้เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีแสงสว่างเพียงพอข้อดีคือ ไม่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อป้อนให้กับหลอดไฟ (ดูรูปที่ 2.16 (ข))

2. แบบส่งผ่าน (Transmissive mode) นิยมใช้กับ LCD ที่มีการแสดงผลเชิงลบ โดยจะวางหลอดไฟเอาไว้ด้านหลัง (ดูรูปที่ 2.16 (ก))

3. แบบส่งผ่าน/สะท้อน (Transflective mode) เป็นการรวมการแสดงผลสองแบบเข้าด้วยกันตัวแสดงผลอ่านค่าได้จากการสะท้อนของแสงจากภายนอกและมีแสงส่องสว่างจากทางด้านหลังเมื่อต้องการอ่านค่าในที่มืด (ดูรูปที่ 2.16 (ค))

### 2.5.5 คุณสมบัติทางแสง

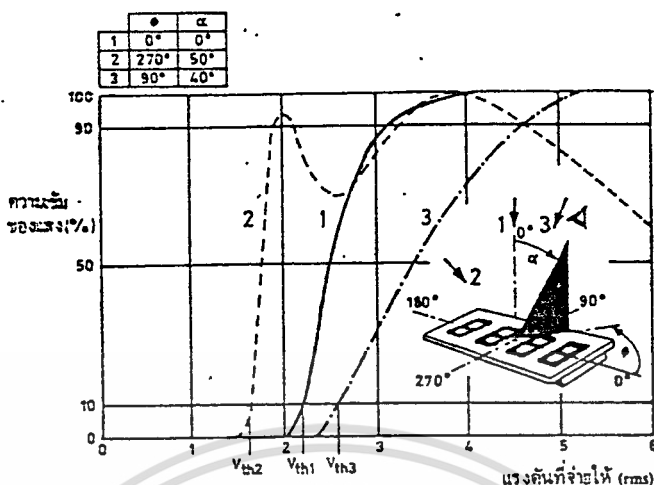
ความชัดเจนในการอ่านขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญ คือ ความสว่าง และความเข้มของแสงของ LCD เอง

ความเข้มของแสงหาได้จากความสว่างของบริเวณ ไรสีหารด้วยความสว่างของบริเวณที่มีสีทึบ ใน LCD แบบ TN อัตราส่วนความเข้มของแสงจะอยู่ในย่าน 5 ถึง 50 แต่อัตราส่วนความเข้มของแสงที่ตามนุษย์สามารถจับได้มีค่าประมาณ 10 และความชัดเจนอย่างน้อยที่สุดประมาณ 2 ในตัวแสดงผลแบบที่แสงส่องจากด้านหลังต้องมีอัตราส่วนความเข้มของแสงสูงเป็นพิเศษ เพราะเมื่อมองผ่านแสงที่สวนขึ้นมาตาของเราจะจับความเข้มได้น้อยลง

ทั้งความสว่างและความเข้มขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่น โพลารไรซ์ สำหรับตัวแสดงผลแบบสะท้อนเชิงบวก แผ่นโพลารไรซ์ประสิทธิภาพต่ำจะให้ความสว่างมากแต่ความเข้มน้อย ส่วนแผ่นโพลารไรซ์ประสิทธิภาพสูงจะให้ความเข้มสูงแต่ความสว่างลดลง

### 2.5.6 มุมมอง

จากรูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับแรงดันของมุมมองสามมุม ที่แรงดันต่ำมากๆ LCD ไม่สามารถแสดงผลได้ชัดเจนได้ เมื่อ  $\Phi$  คือมุมในแนวระดับของ LCD และ  $\alpha$  คือมุมที่อ้างอิงกับเส้นตั้งฉาก



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับความเข้มของแสงกับแรงดัน

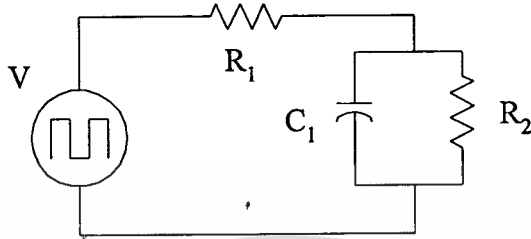
เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น มุมที่สามารถมองเห็นได้ก็จะสูงตาม (มุมเงยต่ำ) ดังเส้นกราฟเส้นที่สองหากแรงดันสูงขึ้นมุมเงยก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับแรงดันที่น้อยที่สุดที่พอจะทำให้มองเห็นชัดเจน (10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันสูงสุด) เรียกว่า แรงดันเทรชโฮล (Threshold voltage;  $V_{th}$ ) แรงดันที่มีค่าถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันสูงสุด เรียกว่า แรงดันอิ่มตัว (Saturation voltage;  $V_{sat}$ ) ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันกับค่าความเข้มของแสง จะเปลี่ยนไปตามส่วนผสมที่แตกต่างกันของผลึกเหลว อัตราส่วนผสมส่วนใหญ่จะมีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเป็นลบ ซึ่ง  $V_{th}$  จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

### 2.5.7 ความเร็วของการแสดงผล

เวลาตอบสนองการทำงานอยู่ในช่วง 50 ถึง 100 มิลลิวินาที (ในอุณหภูมิห้อง  $25^\circ\text{C}$ ) สิ่งสำคัญที่มีผลต่อช่วงเวลาการตอบสนอง คือ ความเหนียวของผลึกเหลว ซึ่งความเหนียว (Viscosity) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง เพราะโมเลกุลมีอิสระในการเคลื่อนที่น้อยลงทำให้การตอบสนองช้าลง

เวลาตอบสนองยังขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่จ่ายให้กับ LCD และ วิธีป้องกันแรงดันและความหนาแน่นของผลึกเหลวด้วย

## 2.5.8 การขับ LCD



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของ LCD

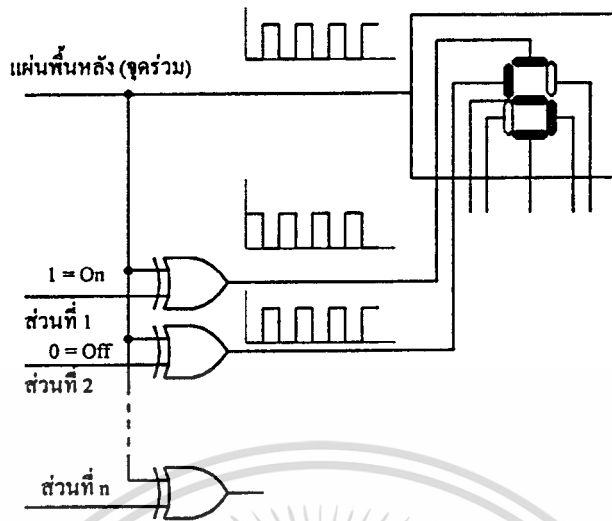
LCD แต่ละเซกเมนต์ สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าต่ำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งต่อขนานกับตัวต้านทาน  $R_2$  (มีค่าสูงกว่า  $R_1$ ) ค่าของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ปรากฏคร่อม LCD

ถ้าเราจ่ายแรงดันไฟตรงให้ LCD จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้น จึงต้องป้อนสัญญาณไฟสลับให้ด้วยกำลังงานไม่เกิน 100 มิลลิวัตต์ การแสดงผลจะได้จากค่า rms ที่จ่ายให้

ค่าความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปต้องไม่ต่ำกว่า 30 เฮิร์ตซ์ เพื่อป้องกันการกระพริบของตัวแสดงผล กระแสที่ใช้กันทั่วไปคือ 105 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรของแผ่น LCD กระแสที่ LCD ต้องการจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรง กับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปจำกัดสูงสุดของความถี่ถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางด้านการคับปลิง (Coupling) และผลของรีแลกซ์เซชัน (Relaxation effect) ซึ่งทำให้เกิดเงาในการแสดงผล

### ประเภทของการขับ LCD

1. การขับตรง จะมีการต่อแยกขับแต่ละเซกเมนต์ และขับแผ่นหลังหรือส่วนจตุรร่วมอีกหนึ่งจุด



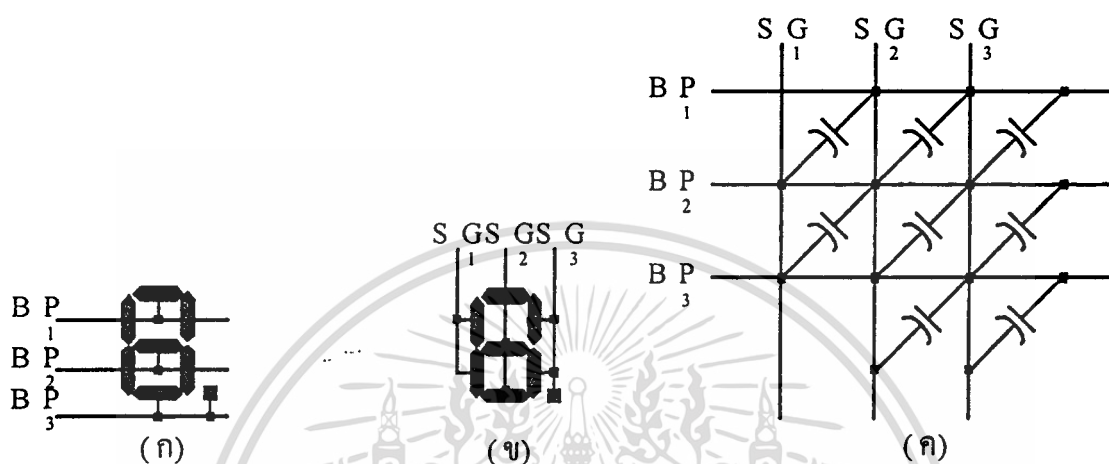
รูปที่ 2.19 การสลับเฟสของการขับโดยตรงโดยมี EXCLUSIVE OR GATE ควบคุมแรงดันส่งไปให้ส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าแผ่นหลังของ LCD จะถูกป้อนด้วยคลื่นสี่เหลี่ยมการเลือกเซกเมนต์ให้ทำงาน ทำได้โดยการส่งคลื่นรูปเดียวกันแต่กลับเฟสไปให้ส่วนนั้นๆ จะเกิดแรงดันตกคร่อม (ระหว่างเซกเมนต์นั้นกับจุดร่วม) ประมาณค่า rms ของรูปคลื่น ส่วนอื่นที่ไม่ได้เลือกก็จะป้อนสัญญาณเฟสเดียวกันกับแผ่นหลัง โดยที่สัญญาณที่ป้อนให้ต้องเป็นแบบสมมาตร เพื่อป้องกันการกระพริบของส่วนแสดงผล

ข้อดีของการขับแบบตรง คือ ใช้งานได้ในย่านอุณหภูมิกว้าง, มุมมองกว้าง, ตอบสนองเร็ว และความผิดพลาดน้อย แต่การใช้งานต้องต่อหลายจุด หากเป็นวงจรใหญ่ๆ แล้วจะมีความยุ่งยาก

**2.การขับแบบมัลติเพล็กซ์ (Multiplex drive)** การขับแบบนี้จะเหมาะกับภาคแสดงผลจำนวนมาก เช่นการต่อแบบดอตเมตริกซ์ (Dot matrix LCD) ขั้วของการขับแบบมัลติเพล็กซ์จะวางอยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ ภาคแสดงผลจะต่อกันเป็นกลุ่มๆ ส่วนแผ่นหลังจะแยกกันเป็นหลายจุดร่วม ดังนั้นแต่ละเซกเมนต์ในกลุ่มหนึ่งๆ จะมีจุดร่วมต่างกันอัตราส่วนของมัลติเพล็กซ์เขียน

อยู่ในรูปของ  $1:N$  โดยที่  $N$  คือจำนวนจุดร่วมของแผ่นหลัง หรือจำนวนของส่วนแสดงผลในแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 2.20 ตัวเลขหนึ่งตัวพร้อมทั้งจุดทศนิยม (8 ส่วน) โดยใช้มัลติเพล็กซ์ 1:3

จากรูปที่ 2.20 แสดงการต่อส่วนแสดงผล และแผ่นพื้นหลังด้วยการขับแบบมัลติเพล็กซ์ 1:3 จำนวนจุดต่อลดลงจาก 9 มาเป็น 6 ในรูปที่ 2.20 (ค) แสดงวงจรสมมูลย์ของแต่ละส่วนแทนด้วยตัวเก็บประจุ

อัตราส่วนมัลติเพล็กซ์	1:1	1:2	1:3	1:4	1:8
ความแตกต่างของ Von/Voff (rms)	$\infty$	2.24	1.92	1.73	1.45
จำนวนจุดต่อเมื่อใช้กับภาคแสดงผล 120 ส่วน	121	62	43	34	23

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนมัลติเพล็กซ์กับจำนวนจุดต่อ

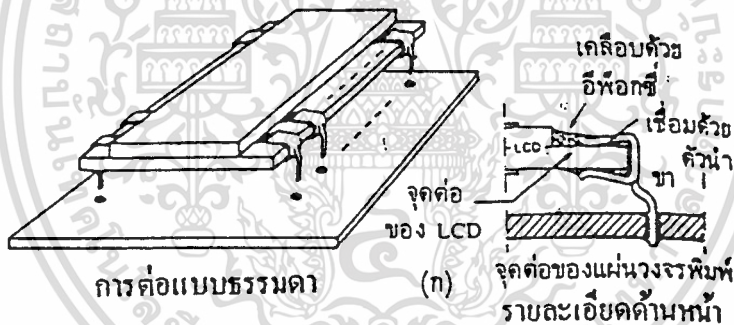
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 แสดงข้อได้เปรียบของการใช้วัสดุเพิลิกซ์ 1:2 จุดต่อจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง และจะได้อัตราส่วนของแรงดัน 2.24 ทำให้ได้ความคมชัดที่ดีมาก

### 2.5.9 เทคนิคการต่อใช้งาน LCD

วิธีการต่อใช้งานโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ คือ ต่อแบบธรรมดา, แบบแท่งตัวนำ และแบบฟอล์ย

การต่อแบบธรรมดามีลักษณะขาที่ยื่นออกมาจากตัวถังเหมือนขาไอซีโดยทั่วไปวิธีนี้สะดวกสำหรับ LCD ที่มีจุดต่อไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การต่อแบบธรรมดา

แบบแท่งตัวนำประกอบด้วยตัวนำสัญญาณไฟสลบ และส่วนที่เป็นฉนวน ทั้งสองสิ่งนี้คั่นอยู่ระหว่างตัว LCD กับแผ่นวงจรพิมพ์ การต่อแบบนี้จะต้องระวังให้ LCD มีแรงกดบนแท่งตัวนำให้พอเหมาะ (ดูรูปที่ 2.22)

### 2.5.10 หลักในการพิจารณาเลือกใช้ LCD

1. แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับลอจิก (ตั้งแต่  $V_{DD}-V_{SS}$ ) เป็นแรงดันสัญญาณลอจิกที่ถูกขับออกมาทางเอาต์พุตของชุดวงจรที่มีลักษณะเป็นลอจิก 0 และ 1 ที่ความถี่ 30-64 เฮิรตซ์ ระดับแรงดันลอจิกนี้จะมีค่าสูงสุดไม่เกิน +7 โวลต์

2. แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับ LCD คือ แรงดันที่จ่ายให้กับ LCD โดยตรงในกรณีที่ LCD นั้นเป็นแบบโมดูล (Module) (LCD ที่มีอุปกรณ์ขับเอาต์พุตอยู่แล้ว เพียงแค่ป้อนสัญญาณที่เป็นข้อมูลเข้าไปเท่านั้น) สำหรับ LCD โมดูลส่วนมากจะมีแรงดันขับที่แตกต่างกัน

3. แรงดันทางอินพุต คือ ค่าแรงดันทางอินพุตของ LCD จะมีค่าตั้งแต่ 0 โวลต์ จนถึง  $+V_{CC}$  (แรงดันไฟเลี้ยงวงจร)

4. ความละเอียดในการแสดงผล ถ้าเป็น LCD แบบเซกเมนต์ จะพิจารณาจำนวนหลักของการแสดงผล ซึ่งมาตรฐานหลักของ LCD แบบนี้จะมี 3 หลัก, 3.5 หลัก, 4 1/2 หลักเป็นต้น ถ้าหากเป็นแบบคอตเมตริกซ์โมดูล จะมีความละเอียดเป็นจำนวนคอตทางตั้ง หรือเป็นจำนวนคอตต่อพื้นที่การแสดงผลอักขระหนึ่งตัวว่ามีกี่คอต เช่น 5 x 7 คอต และพื้นที่ของแต่ละคอตจะมีขนาด กว้าง x ยาว มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และยังคงคำนึงถึงจำนวนการแสดงผลที่ตัวอักษรต่อบรรทัด และมีกี่บรรทัดในการแสดงผล

5. แหล่งจ่ายกระแสที่เป็นระดับลอจิก ส่วนมาก LCD ต้องการแรงดันในการทำงานประมาณ 5 โวลต์ เท่ากับระดับลอจิกจากไอซีขับแบบต่างๆ และบางครั้งต้องการไฟลบถึง -10 โวลต์ ในบางชนิดหรือบางรุ่น โดยกระแสที่ใช้งานมีค่าประมาณ 2-5 มิลลิแอมป์

6. ชนิดของ LCD โดยทั่วไปแล้ว LCD มีให้เลือกใช้อยู่หลายชนิด เช่น LCD ในตระกูลนีเมดิกดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มีให้เลือกใช้อยู่หลายแบบ เช่น แบบทีเกลียว (TN), แบบ Super TN หรือ STN, แบบ Double-Layer STN หรือ DSTN และแบบ Film compensation single-Layer STN หรือ FSTN

7. ลักษณะการแสดงผล เป็นคุณสมบัติที่กำหนดการเลือกใช้ LCD ว่าควรจะใช้ LCD ประเภทใดจึงจะเหมาะสมกับสภาพการใช้งานในลักษณะต่างๆ กัน โดยพิจารณาความเข้มของแสงสว่างของบริเวณที่จะใช้งาน

8. ขนาดของ LCD โมดูล ขนาดของโมดูลจะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลิตภัณฑ์ และพื้นที่ในการติดตั้งจอ LCD

## 2.6 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter)

การทำงานของไอซีตัวเดียว จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน และการประมวลผล เมื่อมีความจำเป็นต้องใช้งาน ไอซีตัวเดียรร่วมกับสัญญาณแอนะล็อก ต้องอาศัยกระบวนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลหรือใช้วงจรเอทวูดี เข้ามาช่วย โดยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปมีดังต่อไปนี้

### 2.6.1 วงจรแบบเปรียบเทียบขนานหรือแบบแฟลช

#### (Parallel Comparator Simultaneous “Flash” A/D Converter)

วงจรเอทวูดีแบบนี้ใช้หลักการง่ายๆ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่รวดเร็วที่สุด คือใช้วงจรเปรียบเทียบค่าขนานกันดังรูปที่ 2.24

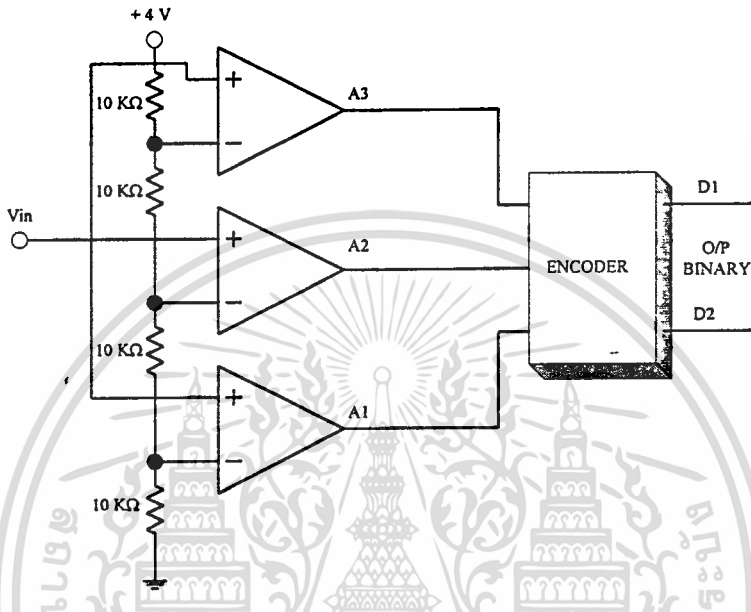
แรงดันอินพุต $V_{in}$ (โวลต์)	เอาต์พุตของ วงจรเปรียบเทียบ			เอาต์พุต เลขฐานสอง	
	A1	A2	A3	D1	D2
0 - 1	0	0	0	0	0
1 - 2	1	0	0	0	1
2 - 3	1	1	0	1	0
3 - 4	1	1	1	1	1

### ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตที่เป็นแอนะล็อกกับเอาต์พุตที่เป็นดิจิตอล

ในรูปที่ 2.24 ประกอบไปด้วยออปแอมป์ที่ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบ และตัวต้านทานที่ต่อเอาไว้เพื่อแบ่งแรงดันที่ขาอินพุตแบบกลับ (inverting) ให้มีขนาดต่างๆ กัน

จากหลักการของวงจรเปรียบเทียบต่างๆ ไป เมื่อแรงดันอินพุตที่ขาอินพุตแบบไม่กลับ (noninverting) มีค่าสูงกว่าที่ขาอินพุตแบบกลับ เอาต์พุตจะได้แรงดันค่าสูงดูจากตารางที่ 2.2

เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบที่ได้จะนำไปเข้ารหัสให้เป็นเลขฐานสองต่อไป จำนวนของวงจรเปรียบเทียบที่ต้องใช้ในวงจรขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณแอนะล็อกที่อินพุต



รูปที่ 2.24 การต่อวงจร parallel comparator A/D converter

เมื่อต้องการวงจรที่มีความละเอียดสูงขึ้น จำเป็นต้องใช้วงจรเปรียบเทียบเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าต้องการความละเอียด 3 บิต ต้องใช้วงจรเปรียบเทียบ 7 ตัว ความละเอียด 4 บิต ต้องใช้วงจรเปรียบเทียบ 15 ตัว (16 ระดับ) โดยหาจำนวนวงจรเปรียบเทียบได้จาก  $2^N - 1$  เมื่อ N แทนจำนวนบิตหรือความละเอียดที่ต้องการ

จะเห็นว่าที่ความละเอียด 8 บิต ต้องใช้มากถึง 255 ตัว ซึ่งเป็นข้อเสียของวงจรเอ-ทูติแบบนี้ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เอาต์พุตที่ไม่ได้เป็นเลขฐานสอง ต้องมีวงจรเพิ่มเติมไปทำการเข้ารหัส ข้อดีของวงจรเอทูติแบบนี้คือ ความเร็วสูงมาก จึงเรียกววงจรแบบนี้ว่าแบบแฟลช (Flash type A/D converter) วงจรเอทูติชนิดนี้ใช้เวลาในการแปลงได้เร็วมากเป็นนาโนวินาที

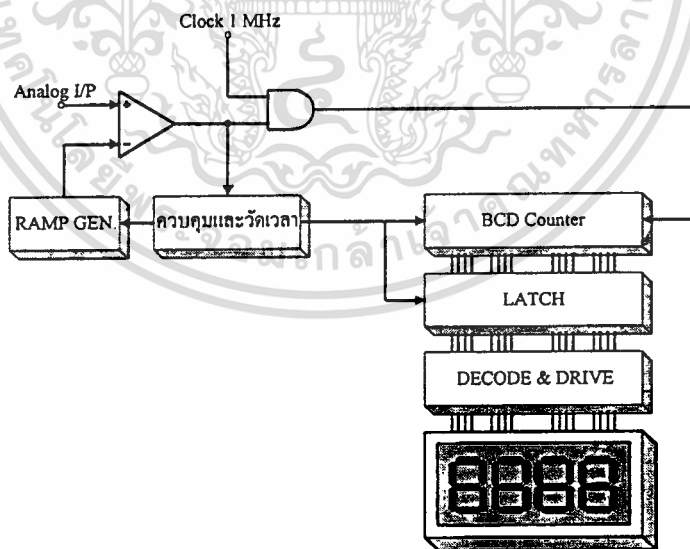
## 2.6.2 วงจรเอทูดิจิที่ใช้ในการอินทิเกรต (Integrate A/D Circuits)

วงจรเปลี่ยนสัญญาณเอทูดิจิที่ใช้เทคนิคการอินทิเกรตสัญญาณมี 4 แบบ คือ

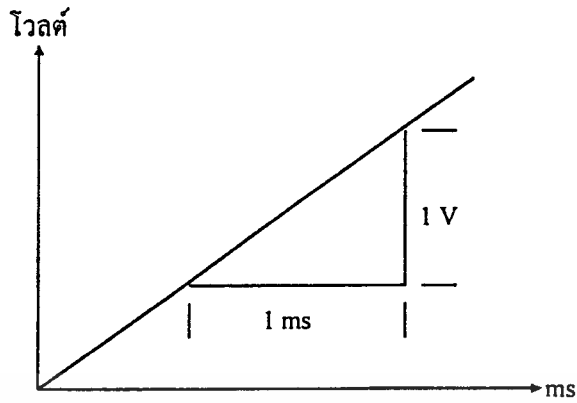
### 1. แบบสโลปเดียว หรือแบบรแอมป์ ( Single Ramp หรือ Single Slope A/D Converter)

วงจรเอทูดิจิแบบนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.25 ประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณรแอมป์, วงจรนับ BCD หรือนับเลขฐานสอง

เมื่อเริ่มทำการเปลี่ยนสัญญาณ สัญญาณรแอมป์ และวงจรมนับจะถูกปรับให้เป็นศูนย์แรงดันแอนะล็อกถูกป้อนไปยังวงจรเปรียบเทียบ ทางขาอินพุตแบบไม่กลับ เมื่อแรงดันอินพุตที่ขานี้เป็นบวกมากกว่าที่ขาอินพุตแบบกลับ วงจรเปรียบเทียบก็จะให้เอาต์พุตเป็นระดับ “1” ทำให้แอนค้เกต ปล่อยสัญญาณนาฬิกาผ่านไปยังวงจรมนับได้ และทำให้สัญญาณรแอมป์มีแรงดันเป็นบวกขึ้นเรื่อยๆ จนมากกว่าระดับแรงดันอินพุต เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบก็จะตกลงมาเป็นระดับ “0” ปิดแอนค้เกต ไม่มีสัญญาณผ่านไปให้วงจรมนับ วงจรมนับจะหยุดนับ และเก็บค่าไว้ที่วงจรมแลตช์ จากนั้น จึงทำการปรับวงจรมนับและวงจรมกำเนิดสัญญาณรแอมป์



รูปที่ 2.25 ผังการทำงานของวงจรเปลี่ยนสัญญาณเอทูดิจิแบบสโลปเดียว



รูปที่ 2.26 ความชันของสัญญาณแรมป์

วงจรในลักษณะนี้มักนำไปใช้งานในการเปลี่ยนเวลาเป็นขนาดของสัญญาณ (Time to Amplitude Conversion) หรืออาจใช้ในดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ แต่ไม่ใช่กับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงในแหล่งกำเนิดสัญญาณแรมป์ขึ้นกับอุณหภูมิ และผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต ทำให้ไม่มีความคงที่ ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นกลายเป็นแบบสโลปคู่ (Dual-slope)

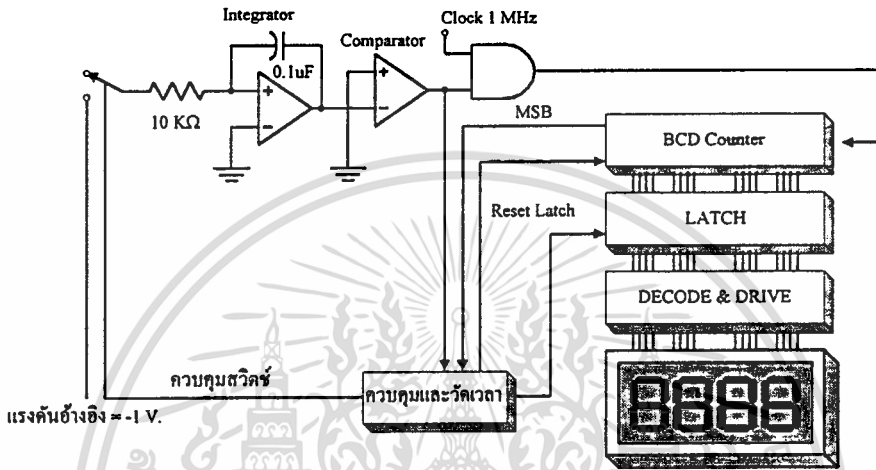
## 2. แบบสโลปคู่ (Dual-Slope A/D converter)

จากรูปที่ 2.27 แสดงผังงานของวงจรเอชดีแบบสโลปคู่ วงจรส่วนใหญ่คล้ายกับแบบสโลปเดี่ยว ซึ่งมีสวิตช์ที่อินพุตเพิ่มขึ้น เพื่อทำการเลือกกระแวงแรงดันอินพุตกับแรงดันอ้างอิง (วงจรเปรียบเทียบกับขาสัญญาณอินพุตกลับกันกับแบบสโลปเดี่ยว)

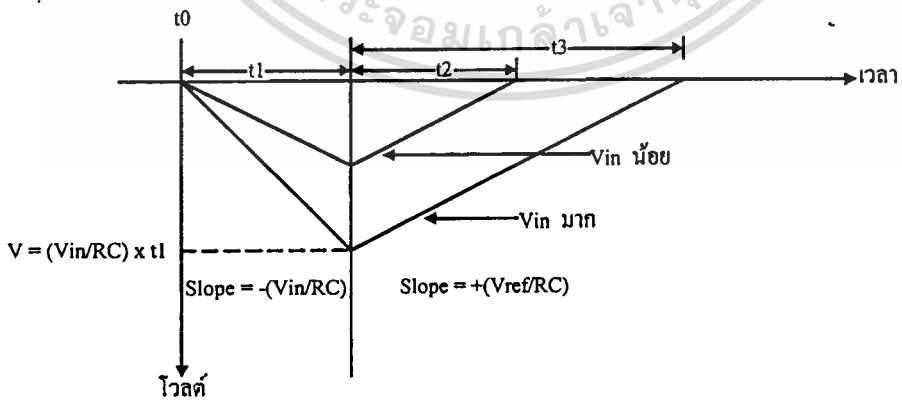
ส่วนแรกของวงจร คือ วงจรกำเนิดสัญญาณแรมป์หรือวงจรอินทิเกรเตอร์ที่อินพุตแบบกลับของออปแอมป์มีสภาพเป็นกราวด์เทียม (Virtual ground) ถ้ามีแรงดันอินพุต 2 โวลต์ จะได้กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ไปยังจุดรวม (Summing point)

เนื่องจากค่าความต้านทานอินพุตของออปแอมป์สูงมาก กระแสที่ไหลจึงเกิดขึ้นผ่านตัวเก็บประจุ ขณะที่ตัวเก็บประจุทำการเก็บประจุ แรงดันที่เอาต์พุตของออปแอมป์ก็จะยิ่งเป็นลบมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรักษาระดับกระแสให้คงที่ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงเกิดเป็นสัญญาณแรมป์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear ramp)

ถ้าแรงดันอินพุตเป็นบวก วงจรอินทิเกรเตอร์ก็จะให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณแรมปีทางลบดังแสดงไว้ในช่วง  $t_1$  รูปที่ 2.28 หากแรงดันอินพุตเป็นลบก็จะทำให้อาต์พุตได้แรมปีทางบวก



รูปที่ 2.27 ฟังก์ชันการทำงานของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 2.28 เอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 2.27 เมื่อสวิตช์ต่อกับสัญญาณอินพุตจะทำให้มีแรงดันบวกจากอินพุตป้อนเข้าสู่วงจรอินทิเกรเตอร์ ได้เอาต์พุตออกมาเป็นแรมป์ทางลบ วงจรเปรียบเทียบกับก็จะได้แรงดันลบจากวงจรอินทิเกรเตอร์ แล้วให้เอาต์พุตเป็นบวกทำการเปิดแอนด์เกตให้สัญญาณนาฬิกาผ่านเข้าไปสู่วงจรมับ วงจรมับจะนับไปยังค่าที่กำหนดไว้คงที่ ( $t_1$ ) แล้วทำการสับสวิตช์ต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิง ในช่วงที่วงจรมับด้วยค่าคงที่นั้น วงจรอินทิเกรเตอร์จะให้สัญญาณแรมป์ทางลบที่มีค่าได้สูงสุดตามแต่ละระดับแรงดันอินพุต เมื่อทำการสวิตช์อินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ให้ไปที่ค่าแรงดันอ้างอิงค่าลบ เอาต์พุตของวงจรจึงได้เป็นแรมป์ทางบวกคือช่วง  $t_2$  รูปที่ 2.28 พร้อมๆ กับปรับค่าของวงจรมับลงเป็นศูนย์เพื่อเริ่มนับใหม่

เมื่อเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์เพิ่มขึ้นถึงศูนย์อีกครั้ง เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบกับก็จะเป็นลบ (หรือเป็นศูนย์) วงจรควบคุมจับการเปลี่ยนแปลงอันนี้ได้ก็ส่งสัญญาณสตอปให้วงจรมับเก็บค่าที่ได้ไว้ที่วงจรถ่าย จากนั้น จึงปรับให้เป็นศูนย์ แล้วทำการสวิตช์ให้อินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อกับแรงดันอินพุต ซึ่งเป็นการเริ่มเปลี่ยนสัญญาณอีกรอบหนึ่ง จำนวนที่นับได้ที่เก็บไว้ในวงจรถ่ายก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันอินพุต Vin

ข้อดีของวงจรเปลี่ยนสัญญาณแบบสโโลปคู่ คือ ความถูกต้องสูง, ราคาถูก, สถิติรภาพทางด้านอุณหภูมิ ข้อเสียคือ ความเร็วต่ำ ในการเปลี่ยนสัญญาณ 1 ครั้งใช้เวลาถึง 100 มิลลิวินาที (ในขณะที่แบบเฟลซ ใช้เวลาประมาณ 30 นาโนวินาที)

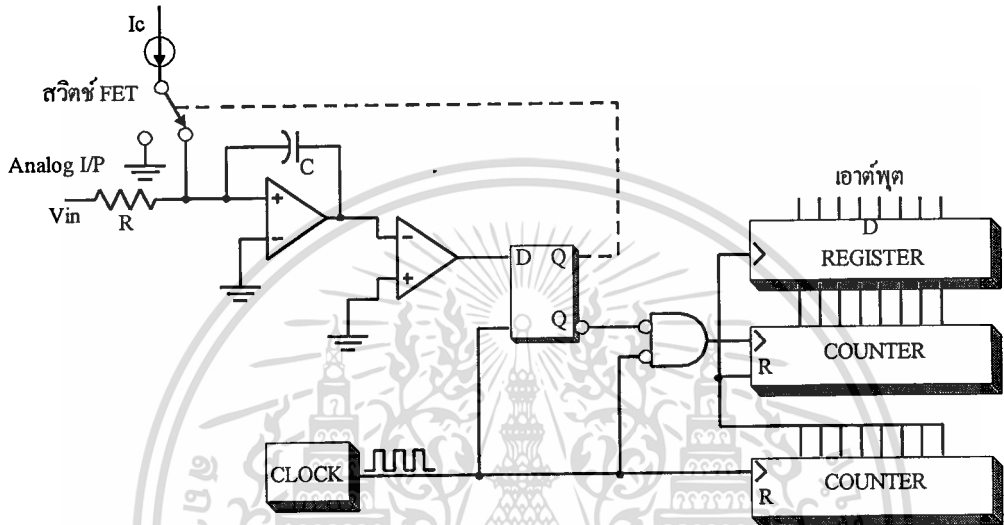
### 3. แบบชาร์จบาลานซ์ (Charge Balance A/D Converter)

วงจรเปลี่ยนสัญญาณเอาต์พุต แบบชาร์จบาลานซ์ ใช้วงจรสำคัญคล้ายกับแบบสโโลปคู่แต่แทนที่จะให้อินพุตสวิตช์ไปมาระหว่างแรงดันที่ไม่รู้ค่ากับแรงดันอ้างอิง ก็ทำการแทรกพัลส์ของกระแสอ้างอิงมาตรงๆ ที่จุดรวมของวงจรอินทิเกรเตอร์ในช่วงเวลาที่คงที่ โดยที่จำนวนของพัลส์จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับแรงดันอินพุตที่ไม่รู้ค่า ประโยชน์ของเทคนิคนี้ คือ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าใกล้เคียง 0 โวลต์ ดังนั้น จึงทำให้ไม่เกิดความผิดพลาดจากผลของกระแสรั่วไหล เอกลักษณ์นี้จึงมีความถูกต้องสูงกว่าแบบสโโลปคู่

### 4. แบบเดลต้า-ซิกมา (Delta-Sigma A/D Converters)

จากวงจรรูปที่ 2.29 เมื่อมีแรงดันอินพุตป้อนเข้าไปที่วงจรอินทิเกรเตอร์ จะให้เอาต์พุตไปเข้าวงจรเปรียบเทียบกับ เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันคงที่ (จากรูปคือ กราวด์) พัลส์ของกระแสที่ได้ขึ้นอยู่กับเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบกับ โดยสวิตช์ที่ทำงานจากเฟด (FET) จะควบคุมให้

กระแสเข้าไปยังที่จู่รวมหรือลงกราวด์ไป ส่วนวงจรนับจะนับจำนวนพัลส์ด้วยหลักการที่คล้ายกัน



รูปที่ 2.29 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบเคลตา-ซิกม่า

**ข้อสรุปของเอทูดิแบบอินทีเกรตสัญญาณ**

จุดสำคัญของเทคนิคอินทีเกรตติ้ง คือ อินพุตที่ให้กับวงจรอินทีเกรเตอร์ต้องเป็นกระแส ไอซีคอนเวอร์เตอร์บางตัวอาจมีอินพุตให้สองขา แต่จะมีขาหนึ่งต่อตรงกับจุดใช้กับอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสโดยตรง ถ้าให้อินพุตเป็นกระแส ก็ไม่ต้องคำนึงถึงแรงดันออฟเซตของวงจรอินทีเกรเตอร์ แต่ถ้าหากใช้กับอินพุตที่เป็นแรงดัน (ที่ต้องมีตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่เพื่อให้ได้เป็นกระแส) ต้องปรับออฟเซตของออฟแอมป์เสียก่อน

การใช้อินพุตเป็นกระแสทำให้ย่านการใช้งานไฟสลับกว้าง

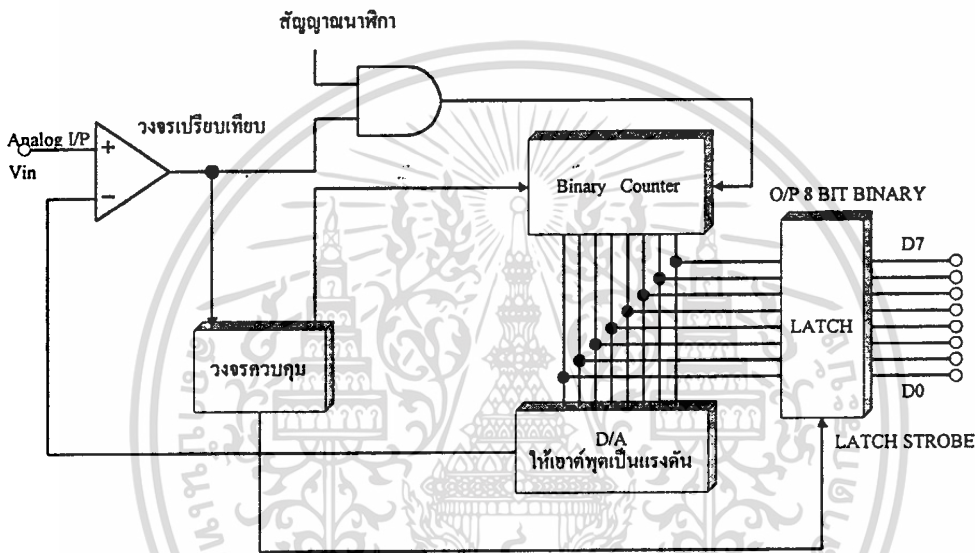
ไอซีแบบซาร์จบาลานซ์มักประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อยู่ด้วย ดังนั้น ถ้าหากต้องการเอาต์พุตเป็นความถี่ก็สามารถเลือกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.3 วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกที่ใช้วงจรรนับ และวงจรดิจิทัลประกอบกัน

### 1. แบบวงจรรนับเดียว (Single-Counter)

สัญญาณแรมป์เชิงเส้น อาจประกอบขึ้นด้วยสัญญาณขั้นบันไดเล็กๆ จำนวนมากที่เกิดจากการต่อเอาต์พุตของวงจรรนับเข้ากับวงจรแปลงดิจิทัล ขนาดของขั้นบันไดแต่ละขั้นขึ้นอยู่กับจำนวนบิตหรือความละเอียดของวงจรเอชดีนั้นๆ



รูปที่ 2.30 วงจรเอชดีแบบวงจรรนับเดียวที่สร้างโดยวงจรรนับขึ้น และวงจรดิจิทัล

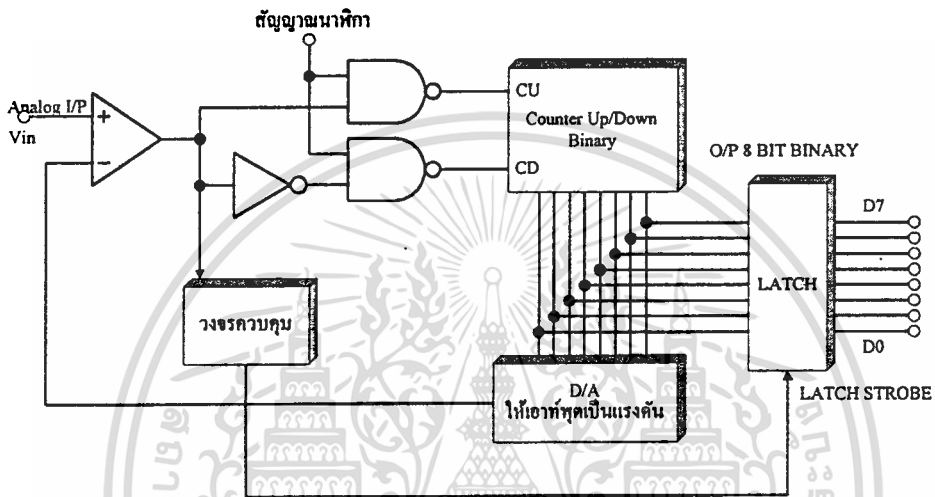
ในรูปที่ 2.30 แสดงการกำเนิดสัญญาณแรมป์เดียวด้วยวงจรรนับ และวงจรดิจิทัล (แทนวงจรอินทิเกรเตอร์) เมื่อเริ่มแปลงสัญญาณวงจรรนับจะถูกรับ เอาต์พุตของวงจรดิจิทัลมีระดับ 0 เมื่อแรงดันถูกป้อนเข้าไปยังอินพุตของวงจรเปรียบเทียบ เอาต์พุตก็จะขึ้นสู่ระดับ 1 และเปิดสัญญาณนาฬิกาไปสู่วงจรรนับ แต่ละพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา ทำให้เกิดการนับและเพิ่มแรงดันขึ้นหนึ่งขั้น

เมื่อเอาต์พุตของดิจิทัลมีค่ามากกว่าอินพุต  $V_{in}$  เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบก็จะกลายเป็น 0 ทำให้สัญญาณนาฬิกาไม่อาจผ่านไปยังวงจรรนับได้ ดังนั้น วงจรควบคุมจะทำการแลตช์เอาต์พุตของวงจรรนับ และปรับวงจรรนับให้เริ่มรอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แบบแทร็กกิ้ง (Tracking A/D Converter)

การทำงานของวงจรจะคล้ายกับแบบใช้วงจรมับเดียว แต่การนับจะไม่ได้เริ่มจากศูนย์ แต่จะทำการนับขึ้น หรือนับลงจากค่าล่าสุดไปยังค่าใหม่ แล้วแต่ว่าแรงดันอินพุตในรอบใหม่มีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่แล้ว ข้อดีของเอชดีแบบแทร็กกิ้ง คือ ทำงานได้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.31 วงจรเอชดีที่สร้างขึ้นจากวงจรมับขึ้น/ลง และวงจรดีทิวเอ

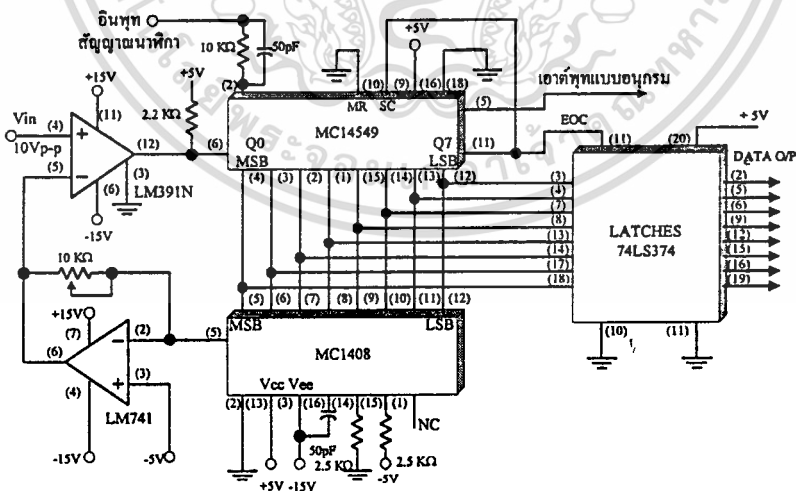
## 3. วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบใช้การประมาณค่า (Successive Approximation A/D Converter)

วงจรเอชดีแบบนี้ มีข้อได้เปรียบทางด้านความละเอียด เพราะมีความละเอียดเป็น  $n$  บิต สามารถกำหนดได้จากสัญญาณนาฬิกา  $n$  ลูก ตัวอย่างเช่น วงจรแปลงขนาด 8 บิต ต้องการพัลส์ของสัญญาณนาฬิกาเพียง 8 ลูก ในขณะที่แบบใช้วงจรมับต้องใช้พัลส์ถึง 256 ลูก วงจร SA (Successive-Approximation) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.28 สิ่งที่สำคัญของวงจรคือ successive-approximation -register (SAR) เช่น เบอร์ MC14549 มีการทำงานดังต่อไปนี้

เมื่อเริ่มทำการเปลี่ยน ญาณพัลส์ลูกแรกจะทำการส่งบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (MSB) ไปยังดีทิวเอเบอร์ MC1408 โดย SAR จะรอสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบ LM319 ซึ่งทำการ

ตรวจสอบว่า เอาต์พุตของวงจรถีทูเอามากกว่า หรือน้อยกว่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ถ้าเอาต์พุตของวงจรถือเปรียบเทียบกับมีระดับ “1” เอาต์พุตของดิททูเอจึงต่ำกว่า  $V_{in}$  SAR จะทำการเก็บบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดไว้ ถ้าเอาต์พุตของวงจรถือเปรียบเทียบกับเป็นระดับ “0” เอาต์พุตของดิททูเอจึงมากกว่า  $V_{in}$  SAR จะทำการทำบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดนั้น พัลส์ลูกต่อมาจะทำงานเช่นเดียวกัน โดยบิตที่ได้ คือ บิตที่มีนัยสำคัญรองลงมา SAR จะทำงานแบบนี้ไปจนถึงบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB) แต่ละบิตจะใช้สัญญาณนาฬิกาเพียงลูกเดียว เมื่อครบทุกบิตแล้ว SAR ก็จะทำการส่งสัญญาณ EOC (End of Conversion) ออกไปสัญญาณ EOC เป็นตัวบอกว่าสายสัญญาณเอาต์พุตที่ขนานกันมาทุกเส้นมีข้อมูลดิจิทัลของสัญญาณอินพุตครบถ้วนแล้ว ถ้าสัญญาณ EOC ถูกต่อไปยังอินพุตที่เป็นจุดเริ่มการเปลี่ยนสัญญาณ การเปลี่ยนสัญญาณจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง MC14549 ยังสามารถส่งเอาต์พุตดิจิทัลแบบอนุกรมได้อีกด้วยขึ้นอยู่กับการควบคุมของ SAR

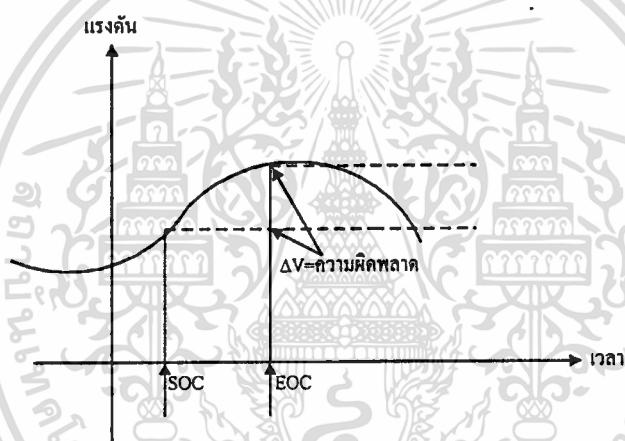
วงจรรูปที่ 2.32 ใช้แรงดันอินพุตสูงสุด  $\pm 5$  โวลต์ อินพุตแบบไม่กลับของออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน (Current to voltage converter) ต่อเข้ากับ  $-5$  โวลต์ แทนที่จะต่อลงกราวด์เป็นการยกระดับแรงดันแอนะล็อกจาก  $-5$  โวลต์ ถึง  $+5$  โวลต์ แทน  $0$  ถึง  $10$  โวลต์ สัญญาณไฟสลับรูปขานจึงสามารถต่อโดยตรงเข้ากับอินพุตของเอททูเอตัวนี้ได้ วงจรแปลงเอททูเอชนิดนี้มีความเร็วสูงและความละเอียดสูง จึงเป็นวงจรมานำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.32 วงจรเปลี่ยนสัญญาณเอททูเอแบบ Successive Approximation

## 2.6.4 การสุ่มและการคงค่า (Sample and Holds)

วงจรเอชดีต้องการเวลาในการแปลงสัญญาณ หรือเรียกว่า conversion time เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่เหมาะสม ถ้าสัญญาณแอนะล็อกมีการเปลี่ยนแปลง ในระหว่างช่วงเวลาการแปลงเอาต์พุตของวงจรเปลี่ยนสัญญาณ อาจเกิดความผิดพลาด จึงต้องมีการป้องกันด้วยวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (sample and hold) เพื่อใช้จับสัญญาณแอนะล็อกที่จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนสัญญาณ แล้วเก็บไว้ในตัวเก็บประจุระหว่างช่วงเวลาการแปลง หลังจากที่มีการเปลี่ยนสัญญาณเสร็จสิ้น จึงจับสัญญาณแอนะล็อกค่าใหม่มาเก็บไว้อีกครั้งเป็นเช่นนี้ต่อไป เราจึงมักได้พบเห็นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณปรากฏอยู่กับวงจรเอชดีอยู่เสมอ



รูปที่ 2.33 ความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณแอนะล็อกทางอินพุตเปลี่ยนแปลง

## 2.6.5 การป้องกันความผิดพลาดจากสัญญาณแอนะล็อกของอินพุตวงจร A/D

ในกระบวนการทำงานส่วนใหญ่ของคอมพิวเตอร์ จะใช้การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเสียส่วนมาก เพื่อใช้ในการควบคุม, การบันทึก และการแสดงผล เป็นต้น ซึ่งในการทำงานอาจมีความผิดพลาดขึ้นได้ เนื่องจากสัญญาณแอนะล็อกที่อินพุตไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ และมีสัญญาณรบกวนรวมทั้งแรงดันไฟป้อนที่ไม่คงที่ ฉะนั้น จึงต้องมีการสร้างวงจรไว้ป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ หรือที่เกิดขึ้นแล้ว เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเป็นผลตามมาจากการทำงานที่ผิดพลาดนั้น ต้องมีการป้องกันความผิดพลาดเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขั้นพื้นฐานนั้นมีลักษณะวงจรอยู่ 2 แบบคือ แบบรับแรงดันไฟป้อนเดี่ยว (Monopolar) คือ วงจรสามารถทำงานได้กับแรงดันด้านบวกหรือด้านลบเพียงด้านเดียวเท่านั้น เช่น วงจรทำงานในช่วง 0 ถึง 2.55 โวลต์

แบบรับแรงดันไฟป้อนคู่ (Bi-polar) คือ วงจรที่ต้องการแรงดันไฟป้อนแบบบวก, ลบ และกราวด์ เป็นแรงดันทางด้านบวกและลบที่มีค่าแรงดันเท่ากัน เช่น วงจรจะทำงานในช่วง -2.56 ถึง +2.56 โวลต์ (-2.56, 0, +2.56 โวลต์)

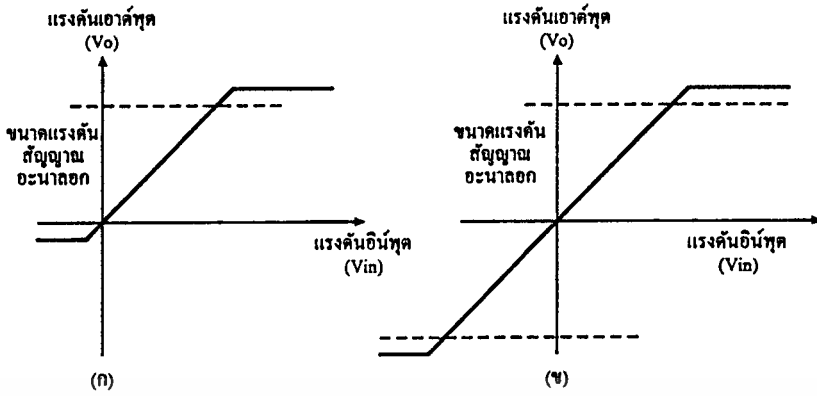
### 1. การยกระดับ หรือการเคลมปลิงแรงดันด้วยไดโอด

โดยทั่วไปแล้วตามทฤษฎีในทางอุดมคติ อาจกำหนดช่วงของแรงดันอินพุตได้ต่ำลงอีกถึง 0.3 โวลต์ ของแหล่งจ่ายแรงดันเดิม ( $V_{CC}$ ) เช่น ที่แหล่งจ่ายไฟเดี่ยว +5 โวลต์ จะสามารถกำหนดขนาดแรงดันทางอินพุตตามทฤษฎีอุดมคติได้ต่ำสุดตั้งแต่ -0.3 โวลต์ จนถึง +5 โวลต์ และถ้าเป็นแบบแหล่งจ่ายไฟคู่  $\pm 5$  โวลต์ จะกำหนดแรงดันอินพุตได้ต่ำสุดตั้งแต่ -5.3 ถึง +5 โวลต์ ซึ่งช่วงแรงดันอินพุตที่กำหนดขึ้นทั้งสองแบบในอุดมคตินี้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.34 การออกแบบวงจรป้องกันจะสืบเนื่องไปถึงการพิจารณาเลือกชนิดของแหล่งจ่ายแรงดันด้วย แต่จะใช้แบบไหนก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และวงจรที่ต่อใช้งานร่วม

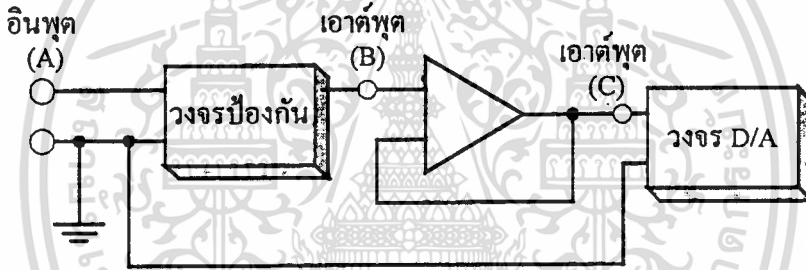
รูปที่ 2.34 เป็นคุณสมบัติของวงจรป้องกันทางอุดมคติ ซึ่งจะทำให้กราฟของแรงดันทางอินพุตที่ระดับ -0.3 จนถึง +5 โวลต์ ( $+V_{CC}$ ) โดยในรูปที่ 2.34 เป็นคุณสมบัติของวงจรป้องกันทางอุดมคติ ซึ่งจะทำให้กราฟของแรงดันทางอินพุตที่ระดับ -0.3 จนถึง +5 โวลต์ ( $+V_{CC}$ ) ซึ่งในรูปที่ 2.34 (ก) เป็นของแรงดันไฟป้อนเดี่ยว ส่วนรูปที่ 2.34 (ข) เป็นของแรงดันไฟป้อนคู่ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเคลมปลิงแรงดันที่นอกเหนือ หรือเหนือจากความต้องการของอินพุต

จากรูปที่ 2.35 แสดงวิธีการป้องกันความผิดพลาดของสัญญาณแอนะล็อกที่อินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลนั้น โดยใช้โอปแอมป์ต่อเป็นวงจรขยายแรงดันตาม (Voltage follower) เปรียบเสมือนเป็นวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ระหว่างวงจรป้องกันทางอินพุตกับวงจรแปลงสัญญาณ A/D สัญญาณที่ปรากฏตรงอินพุตที่จุด A จะผ่านวงจรป้องกัน และวงจรบัฟเฟอร์ไปปรากฏที่จุด C ดังแสดงในวงจรรูปที่ 2.35 การป้องกันความผิดพลาดจะเกิดผลมากที่สุด ถ้าวงจรขยายแรงดันตามที่ใช้เป็นบัฟเฟอร์ของวงจรแปลงสัญญาณ A/D ใช้แหล่งจ่ายชนิดเดียวกันกับวงจรแปลงสัญญาณนี้ ซึ่งเป็นชนิดใดก็ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟที่ใช้ป้อนวงจรแปลงสัญญาณ

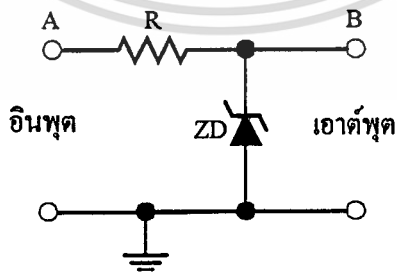
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 รูปสัญญาณที่เกิดจากการแคลมป์แรงดันอินพุตในอุดมคติ



รูปที่ 2.35 ผังการทำงานการจัดส่วนป้องกันทางอินพุต



รูปที่ 2.36 วงจรป้องกันอย่างง่าย โดยการใช้ซีเนอร์ไดโอดแคลมป์แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.36 แสดงวงจรอย่างง่ายสำหรับการป้องกัน ซึ่งยังเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพการป้องกันต่ำอยู่ จากวงจรจะเห็นว่า การต่อซีเนอร์ไดโอดเหมือนกับการต่อไบอัสกลับ (Revers bias) ของไดโอด ถ้าแรงดันอินพุตมากกว่าค่าแรงดันซีเนอร์ของไดโอดจะทำให้ซีเนอร์ไดโอดนำกระแส เพื่อเป็นการป้องกันแรงดันเกินที่อินพุต แต่ถ้าแรงดันที่อินพุตอยู่ในช่วงของค่าแรงดันซีเนอร์ของซีเนอร์ไดโอด ก็จะไม่มีการนำกระแสไหลผ่านตัวซีเนอร์ไดโอดจึงยังไม่ถูกลดทอนลง ความแตกต่างระหว่างแรงดันอินพุตกับค่าแรงดันซีเนอร์ไดโอดจะเท่ากับ  $V_i - V_z$  และจะเกิดการตกคร่อมที่ค่าความต้านทาน (R) ซึ่งค่าแรงดันที่ผ่านอินพุตได้โดยยังไม่เกิดการลดทอนสูงสุดเท่ากับ

$$V_i \max = V_z + \sqrt{PR}$$

เมื่อ  $V_z$  คือค่าแรงดันของซีเนอร์ไดโอด (โวลต์)

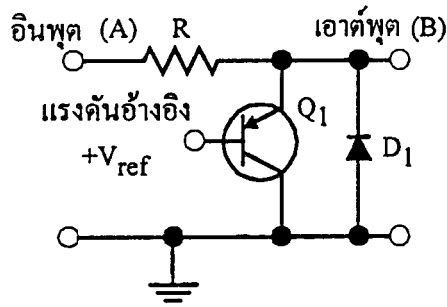
R คือค่าความต้านทานในวงจร (โอห์ม)

P คือขนาดของกำลังวัตต์ของตัวต้านทาน (วัตต์)

สำหรับแรงดันอินพุตที่เป็นค่าลบนั้น จะทำให้ซีเนอร์ไดโอด นำกระแสที่ประมาณ 0.4 โวลต์ ถ้าแรงดันอินพุตเป็นค่าแรงดันลบมากก็จะทำให้กระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมาก เป็นผลให้ซีเนอร์ไดโอดจะเริ่มเข้าสู่จุดทำงาน และเกิดการแคลมป์ลิ่งขึ้น (Saturate clamping) เป็นผลให้ที่จุด B มีแรงดันตกคร่อมอยู่ประมาณ -0.7 โวลต์ จากทฤษฎีตรงจุดนี้ จะเห็นว่าการทำงานเช่นนี้เหมาะสำหรับวงจรแปลงสัญญาณ A/D ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟป้อนคู่ แต่ไม่เหมาะกับวงจรที่ใช้ไฟป้อนเดี่ยว

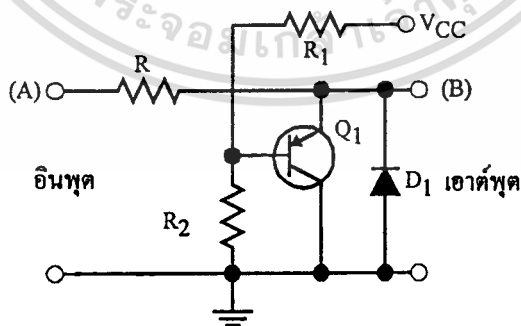
## 2. แคลมป์ลิ่งแรงดันด้วยทรานซิสเตอร์

การปรับปรุงโดยเอาทรานซิสเตอร์มาทำหน้าที่แคลมป์ลิ่งแรงดันนั้น ส่วนใหญ่จะจัดวงจรการทำงานแบบอิมิตเตอร์ตาม (Emitter follower) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 เป็นการต่อทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ร่วมกับไดโอดและตัวต้านทาน เมื่อมีแรงดันมาตกคร่อมตัวต้านทาน (R) โดยมีขาอิมิตเตอร์เป็นโพล ดังนั้น ทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถนำกระแสได้จนกว่าจะได้รับไบอัสตรง (Forward bias) ระหว่างรอยต่อขาเบส-อิมิตเตอร์ ทรานซิสเตอร์จะเริ่มนำกระแสได้ก็ต่อเมื่อแรงดันที่ขาเบสอิมิตเตอร์มีค่าสูงกว่า 0.4 โวลต์ (แรงดัน  $V_{ref}$  มีค่าสูง ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $V_{be}$  เกินกว่า 0.4 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จึงจะนำกระแส)



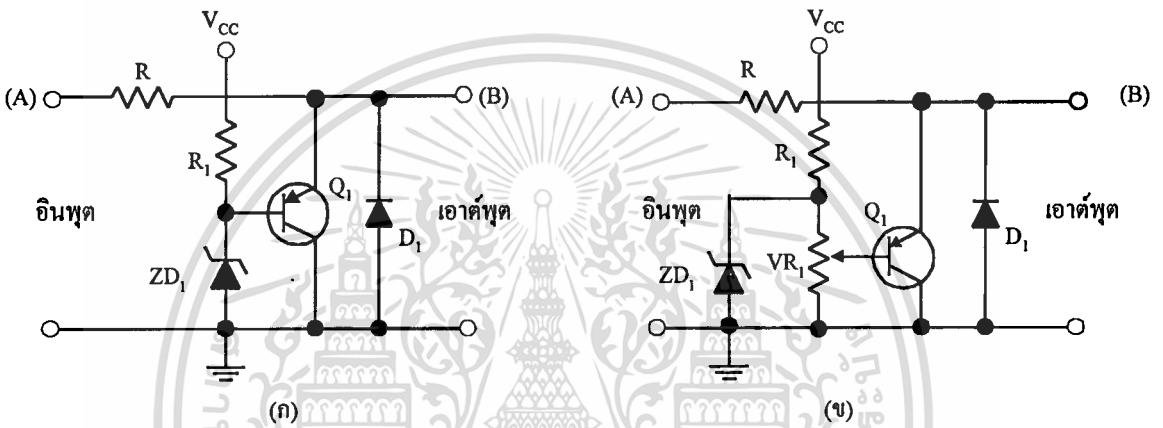
รูปที่ 2.37 การต่อทรานซิสเตอร์อิมิตเตอร์ตามแทนซีเนอร์ไดโอด

ดังนั้น แรงดันอินพุตที่มีค่าระหว่างศูนย์โวลต์ถึงแรงดันอ้างอิง  $V_{ref} + 0.4$  โวลต์ จะเป็นแรงดันที่จุด B ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงแรงดันจากจุด A และจะถูกแคลมป์ไว้ที่ค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  บวกกับแรงดันที่ขาเบส-อิมิตเตอร์ เมื่อ  $V_{bc}$  เพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.7 โวลต์ กระแสรวมที่ขาอิมิตเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามด้วย ไดโอด  $D_1$  ทำหน้าที่ป้องกันเมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบ และป้องกันเมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบ และป้องกันทรานซิสเตอร์จากค่าจำกัดแรงดันย้อนกลับที่ขาคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ( $V_{ce}$ ) โดยไดโอดจะนำกระแสในลักษณะไบอัสตรง เมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบมากขึ้น



รูปที่ 2.38 การต่อตัวต้านทานแบ่งแรงดันอ้างอิงให้กับทรานซิสเตอร์

ในรูปที่ 2.38 แสดงวิธีอย่างง่ายของการสร้างแรงดันอ้างอิงจากการต่อตัวต้านทานแบบแบ่งแรงดัน (Resistor divider) จะทำให้เป็นแหล่งจ่ายที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น ถ้ามีประสิทธิภาพไม่เพียงพอก็อาจใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวควบคุมระดับแรงดันอ้างอิงที่แทนดังรูปที่ 2.39 (ก) ถ้าจะให้สามารถปรับแรงดันอ้างอิงให้ได้ค่าตามต้องการ และถูกต้องก็อาจต่อตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ เพื่อแบ่งแรงดันและปรับได้ละเอียดยิ่งขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.35 (ข)

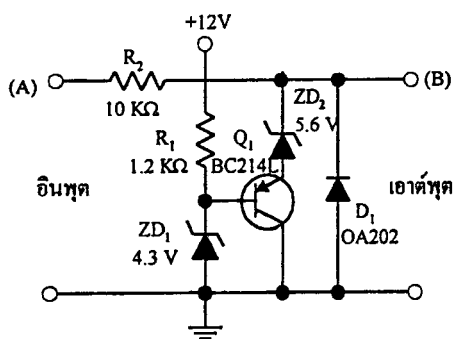


รูปที่ 2.39 (ก) การใช้ซีเนอร์ไดโอดรักษาระดับแรงดันอ้างอิง

(ข) การต่อตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อปรับความละเอียดของแรงดันอ้างอิง

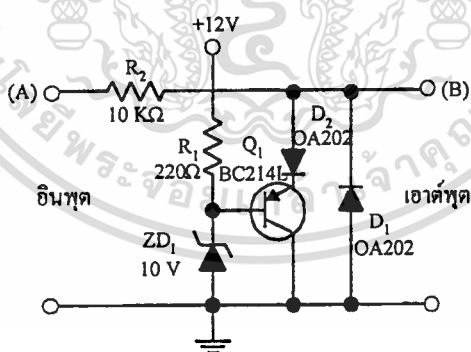
### 3. ช่วงแรงดันปลอดภัย

ทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอนจะมีแรงดันเบรกดาวน์ (Brake down Voltage) ที่ขาเบส-อีมิเตอร์ระดับแรงดันต่ำๆ ปกติจะประมาณ 5 - 7 โวลต์ ดังนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงต้องเลือกช่วงแรงดันที่ต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ของทรานซิสเตอร์ เช่น ในรูปที่ 2.39 จะจำกัดแรงดันไว้ที่ประมาณ 4.5 โวลต์ สำหรับแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ของทรานซิสเตอร์ จะต้องเลือกช่วงที่มีค่าของแรงดันน้อยกว่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดยังไม่นำกระแส



รูปที่ 2.40 การต่อซีเนอร์ไดโอดอนุกรมกับขาอิมิตเตอร์เพื่อเพิ่มช่วงแรงดันการป้องกัน

วงจรในรูปที่ 2.40 เป็นวงจรที่มีคุณภาพดีในทางทฤษฎี โดยได้มีการเพิ่มช่วงการจำกัดแรงดันด้วยการนำซีเนอร์ไดโอดต่ออนุกรมที่ขาอิมิตเตอร์ เป็นการป้องกันการนำกระแสของทรานซิสเตอร์

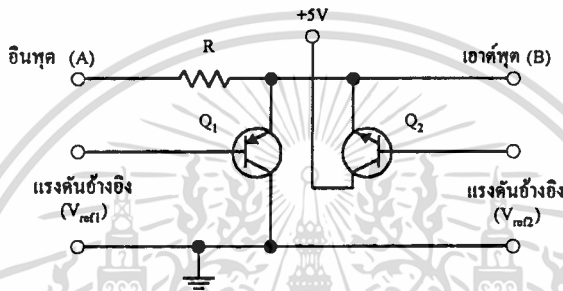


รูปที่ 2.41 การใช้ไดโอด  $D_2$  ป้องกันการไหลย้อนกลับที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงาน

ในวงจรรูปที่ 2.41 ไดโอด  $D_2$  ทำหน้าที่ป้องกันกระแสย้อนกลับที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ช่วงที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส ซึ่งจะได้รับไบอัสกลับ จึงมีเฉพาะค่าแรงดันเบรกดาวน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

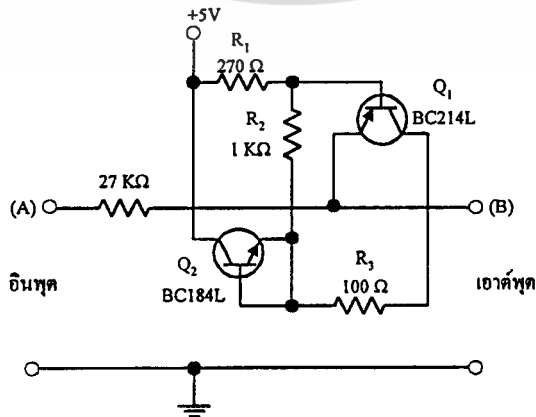
#### 4. การป้องกันทางแรงดันไฟป้อนเดี่ยว

การป้องกันสัญญาณที่อินพุตของแหล่งจ่ายแรงดันไฟป้อนเดี่ยวจะทำได้ยากมาก เพราะว่าการสัญญาณแรงดันทางด้านลบจะปรากฏที่จุด B และต้องมีค่าไม่เกิน -0.3 โวลต์ ดังนั้นวิธีแก้ไขสามารถกระทำได้โดยการนำเอาทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มาต่อเข้าในวงจรลักษณะอิมิตเตอร์ตามแทนที่ไดโอด  $D_1$  ในวงจรที่ผ่านมา เมื่อแทนที่เข้าไปทรานซิสเตอร์แล้ว จะได้วงจรดังรูปที่ 2.42 ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้งสองชุดนี้จะทำหน้าที่ป้องกันร่วมกัน



รูปที่ 2.42 การเพิ่มทรานซิสเตอร์เพื่อการป้องกันแรงดันอินพุตที่เป็นลบ

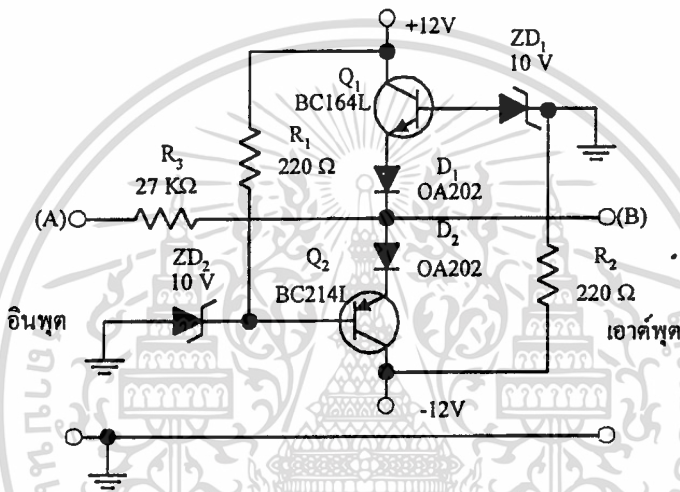
ในรูปที่ 2.42 จะใช้ตัวต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  ต่อกันเป็นวงจรแบ่งแรงดันอ้างอิงให้กับทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว สำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณภาพแน่นอนจะใช้ตัวต้านทานเมทัลฟิล์ม (Metal film) ซึ่งตัวต้านทานประเภทนี้จะผิดพลาดเพียงหนึ่งเปอร์เซ็นต์มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิ และเกิดสัญญาณรบกวนต่ำ



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.43 การแบ่งแรงดันอ้างอิงให้กับทรานซิสเตอร์ด้วยตัวต้านทาน  $R_1$ - $R_3$  โดยชนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การป้องกันทางแรงดันไฟป้อนคู่

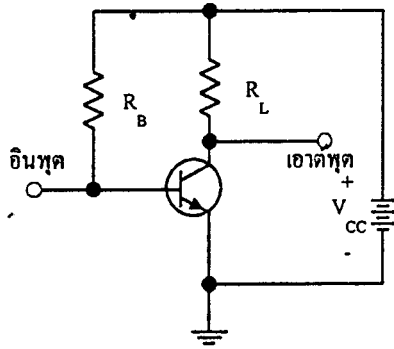
จะใช้หลักการพิจารณาคล้ายๆ แบบแรงดันไฟป้อนเดี่ยวซึ่งง่ายในการป้องกันช่วงแรงดันที่อาจจะอยู่กลางหรือไม่กลางที่ประมาณศูนย์ ในกรณีขาเบสของ  $Q_2$  มีระดับแรงดันอ้างอิงเป็นลบคงแสดงไว้ในรูปที่ 2.44 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการป้องกันช่วงสัญญาณแอนะล็อกที่มีค่าแรงดันประมาณ  $\pm 10$  โวลต์



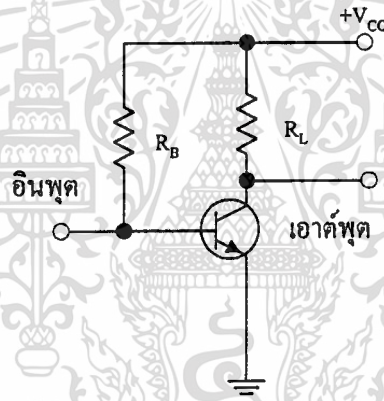
รูปที่ 2.44 การจัดวงจรป้องกันโดยจำกัดค่าแรงดันอินพุตไม่เกิน  $\pm 10$  โวลต์

## 2.7 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)

รูปแบบโดยทั่วไปของวงจรขยายทรานซิสเตอร์ คือ วงจรเบสร่วม (Commo Base) , วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter) และวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (Common Collector) วงจรทั้งหมดนี้ต้องการแรงดันไบอัสสองแหล่ง โดยที่รอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ ต้องได้รับแรงดันแบบไบอัสตรง และรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ ต้องได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับ อย่างไรก็ตามแรงดันไบอัสทั้งสองสามารถจ่ายได้จากแหล่งจ่ายตัวเดียวเพราะว่าโดยทั่วไปจะใช้วงจรคอมมอนอิมิตเตอร์ ซึ่งหลักการโดยทั่วไปจะเหมือนกับคอมมอนเบส และคอมมอนคอลเลคเตอร์



รูปที่ 2.45 วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมพร้อมทั้งแหล่งจ่ายแรงดันเดียว



รูปที่ 2.46 ผังการทำงานของวงจขยายคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมทั้งแหล่งจ่ายแรงดันเดียว

จากรูป 2.46 แสดงวงจขยายทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม ซึ่งใช้แหล่งจ่ายแรงดันเพียงแรงดันเดียว รูปผังการทำงานของวงจรแสดงในรูปที่ 2.46 แหล่งจ่ายแรงดันกำหนดให้เป็น  $+V_{cc}$  สัญลักษณ์กราวนด์ คือ โฟลของแรงดัน  $+V_{cc}$  แหล่งจ่ายแรงดันเดียวจะทำให้การไบอัสที่เหมาะสมแก่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ และรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์ ตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_L$  ใช้เพื่อกระจายแรงดันออกให้เหมาะสมกับการทำงาน โดยที่ตัวต้านทาน  $R_L$  คือตัวต้านทานของโหลดนั่นเอง เมื่อกระแสคอลเลกเตอร์ไหลจะเกิดแรงดันตกคร่อม  $R_L$  และตกคร่อมรอยต่อคอลเลกเตอร์ และอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ด้วย ตัวต้านทาน  $R_B$  ซึ่งต่ออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

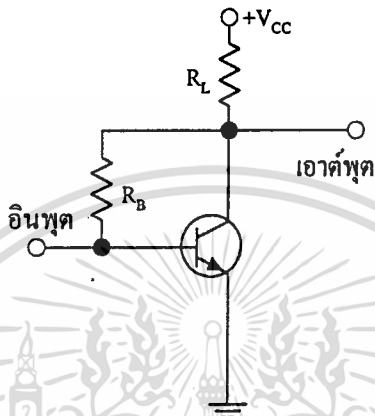
ระหว่างเบส และแหล่งจ่ายแรงดันจะใช้เป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสซึ่งจะนำไปไบอัสให้แก่เบส กระแสเบสจะไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมัน และแรงดันส่วนใหญ่จากแหล่งจ่ายจะตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_B$  ด้วย จะมีแรงดันปริมาณน้อยเท่านั้นที่จะตกคร่อมอยู่ที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดความเหมาะสมต่อการไบอัส แหล่งจ่ายแรงดันเดียวสามารถจ่ายแรงดันตรง และแรงดันกลับได้ สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เบสและคอลเลกเตอร์ต้องมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์ ดังนั้น แรงดันจากแหล่งจ่ายสามารถต่อกับเบสและคอลเลกเตอร์โดยผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_L$  วงจรนี้บ่อยครั้งจะถูกเรียกว่า วงจรเบสไบอัส เพราะว่ากระแสเบสถูกควบคุมด้วยตัวต้านทาน  $R_B$  และแหล่งจ่ายแรงดันสัญญาณอินพุตถูกจ่ายระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ หรือระหว่างขั้วอินพุตกับกราวนด์ สัญญาณอินพุตจะเป็นแรงดันไบอัสตรงที่เหมาะสมคร่อมที่รอยต่ออิมิตเตอร์ เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลกเตอร์ ซึ่งหลังจากนั้นจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม  $R_L$  เกิดการเปลี่ยนแปลง และจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้วเอาต์พุตกับกราวนด์

วงจรในรูปที่ 2.45 จะขาดความเสถียร เพราะไม่สามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสขณะไม่มีสัญญาณจ่ายเข้ามาได้ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเป็นเหตุอย่างหนึ่งซึ่งทำให้ความต้านทานภายในทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลง เป็นผลให้กระแสไบอัสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และจุดทำงานของทรานซิสเตอร์เกิดการเลื่อน อัตราขยายของทรานซิสเตอร์ลดลง ซึ่งขบวนการที่กล่าวมานี้เรียกว่า ความไม่เสถียรเนื่องจากอุณหภูมิ

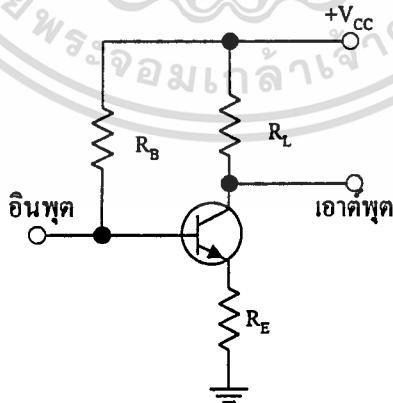
ในการชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวงจรขยายทรานซิสเตอร์นั้น ถ้าเรานำสัญญาณเอาต์พุตส่วนที่ไม่ต้องการไปป้อนกลับให้แก่วงจรอินพุต สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม ซึ่งเรียกว่า การป้อนกลับ (Feed back) ดังแสดงในรูปที่ 2.47 ในวงจรที่มีการป้อนกลับนั้น ตัวต้านทาน  $R_B$  จะถูกนำไปต่อโดยตรงกับคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์

กระแสจะไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และมีแรงดันตกคร่อมที่  $R_B$  ด้วย ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น กระแสคอลเลกเตอร์ก็จะเพิ่มตามไปด้วย และแรงดันที่ตกคร่อม  $R_L$  จะเพิ่มขึ้นส่วนแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์จะลดลง และแรงดันที่จ่ายไปยัง  $R_B$  ก็ลดลงตามไปด้วย เป็นผลให้มี

การลดกระแสเบสลง จะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ลดลงในที่สุด ซึ่งการทำเช่นนี้เราเรียกว่า วงจรป้อนกลับที่คอลเลกเตอร์



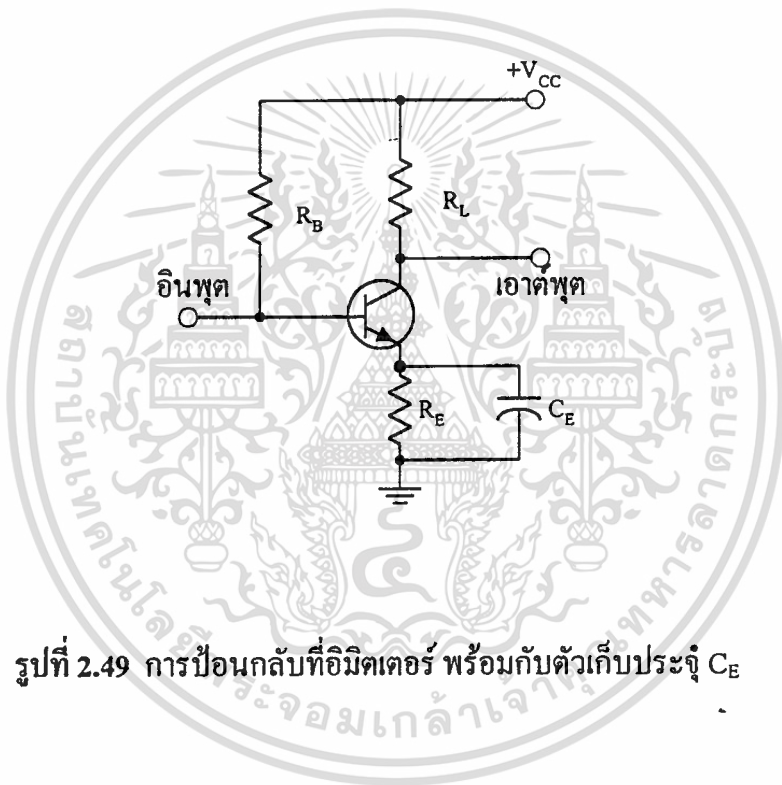
รูปที่ 2.47 วงจรขยายแบบคอมมอนอีมิเตอร์ พร้อมกับการป้อนกลับที่คอลเลกเตอร์



รูปที่ 2.48 วงจรขยายแบบคอมมอนอีมิเตอร์ พร้อมกับการป้อนกลับที่อีมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

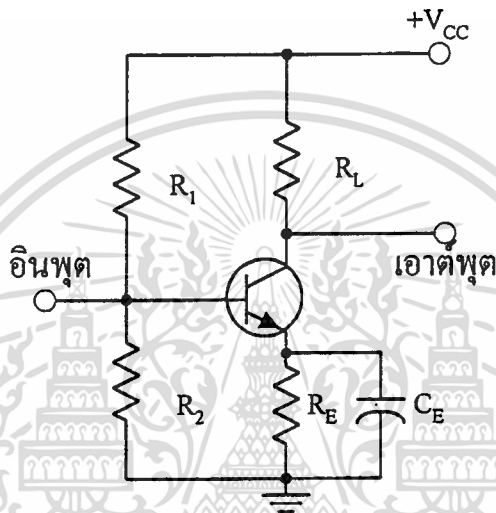
จากรูปที่ 2.48 แสดงการป้อนกลับที่อิมิตเตอร์ มีตัวต้านทาน  $R_E$  มาต่อที่ขาอิมิตเตอร์ ตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_E$  และรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสของทรานซิสเตอร์จะต่อกันในลักษณะอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{CC}$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้กระแสคอลเลกเตอร์ไหลมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  เพิ่มขึ้น และแรงดันตกคร่อม  $R_B$  ลดลง ทำให้กระแสเบสไหลน้อยลง ซึ่งจะทำให้ทั้งกระแสคอลเลกเตอร์ และกระแสอิมิตเตอร์ไหลน้อยลงตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะผลจากการป้อนกลับที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.49 การป้อนกลับที่อิมิตเตอร์ พร้อมกับตัวเก็บประจุ  $C_E$

ปัญหาที่เกิดขึ้นมาสำหรับวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์ พร้อมกับการป้อนกลับที่อิมิตเตอร์ คือ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นไฟสลับจ่ายแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  และตกคร่อมตัวต้านทานโหลด  $R_L$  รวมทั้งตัวทรานซิสเตอร์ด้วย ทำให้อัตราขยายทั้งหมดของวงจรลดลง ดังนั้น เราจึงเพิ่มตัวเก็บประจุคร่อมตัวต้านทานอิมิตเตอร์  $R_E$  ดังแสดงในรูปที่ 2.49 สัญญาณไฟสลับจะผ่านตัวเก็บประจุ  $C_E$  นี้ โดยที่ตัวเก็บประจุ  $C_E$  จะเป็นตัวป้องกันการเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดที่ปรากฏตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  และยังมีหน้าที่รักษาแรงดันตกคร่อมให้คงที่  $R_E$  ในขณะที่ตัวต้านทาน  $R_E$  ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ

วงจรการป้อนกลับแบบแบ่งแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.50 เป็นวงจรที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ตัวต้านทาน  $R_2$  จะมีแรงดันตกคร่อมน้อยกว่าตัวต้านทาน  $R_1$  โดยที่แรงดันที่เบสเทียบกับกราวด์จะเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  จุดประสงค์ของการแบ่งแรงดันก็เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมเบสกับกราวด์มีค่าคงที่



รูปที่ 2.50 วงจรขยายแบบคอมมอนอีมิเตอร์ พร้อมกับการป้อนกลับแบบแบ่งแรงดัน

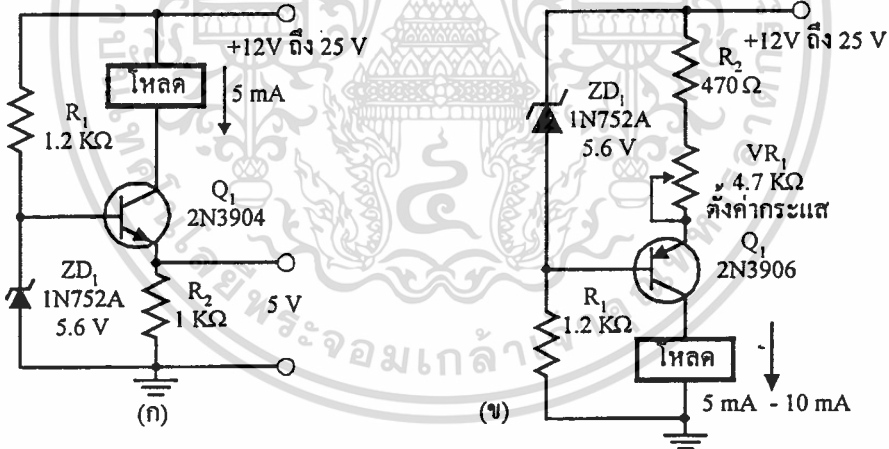
ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  ไปยังกราวด์จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $R_2$  มีศักย์ที่เบสเป็นบวกเทียบกับกราวด์ เนื่องจากมีกระแสอีมิเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_E$  จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  ขึ้น โดยมีศักย์บวกอยู่ที่ขาอีมิเตอร์ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อเบส-อีมิเตอร์ จะเกิดขึ้นจากความต่างศักย์ระหว่างแรงดันบวกสองแรงดัน คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  สำหรับแรงดันไบอัสตรงที่เหมาะสมจะปรากฏขึ้นเมื่อแรงดันบวกที่เบสมากกว่าแรงดันบวกที่อีมิเตอร์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ และกระแสอีมิเตอร์ไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นเหตุให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ที่ขาอีมิเตอร์มีศักย์บวกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกราวด์ และแรงดันไบอัสตรงตกคร่อมรอยต่อเบส-อีมิเตอร์ลดลง จึงทำให้กระแสเบสลดลง

ด้วย การลดลงของกระแสเบสจะเป็นผลต่อเนื่อง ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์และกระแสอีมิเตอร์ลดลงเป็นวงกลมที่ลดลงเรื่อยๆ ไม่สามารถมีที่สิ้นสุดได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ลดลงตามไปด้วยและในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้กระแสเบสไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ และกระแสเอมิเตอร์ และกระแสเอมิเตอร์ไหลเพิ่มขึ้นด้วย

### 2.8 วงจรกำเนิดกระแสคงที่ (Constant Current Circuit)

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ สามารถนำมาทำหน้าที่จ่ายกระแสคงที่ให้กับวงจร หรืออุปกรณ์อื่นๆ ได้ โดยจัดการทำงานไว้ในแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมที่ใช้เทคนิคพิเศษ หรือถูกนำมาใช้ในแหล่งจ่ายไฟที่อาศัยขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์เป็นตัวจ่ายกระแสคงที่ให้กับอุปกรณ์ภายนอก ดังวงจรจ่ายกระแสคงที่ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.51 (ก) จะเห็นว่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่า 1 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับขาเอมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับซีเนอร์ไดโอด ( $R_1$  และ  $ZD_1$ ) จะเป็นชุดจ่ายแรงดันอ้างอิง เพื่อไบอัสให้กับขาของ  $Q_1$  มีค่าเท่ากับ 5.6 โวลต์ตามค่าของ  $ZD_1$



รูปที่ 2.51 (ก) วงจรจ่ายกระแสคงที่

(ข) วงจรจ่ายกระแสคงที่มีกราวด์เป็นจุดอ้างอิง

จากการไบอัสแรงดันที่ขาเบส 5.6 โวลต์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างอิมิตเตอร์กับขาเบสของ  $Q_1$  มีค่าเท่ากับ 600 มิลลิโวลต์ พร้อมกับมีแรงดันตกคร่อม  $R_2$  เท่ากับ 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

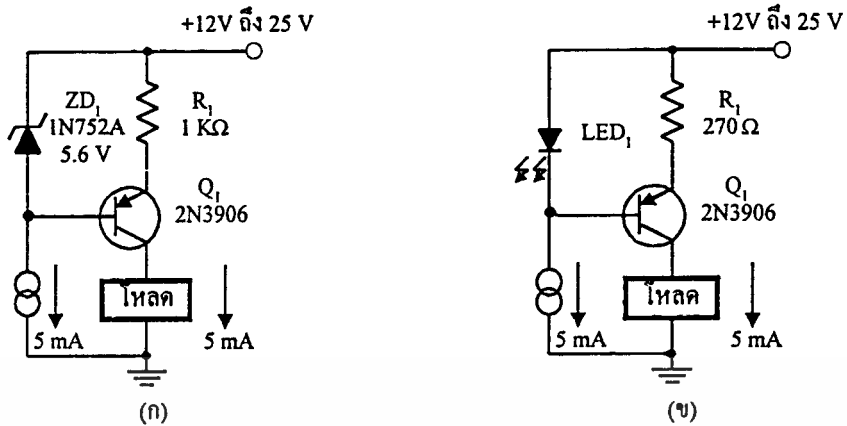
เป็นผลทำให้เกิดการไหลของกระแสที่ 5 มิลลิแอมป์ไหลผ่านค่าความต้านทาน (โหลด) ผ่านขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขามิตเตอร์ ตามคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์กระแสมีขนาดเท่ากัน

สิ่งที่พิจารณาอันดับแรก คือถ้ากระแสที่มีขนาดหรือปริมาณสูงแล้วสามารถกำหนดได้จากค่าแรงดันอ้างอิงที่ขาเบส และค่าความต้านทานโหลดที่ขามิตเตอร์ ( $R_2$ ) ผลที่ได้ตามมาคือค่ากระแสที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการเปลี่ยน หรือปรับค่าอุปกรณ์หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปที่ 2.51 (ข) เป็นการปฏิบัติตามสมมติฐานจากรูปที่ 2.51 (ก) แต่ในรูปที่ 2.51 (ข) ได้ทำการเปลี่ยนมาใช้กราวด์เป็นจุดอ้างอิง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้กับกระแสที่ทางเอาต์พุต และสามารถทำงานได้ตัวต้านทานปรับค่าได้  $VR_1$  ที่ต่ออุกรมกับขาคอลเล็กเตอร์จะใช้ปรับค่าของกระแสที่ โดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 1-10 มิลลิแอมป์

ข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในวงจรกระแสที่คือการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานทางเอาต์พุตค่าสูงๆ ปกติแล้วประมาณ 100 กิโลโอห์ม แต่ในทางปฏิบัติจะไม่มีผลสำคัญมากนัก เนื่องจากมีค่ามากเกินไปเกินความต้องการ

วงจรจ่ายกระแสที่นี้ หากต้องการความเที่ยงตรงจะต้องคำนึงถึงลักษณะของแรงดันอ้างอิงของวงจรซึ่งสามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงได้เพื่อการกำจัดผลของการจ่ายกำลังงานที่เปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยรอบของทรานซิสเตอร์ ซึ่งลักษณะการปรับปรุงวงจรจากรูปที่ 2.51 (ก) และรูปที่ 2.51 (ข) ก็สามารถปรับปรุงมาเป็นวงจรใหม่โดยแสดงจากรูปที่ 2.52 (ก) โดยตัวต้านทาน  $R_1$  ในวงจรกำหนดให้มีกระแสไหลผ่าน 5 มิลลิแอมป์คงที่สามารถแสดงได้โดยเป็นรูปวงกลมสองวงทับกันอยู่ ดังแสดงในวงจรที่ขาเบสของ  $Q_1$

ดังนั้น กระแสที่จะถูกกำหนดจากค่ากระแสที่ไหลผ่าน  $ZD_1$  และแรงดันที่ตกคร่อมขาเบสกับกราวด์ ซึ่งก็คือแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการปรับระหว่างแรงดันจากแหล่งจ่ายจนถึงครึ่งหนึ่งของแรงดันนั้น และวงจรจะมีความเที่ยงตรงสูงมาก ถ้ามาตรฐานการผลิตชิปเนอร์ไดโอดจากโรงงานได้มาตรฐานเดียวกันก็จะอ้างอิงถึงมาตรฐานประสิทธิภาพทางอุณหภูมิของ  $ZD_1$  โดยกำหนดไว้ที่ 2 มิลลิโวลต์ต่อ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับอุณหภูมิ ระหว่างขาเบสกับขามิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ได้ดี



รูปที่ 2.52 (ก) สัญลักษณ์ของวงจรกำเนิดกระแสคงที่ในวงจร  
(ข) การชดเชยอุณหภูมิด้วย LED

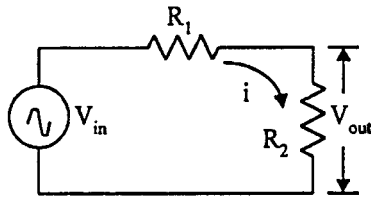
เราสามารถทดแทนซีเนอร์ไดโอดด้วยการอาศัยคุณสมบัติทางกระแสตรงของ LED มาต่อแทนซีเนอร์ไดโอด โดยต่อในลักษณะไบอัสตรงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.52 (ข) ซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อม LED ประมาณ 2 โวลต์ และมีแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์  $R_1$  ประมาณ 1.4 โวลต์ โดยที่  $R_1$  นี้สามารถเปลี่ยนแปลงให้ค่าลดลงได้จาก 1 กิโลโอห์ม ลงมาถึง 270 โอห์ม ระดับกระแสที่ทางเอาต์พุตก็จะคงที่อยู่ที่ 5 มิลลิแอมป์

## 2.9 วงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator Circuit)

การลดทอนสัญญาณ (Attenuation) เป็นการลดทอนขนาดของสัญญาณตามที่กำหนดไว้ ตรงกันข้ามกับการขยาย (Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ วงจรลดทอนที่ใช้ในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวางมีหลายๆ แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน

### 2.9.1 วงจรลดทอนแบบแอล (L - Type Attenuator)

วงจรลดทอนแบบแอลเป็นวงจรลดทอนแบบที่ง่ายที่สุดมีลักษณะเป็นวงจรแบ่งแรงดันธรรมดา ค่าอัตราขยายทางแรงดันของวงจรจะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต



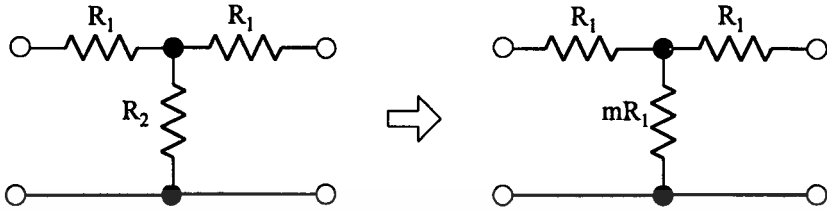
รูปที่ 2.53 วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit)

$$\begin{aligned}
 V_{\text{out}} &= IR_2 \\
 &= \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{in}} \\
 A &= \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\
 A_{\text{dB}} &= 20 \log \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

ค่าการลดทอน จะเป็นสัดส่วนกลับของค่า อัตราขยายทางแรงดันนั่นคือ

$$a = D = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{A}
 \tag{2.25}$$

### 2.9.2. วงจรลดทอนแบบ ที (T - Type Attenuator)



รูปที่ 2.54 วงจรลดทอนแบบ T-Net work

จากรูปถ้าให้  $m$  เป็นอัตราส่วนระหว่าง  $R_2$  และ  $R_1$  จะได้ว่า

$$m = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.26)$$

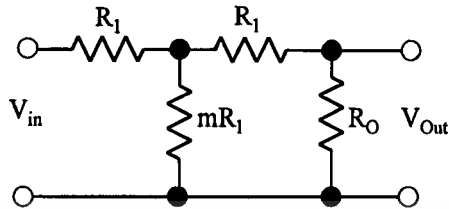
หรือ  $R_2 = m.R_1 \quad (2.27)$

$$\begin{aligned} \therefore R_0 &= \sqrt{R_{ins} \cdot R_{ino}} \\ &= \sqrt{(R_1 + R_2 // m.R_1) (R_1 + m.R_1)} \\ R_0 &= R_1 \sqrt{1 + 2m} \end{aligned} \quad (2.28)$$

ค่าการลดทอนของวงจรหาได้จากรูปที่ 2.54

$$a = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{1 + m + \sqrt{1 + 2m}}{m} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.55 การหาค่า การลดทอนของวงจรแบบ T-Network

### 2.9.3 วงจรลดทอนแบบไพน (π-Net work Attenuation)



รูปที่ 2.56 วงจรลดทอนแบบ π-Net work

จากรูปที่ 2.49. สามารถหาค่า  $R_0$  และ  $a$  ได้ดังนี้

$$m = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_0 = \frac{m}{\sqrt{1+2m}} R_1 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \frac{1 + m + \sqrt{1 + 2m}}{m} \quad (2.31)$$

$$R_1 = \frac{a^2 - 1}{2m} R_0 \quad (2.32)$$

$$R_2 = \frac{a + 1}{a - 1} R_0 \quad (2.33)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

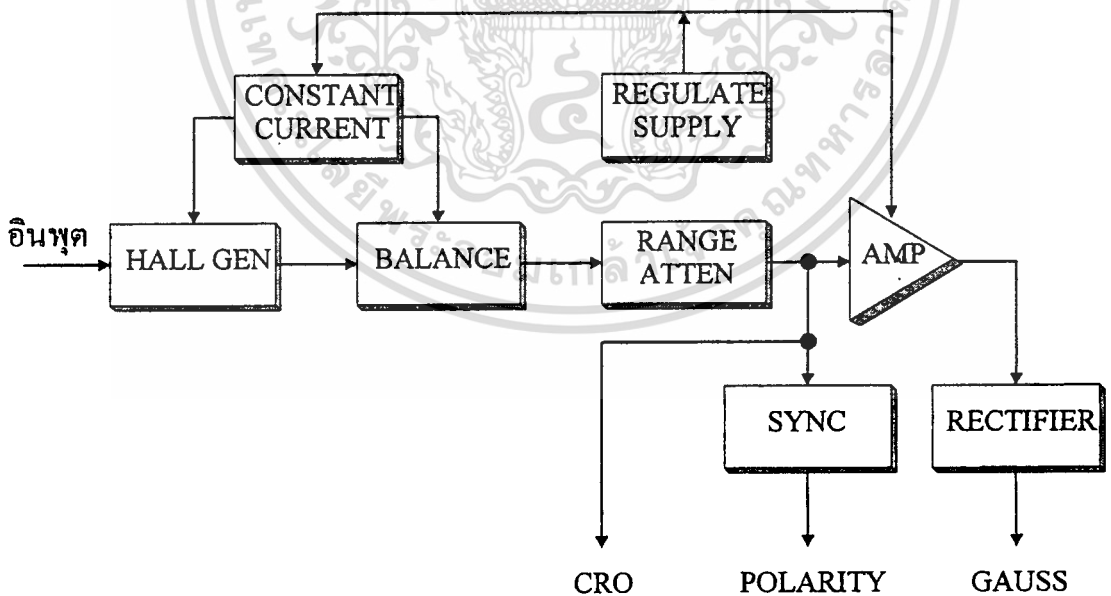
# บทที่ 3

## การออกแบบการสร้างและการทำงาน

### 3.1 กล่าวนำ

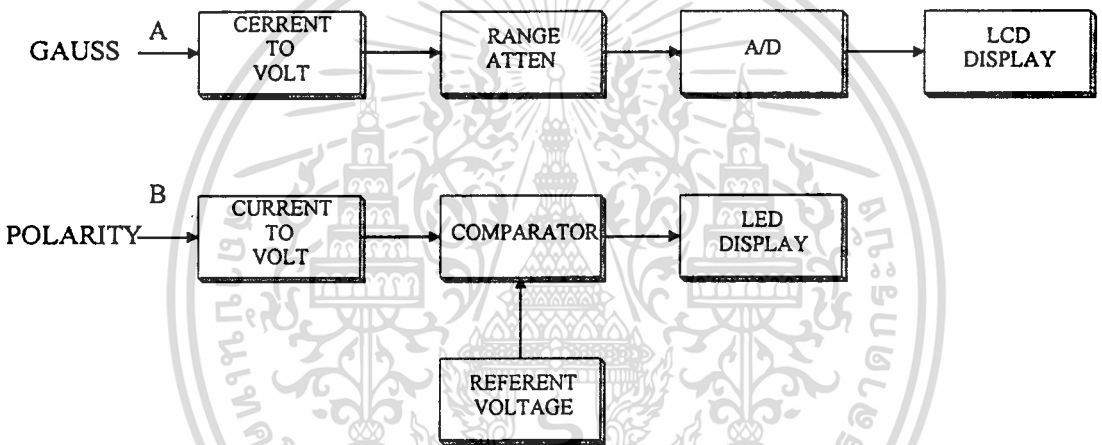
บทนี้เป็นรายละเอียดของ การออกแบบวงจรส่วนแสดงผล และการออกแบบย่านการวัดต่างๆ พร้อมทั้งหลักการทำงานของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข นอกจากนี้ยังมีรายละเอียด การสร้าง การปรับแต่งวงจรส่วนแสดงผล รายละเอียดของเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำปริญญาโท ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

### 3.2 หลักการทำงานของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข



รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันการทำงานของวงจรส่วนวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

จากรูป 3.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ภายในวงจรจ่ายกระแสคงที่ จะผลิตความถี่ 1 กิโลเฮิรต์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากภาคกำเนิดฮอสส์ โดยจะทำการเปรียบเทียบกันที่วงจรมวลคู่ ผลการเปรียบเทียบที่ได้จะเป็นค่าแรงดันผลต่าง ซึ่งจะถูกส่งไปให้วงจรขยายโดยผ่านชุดลดทอนย่านการวัดเพื่อให้เหมาะสมกับการวัดแต่ละย่าน เอาต์พุตที่ได้จากภาคขยายจะแยกออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกส่งไปให้ชุดวัดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก โดยผ่านวงจรเรียงกระแส ส่วนที่สองส่งไปให้ภาคซิงโครไนซ์เพื่อใช้ในการแสดงขั้วแม่เหล็ก และส่วนสุดท้ายคือ CRO เป็นส่วนที่สามารถใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กได้



รูปที่ 3.2 ผังการทำงานของวงจรส่วนแสดงผล

จากรูป 3.2 ที่จุด A จะได้รับกระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะมีค่าสูงสุด 100 ไมโครแอมป์ หลังจากนั้นวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันไฟตรงเพื่อส่งให้วงจรเอาต์พุตแล้วส่งไปแสดงผลด้วยแผงแสดงผลแบบ LCD

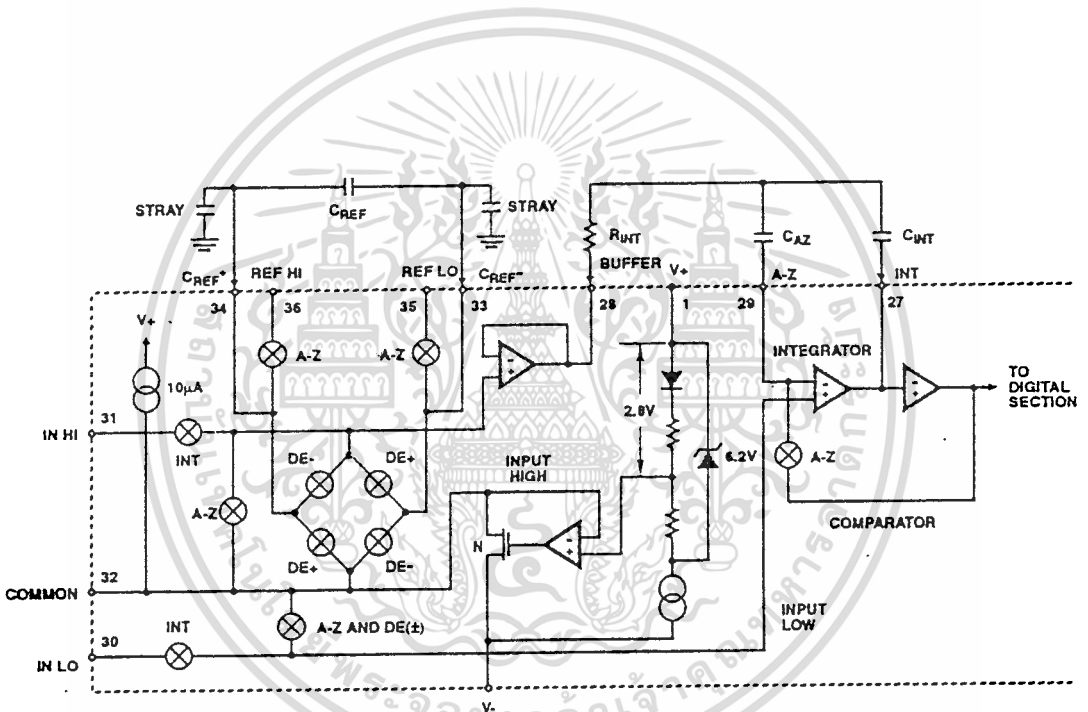
ที่จุด B จะได้กระแสค่า 22 ไมโครแอมป์, 50 ไมโครแอมป์ หรือ 78 ไมโครแอมป์ โดยขึ้นอยู่กับขั้วแม่เหล็กที่ทำกรวัด ค่ากระแสที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันแล้วส่งให้วงจรเปรียบเทียบแล้วนำผลการเปรียบเทียบค่าไปแสดงขั้วแม่เหล็ก

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะอุปกรณ์ที่นำมาใช้สร้างวงจรแสดงผลเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วยไอซีตัวเดียวใช้ควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผล และแผงแสดงผลแบบผลึกเหลวขนาด 3.5 หลัก

#### 3.3.1 ไอซีควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผล

วงจรส่วนแอนะล็อก (Analog section)



รูปที่ 3.3 ส่วนวงจรภาคแอนะล็อกของ ICL7106

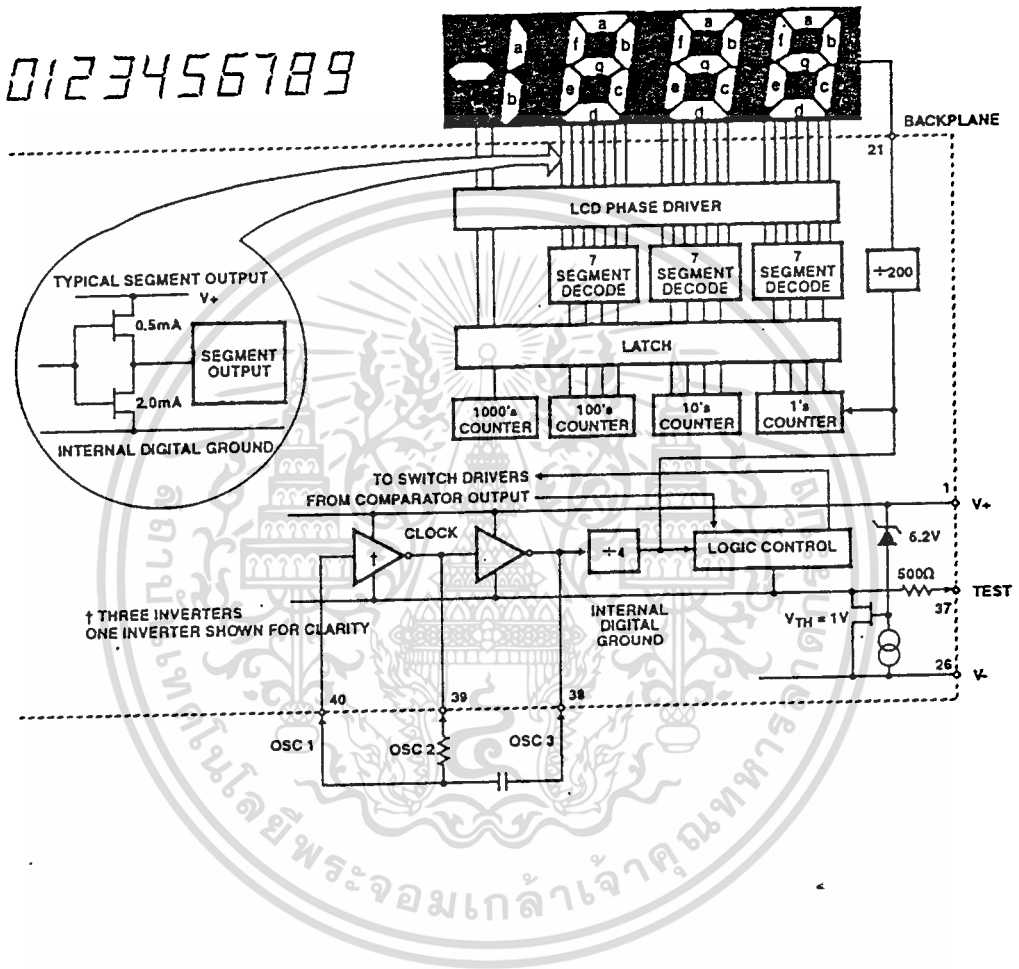
จากรูปที่ 3.3 แสดงวงจรส่วนแอนะล็อกของไอซีเบอร์ ICL 7106 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่คือ ส่วนปรับศูนย์อัตโนมัติ, ส่วนอินทิเกรตสัญญาณ และส่วนกลับการอินทิเกรต

ส่วนการปรับศูนย์อัตโนมัติทำหน้าที่ปรับระดับสัญญาณ เพื่อชดเชยแรงดันออฟเซตให้กับวงจรบัฟเฟอร์, วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรเปรียบเทียบ เพื่อให้วงจรแสดงค่าศูนย์ออกมาขณะที่ไม่มีสัญญาณเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



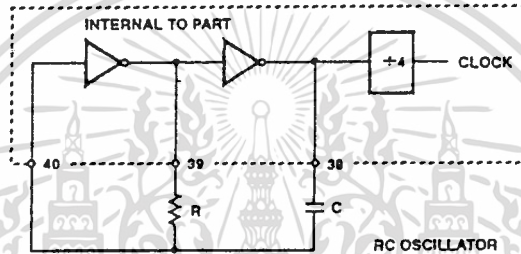
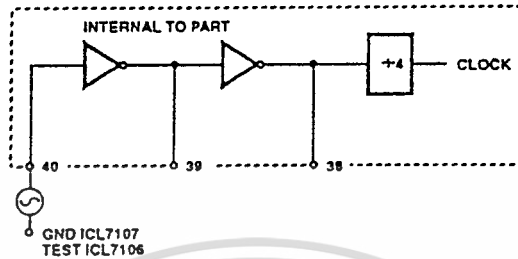
วงจรส่วนดิจิทัล (Digital section)



รูปที่ 3.5 วงจรส่วนดิจิทัลของ ICL 7106

จากรูปจะเห็นว่า กราวด์ดิจิทัลภายในตัวไอซีเกิดจากซีเนอร์ไดโอด 6 โวลต์ และเพทแบบเซนแนล-พี ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายตาม (Source follower) โดยแหล่งจ่ายนี้จะจ่ายให้กับขา BP (Black Plane) เพื่อขับ LCD ความถี่ที่ป้อนให้กับขา BP จะถูกหารด้วย 800 ดังนั้นในการอ่าน 3 ครั้งต่อวินาที ของ LCD จะใช้ความถี่ 60 เฮิร์ต เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 โวลต์ โดยที่ส่วนเซกเมนต์จะถูกขับด้วยความถี่ และสัญญาณเดียวกันแต่ต่างเฟสกับ BP เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบเวลาของ ICL 7106 (Timing System)



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณพิกษาของ ICL 7106

ไอซีเบอร์ ICL 7106 สามารถใช้สัญญาณพิกษาได้ 2 วิธีคือ

1. ใช้สัญญาณพิกษาจากภายนอกป้อนให้ที่ขา 40
2. ใช้ R และ C ต่อเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์

จากรูปวงจรออสซิลเลเตอร์จะถูกหารด้วย 4 ก่อนที่จะป้อนให้กับวงจรนับสิบ เพื่อทำการนับ และถอดรหัสแสดงผลต่อไป

### 3.3.2 การเลือกค่าอุปกรณ์ สำหรับ ICL 7106

#### 1. ตัวต้านทานอินทิเกรตติ้ง (Integrating Resistor)

ตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับขา BUFF ของ ICL 7106 ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานอินทิเกรต จะต้องเลือกค่าที่มากพอจะทำให้เกิดความเป็นเชิงเส้นกับย่านการวัด เช่น ย่านการวัด 2 โวลต์ เต็มสเกลจะใช้ค่า 470 กิโลโอห์ม ส่วนในย่าน 200 มิลลิโวลต์ เต็มสเกลใช้ค่า 47 กิโลโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ตัวเก็บประจุอินทิเกรตติ้ง (Capacitor Integrating)

ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับขา INT ควรจะเลือกเอาค่าที่สามารถทำให้การแกว่งของแรงดันมีค่าสูงสุด โดยที่ไม่ทำให้ แรงดันของการอินทิเกรตเกิดการอิ่มตัว (มีค่าประมาณ 0.3 โวลต์ ในแหล่งจ่ายแต่ละแบบ) สำหรับ ICL 7106 ในย่าน 2 โวลต์ เต็มสเกลโดยขาร่วมแอนะล็อก ถูกใช้เป็นตัวอ้างอิงการอินทิเกรตในการอ่านค่าแบบ 3 รอบต่อวินาที (สัญญาณนาฬิกา 48 กิโลเฮิร์ต) โดยปกติแล้วจะใช้ค่า  $C_{INT}$  มีค่า 0.22 ไมโครฟาราด และ 0.1 ไมโครฟาราด ตามลำดับ

## 3. ตัวเก็บประจุปรับค่าศูนย์อัตโนมัติ (Auto Zero-Capacitor)

ค่าของตัวเก็บประจุปรับศูนย์อัตโนมัติ จะมีผลกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น ในย่าน 200 มิลลิโวลต์เต็มสเกล ซึ่งถือว่า สัญญาณรบกวนจะมีความสำคัญมากมักจะใช้ตัวเก็บประจุค่า 0.47 ไมโครฟาราด ส่วนย่าน 2 โวลต์เต็มสเกลจะใช้ค่า 0.047 ไมโครฟาราด ตัวเก็บประจุปรับศูนย์อัตโนมัติจะช่วยเพิ่มความเร็วในการคืนสภาพจากการเกิดโหลดเกิน และยังเป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นด้วย

## 4. ตัวเก็บประจุอ้างอิง (Reference capacitor)

ตัวเก็บประจุอ้างอิงส่วนมากจะใช้ค่า 0.1 ไมโครฟาราด เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน อย่างไรก็ตามถ้าหาก ขา REF LO ไม่ต่อกับขาร่วมแอนะล็อกแสดงว่าวงจรใช้ค่าแรงดันโหมคร่วมที่มีค่ามากขึ้นค่าตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนไป

## 5. อุปกรณ์สร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Component)

ในทุกย่านการวัด ตัวความต้านทาน 100 กิโลโอห์ม มักจะถูกใช้เสมอ และเลือกเอาค่าตัวเก็บประจุจากสมการ

$$F = \frac{0.45}{RC}$$

สำหรับความถี่ 48 KHz (การอ่าน 3 รอบต่อวินาที)

$$C = 100 \text{ pF}$$

## 6. แรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)

ค่าแรงดันอินพุตเต็มสเกลหาได้จาก  $V_{IN} = 2 V_{REF}$  ดังนั้นสำหรับย่านการวัด 200 มิลลิโวลต์ และ 2 โวลต์ แรงดันอ้างอิง ( $V_{REF}$ ) ควรจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิโวลต์ และ 1 โวลต์ ตาม

ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 รายละเอียดในการออกแบบใช้งาน ICL 7106

#### ความถี่ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Frequency)

$$F_{osc} = \frac{0.45}{RC} \quad (3.1)$$

$$C_{osc} = 50 \text{ pF} ; R_{osc} > 50 \text{ กิโลโอห์ม}$$

#### ช่วงเวลาการเกิดออสซิลเลเตอร์

$$t_{osc} = \frac{RC}{0.45} \quad (3.2)$$

#### ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในทีเกรต

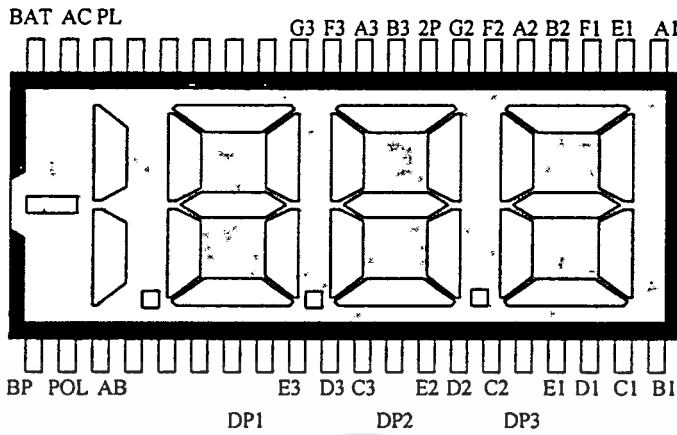
$$F_{clock} = \frac{F_{osc}}{4} \quad (3.3)$$

#### ช่วงเวลาการอินทีเกรต

$$t_{INT} = 100 \times \frac{4}{F_{osc}} \quad (3.4)$$

### 3.3.4 ตัวแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)

แผงแสดงผลที่ใช้นั้นเป็นแผงแสดงผลแบบ 3.5 หลัก และต่อแบบธรรมดา ซึ่งมีขาเป็น  
ดินตะขาบ 40 ขา



รูปที่ 3.7 LCD ขนาด 3.5 หลักรูปแบบธรรมดา

### 3.4 การออกแบบวงจร

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจรส่วนแสดงผลแบบตัวเลข และส่วนแสดงขั้วแม่เหล็กเท่านั้น เนื่องจากเป็นวงจรส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ และเป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามามีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

#### 3.4.1 วงจรส่วนแสดงผล

##### 1. วงจรส่วนแสดงค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

วงจรส่วนแสดงค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กจะใช้ไอซีตัวเดียว เบอร์ IC 7106 ควบคุมการทำงาน โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

##### 1.1. ความถี่ออสซิลเลเตอร์

$$\text{จาก } F = \frac{0.45}{RC}$$

$$\text{กำหนด } C = 100 \text{ pF}$$

$$f_{\text{osc}} = 48 \text{ KHz}$$

$$R = \frac{0.45}{(48\text{KHz} \times 100\text{pF})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ = 93.75 K $\Omega$  (ใช้ค่า 100 K $\Omega$ ) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2. ตัวต้านทานอินทิเกรต

$$R_{INT} = \frac{V_{INFS}}{I_{INT}} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$V_{INFS} = 200 \text{ mV}$$

$$I_{INT} = 4 \text{ } \mu\text{A}$$

$$R_{INT} = \frac{200 \text{ mV}}{4 \text{ } \mu\text{A}} = 50 \text{ K}\Omega \text{ (ใช้ค่า } 47 \text{ K}\Omega)$$

## 1.3. ตัวเก็บประจุอินทิเกรต

$$C_{INT} = \frac{(t_{INT})(I_{INT})}{V_{INT}} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$t_{INT} = 1000 \times \frac{4}{F_{osc}}$$

$$I_{INT} = 4 \text{ } \mu\text{A}$$

$$V_{INT} = 2 \text{ V}$$

หา

$$t_{INT} = 1000 \times \frac{4}{45 \text{ KHz}}$$

$$\therefore C_{INT} = \frac{88.89 \text{ mS} \times 4 \text{ mA}}{2} = 0.17 \text{ } \mu\text{F} \text{ (ใช้ค่า } 0.1 \text{ } \mu\text{F)}$$

## 1.4 ตัวเก็บประจุปรับศูนย์อัตโนมัติ

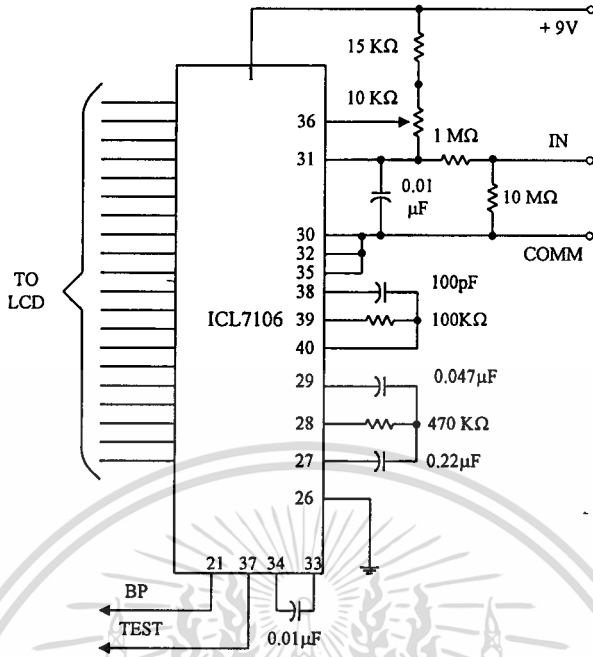
$$C_{AZ} \text{ (} 0.01 \text{ } \mu\text{F ถึง } 1 \text{ } \mu\text{F)}$$

เลือกใช้ค่า  $C_{AZ} = 0.47 \text{ } \mu\text{F}$  เมื่อค่าเต็มสเกลเท่ากับ 200 mV

## 1.5 ตัวเก็บประจุอ้างอิง

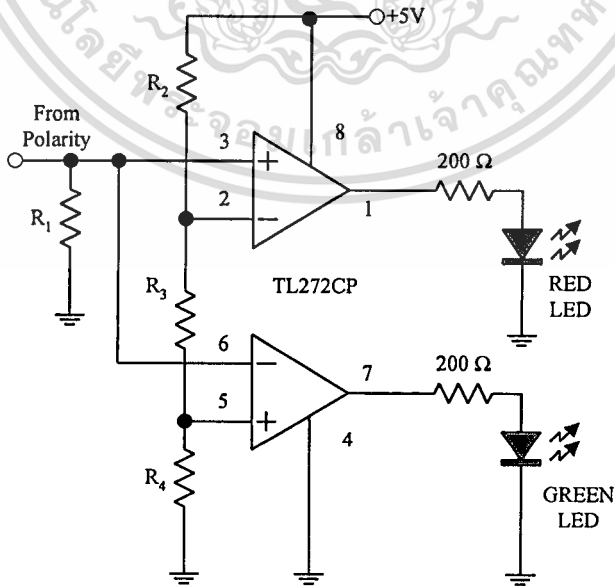
$$C_{REF} \text{ (} 0.1 \text{ } \mu\text{F ถึง } 1 \text{ } \mu\text{F)}$$

เลือกใช้ค่า  $C_{REF} = 0.47 \text{ } \mu\text{F}$  (ค่าที่แนะนำเอาไว้ในรายการข้อมูล)



รูปที่ 3.8 วงจรส่วนแสดงค่าความเข้มแสงแม่เหล็ก

2. การออกแบบวงจรส่วนแสดงขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 3.9 วงจรส่วนแสดงขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรส่วนแสดงขั้วแม่เหล็กจะใช้อปแอมป์สร้างเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เพื่อแสดงขั้วแม่เหล็ก โดยขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ LED สีแดงจะติด ถ้าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วใต้ LED สีเขียวจะติด

จากรูป

$$V_{REF2} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 + R_3 + R_4} V_{CC}$$

กำหนด

$$V_{REF2} = 2 \text{ V}$$

$$R_4 = 2 \text{ K}\Omega$$

$$V_{CC} = 5 \text{ V}$$

$$(R_3 + R_2) = \left\{ \frac{V_{CC} - V_{REF}}{V_{REF}} \right\} R_4$$

$$= \left\{ \frac{5 - 2}{2} \right\} 2 \text{ K}\Omega$$

$$(R_3 + R_2) = 3 \text{ K}\Omega$$

เมื่อ

$$V_{REF2} = 2 \text{ V}$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน  $R_4$  มีค่าเท่ากับ

$$I_{R_4} = \frac{V_{REF2}}{R_4}$$

$$I_{R_4} = \frac{2 \text{ V}}{2 \text{ K}\Omega} = 1 \text{ mA}$$

ต้องการ

$$V_{REF1} = 3 \text{ V}$$

ดังนั้น  $V_{R_2} = 2 \text{ V}$

$$R_2 = \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 2 \text{ K}\Omega$$

$$\therefore R_3 = 1 \text{ K}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดขั้วแม่เหล็กโดยปกติขณะที่ยังไม่ทำการวัด วงจรขยายกระแสจะจ่ายกระแสออกมา 50 ไมโครแอมป์ (ครึ่งสเกล) เมื่อทำการวัดขั้วแม่เหล็กค่ากระแสที่ถูกจ่ายออกมาจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง 28 ไมโครแอมป์ กล่าวคือ ถ้าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือจะต้องมีกระแสไหล 78 ไมโครแอมป์ แต่ถ้าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วใต้จะมีกระแสไหล 22 ไมโครแอมป์

ดังนั้นในการออกแบบวงจรเปรียบเทียบ เมื่อทราบว่า  $V_{REF} = 2-3 \text{ V}$  แล้วแรงดันตกคร่อม  $R_1$  จะต้องเท่ากับ 2-3 V ด้วย

เลือกค่า  $V_{REF}$  เท่ากับ 2.5 V

หาค่า  $R_1$  ได้จาก

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R_1 = \frac{2.5 \text{ V}}{50 \mu\text{A}}$$

$$= 50 \text{ K}\Omega$$

การจำกัดกระแสให้กับ LED ทั้งสองดวงใช้ค่าความต้านทาน 500 โอห์ม ต่ออนุกรมกับ LED ซึ่งจะช่วยให้มีกระแสไหลประมาณ 8 มิลลิแอมป์ป้องกัน LED ขณะได้ไบอัสกลับ

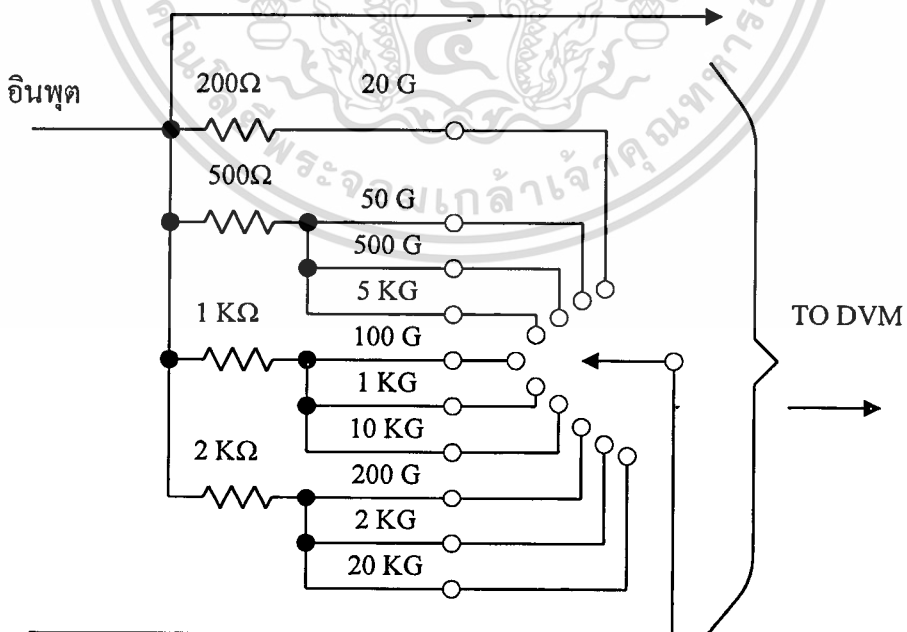
### 3.4.2 การออกแบบย่านการวัด

ในการออกแบบย่านการวัดแต่ละย่าน ตั้งแต่ 20 เกาส์ ถึง 20 กิโลเกาส์ ได้พิจารณากระแสเต็มสเกลคือ 100 ไมโครแอมป์ มาใช้ออกแบบย่านการวัดแต่ละย่านโดยการใช้นำต้านทานต่ออนุกรมกับกระแสที่จ่ายออกมาแล้วใช้วงจรส่วนการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัววัดแรงดันดังนี้

จากตารางจะเห็นว่าย่านการวัด 500 เกาส์, 1 กิโลเกาส์ และ 2 กิโลเกาส์ สามารถแสดงเป็น 500, 1000 และ 2000 ได้โดยการไม่แสดงจุด DP3 ออกมาทางจอ LCD และย่านการวัด 5K, 10K และ 20 K สามารถแสดงเป็น 5.00, 10.00 และ 20.00 ได้โดยการใช้จอแสดงผล LCD แสดงจุด DP2 ขณะเลือกย่านการวัดนี้

ย่านการวัด	ค่าความต้านทาน	แรงดันที่ได้
20	200Ω	20.0 mV
50	500Ω	50.0 mV
100	1KΩ	100.0 mV
200	2KΩ	200.0 mV
500	500Ω	50.0 mV
1K	1KΩ	100.0 mV
2K	2KΩ	200.0 mV
5K	500Ω	50.0 mV
10K	1KΩ	100.0 mV
20K	2KΩ	200.0 mV

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างย่านการวัด, ค่าความต้านทาน และแรงดัน



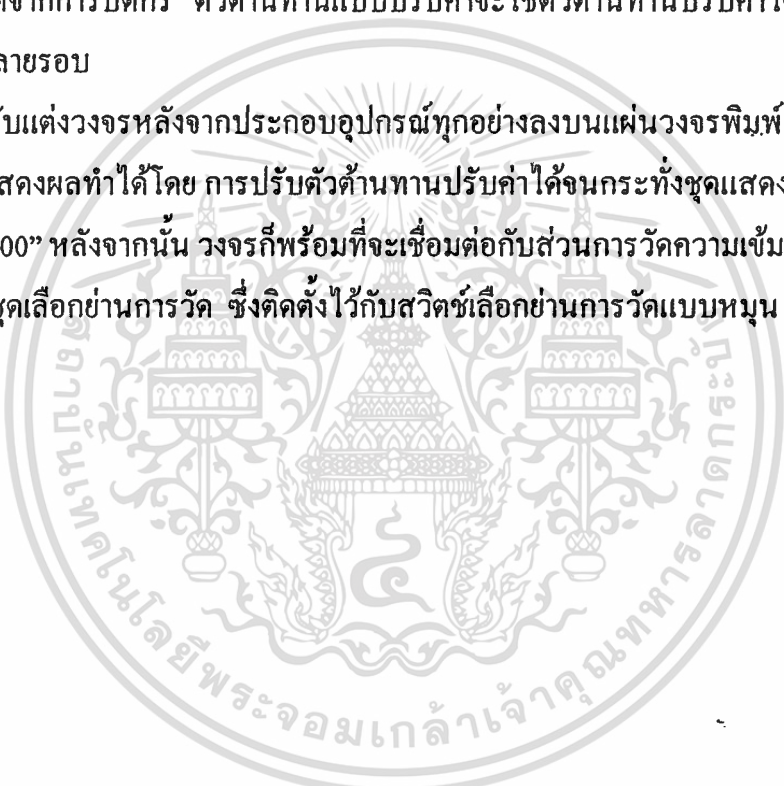
รูปที่ 3.10 วงจรส่วนย่านการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การสร้างและการปรับแต่ง

การสร้างวงจรส่วนแสดงผลจะใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ชุด คือชุดแสดงผล และชุดต่อไป การที่ต้องสร้างชุดจ่ายไฟสำหรับส่วนแสดงผลโดยเฉพาะเนื่องจาก ต้องการลดการรบกวนของภาคจ่ายไฟหลักของวงจร เนื่องจาก ICL 7106 มีความไวต่อการรบกวนมากตัวแสดงผล LCD จะแยกออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วต่อสายแพผ่านตัวต่อสาย ตัว LCD ถูกประกอบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์โดยใส่ซีจ็อกเก็ตไอซี เช่นเดียวกับไอซีทุกตัวที่ใช้ในวงจรส่วนแสดงผลเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการบัดกรี ตัวต้านทานแบบปรับค่าจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบพอร์ตชนิดปรับได้หลายรอบ

การปรับแต่งวงจรหลังจากประกอบอุปกรณ์ทุกอย่างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ การทดลองปรับแต่งภาคแสดงผลทำได้โดย การปรับตัวต้านทานปรับค่าได้จนกระทั่งชุดแสดงผลแสดงค่าออกมาเป็น “000” หลังจากนั้น วงจรก็พร้อมที่จะเชื่อมต่อกับส่วนการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กโดยผ่านชุดเลือกย่านการวัด ซึ่งติดตั้งไว้กับสวิตช์เลือกย่านการวัดแบบหมุน



## บทที่ 4

### การทดลอง ผลการทดลองและทดสอบ

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นรายละเอียดของการทดลอง ผลการทดลอง และ การทดสอบการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กกับแท่งแม่เหล็กมาตรฐาน ตลอดจนการปรับแต่งให้สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพรวมไปถึงวิธีการใช้ และบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง

#### 4.2 วิธีการใช้ และบำรุงรักษาเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

1. ก่อนเปิดสวิตช์ให้เครื่องทำงานทุกครั้งต้องต่อสายไฟ และต่อหัววัดให้เรียบร้อยก่อนเสมอไม่ควรเปิดสวิตช์เล่นทั้งขณะเสียบสายไฟอยู่และไม่เสียบสายไฟ
2. ในการวัดทุกครั้งจะต้องตั้งย่านการวัดไว้ที่ย่านสูงสุดเสมอ
3. ก่อนการวัดจะต้องปรับศูนย์ให้จอแสดงผลแสดงค่า “000”
4. เมื่อไม่ทำการวัดให้ถอดหัววัดเก็บให้เรียบร้อยทุกครั้งเสมอ

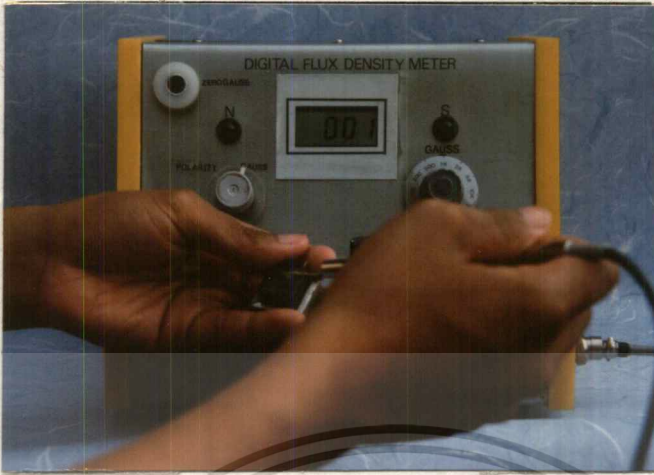
#### 4.3 การทดลองวัดแท่งแม่เหล็กที่ทราบค่า และหัวแม่เหล็กที่ทราบค่าแน่นอน

##### 4.3.1 การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กขนาด 1 กิโลเกาส์ โดยใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

###### ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบหัววัดเข้ากับเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข
2. ปรับเลือกย่านการวัดไว้ที่ตำแหน่ง 1 KG
3. เปิดสวิตช์เพื่อให้เครื่องทำงาน
4. ปรับปุ่มศูนย์ ทั้ง 3 ปุ่มเพื่อให้จอ LCD แสดงค่า เป็น “000”
5. ใช้หัววัด วัดแท่งแม่เหล็กค่า 1 กิโลเกาส์
6. อ่านค่าที่ได้จากจอแสดงผล และสังเกตหลอด LED ที่แสดงหัวแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การวัดแท่งแม่เหล็กมาตรฐาน โดยใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

#### ผลการทดลอง

จากการทดลองแท่งแม่เหล็กที่ทราบค่า และขั้วแม่เหล็กแน่นอน ค่า 1 กิโลเกาส์ และมีขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐาน จะมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยไม่เกิน  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก	ขั้วแม่เหล็ก	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
1002 G	เหนือ	0.2 %

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กขนาด 1KG

#### 4.3.2 การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ออสซิลโลสโคป

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

2. หลังจากทำการปรับศูนย์เรียบร้อยแล้วทำการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

##### 2.1 ปรับตั้งออสซิลโลสโคปไว้ที่ DC โหมด

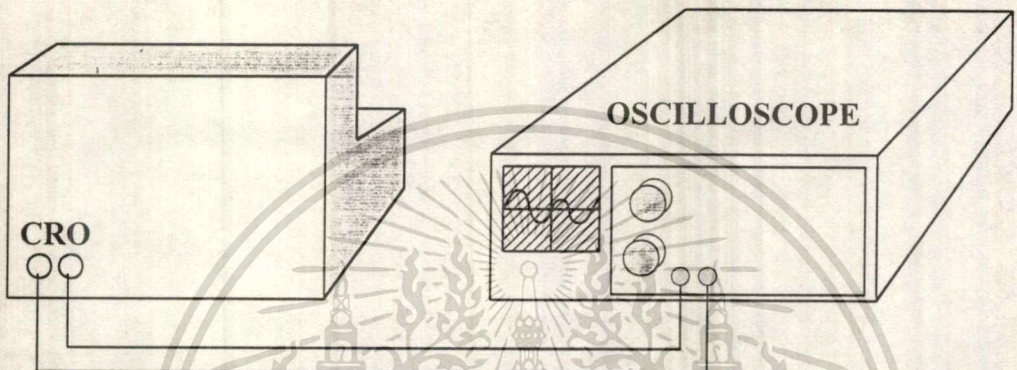
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรับปุ่ม V/D ไว้ที่ 1 V/D

2.3 ปรับ T/D ไว้ที่ 1 mS/D

2.4 นำสายวัดสัญญาณของออสซิลโลสโคปต่อเข้ากับจุด CRO ด้านหลังของเครื่อง

2.5 ทำการอ่านค่าจากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.2 ผังการต่อออสซิลโลสโคป

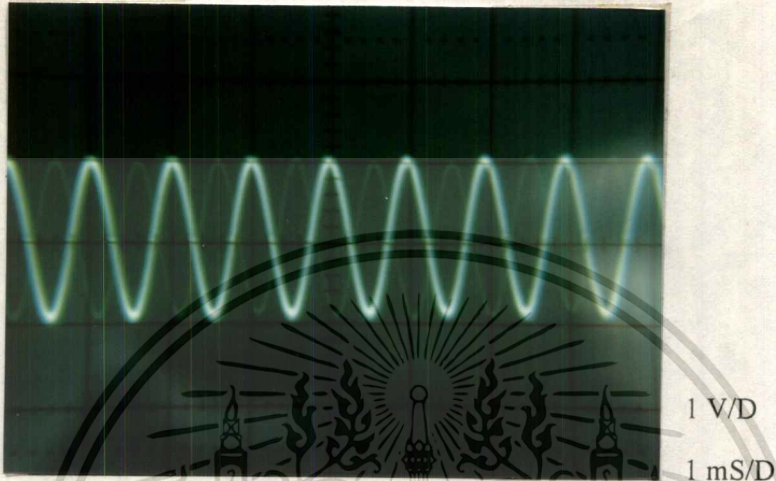


รูปที่ 4.3 การต่อออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะอ่านค่าได้  $2 V_{p-p}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 กิโลเกาส์



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป

#### 4.4 การทดลองวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กกับแท่งแม่เหล็กมาตรฐานเพื่อหาความผิดพลาดจากการวัดในย่านวัดที่สูงขึ้น

##### 4.4.1 การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวัดที่สร้างขึ้น ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการปรับตั้งย่านการวัดไว้ที่ย่าน 20K
2. จากนั้นจึงทำการปรับศูนย์ ให้สามารถอ่านค่าที่จอ LCD ได้ค่า "000"
3. ทำการวัด และอ่านค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้
4. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 3 อีกครั้งหนึ่ง แต่เปลี่ยนย่านการวัดเป็น 20K ,10K ,5K และ 2K ตามลำดับ

## ผลการทดลอง

ย่านการวัด	ค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
20K	1.22 KG	2.2 %
10K	1.12 KG	1.2 %
5K	1.10 KG	1 %
2K	1009 G	0.9 %

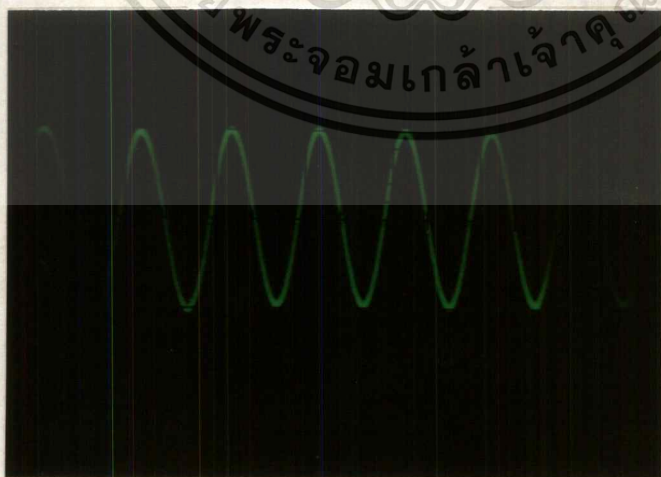
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กค่า 1 KG

#### 4.4.2 การวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กมาตรฐานค่า 1 KG โดยการใช้ ออสซิลโลสโคป

##### การทดลอง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4.1 แต่ต่อเอาต์พุตเป็นออสซิลโลสโคปวัดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแทน

##### ผลการทดลอง

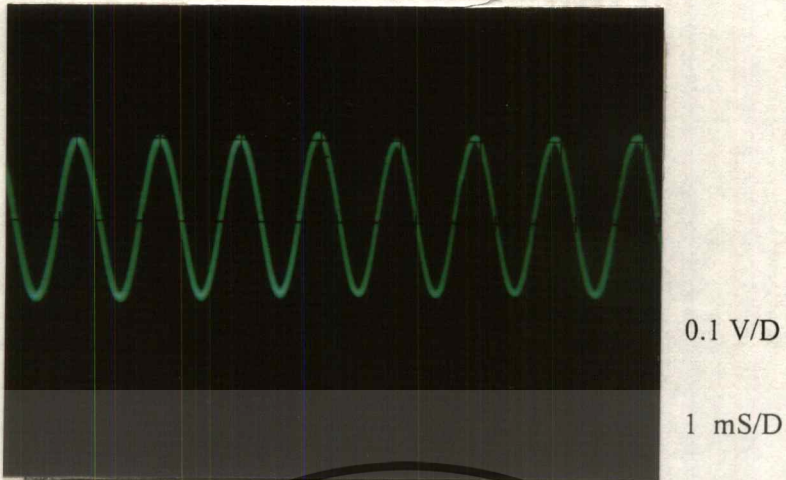


50 mV/D

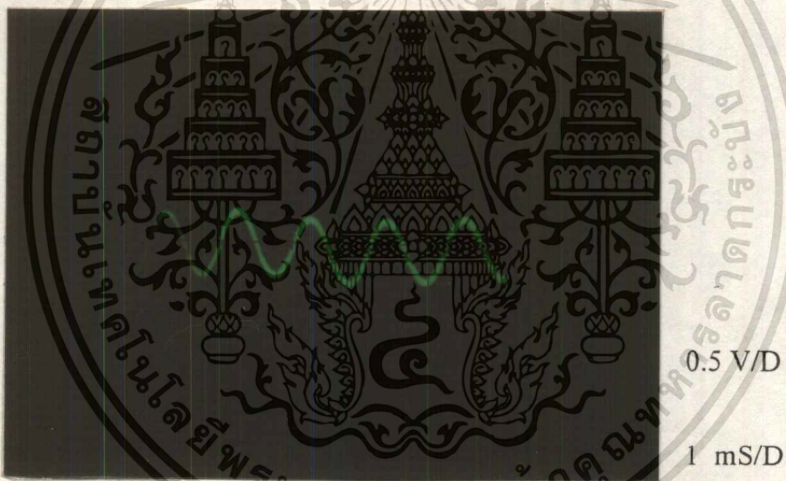
1 mS/D

รูปที่ 4.5 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก 1KG โดยใช้ย่านการวัด 20K

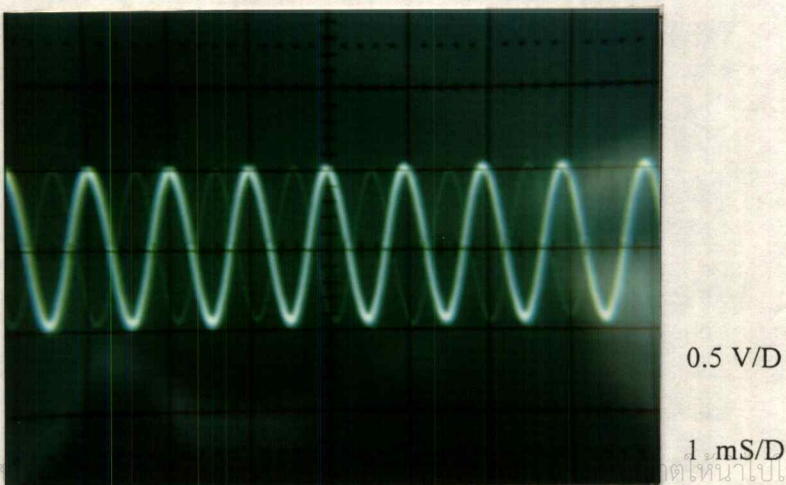
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก 1KG โดยใช้ย่านการวัด 10K



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก 1KG โดยใช้ย่านการวัด 5K



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก 1KG โดยใช้ย่านการวัด 2K

## บทที่ 5

### บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และการพัฒนา

#### 5.1 สรุป

เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข ที่นำเสนอในปริญญาานิพนธ์นี้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการทำงาน และสร้างเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก โดยอาศัยการแสดงผลแบบตัวเลข เมื่อสร้างเสร็จแล้วหลังจากทำการทดลอง วัดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กมาตรฐานผลปรากฏว่า มีความคลาดเคลื่อนในการวัดเพียงเล็กน้อยประมาณ  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กได้ตั้งแต่ 20 เกาส์ ถึง 20 กิโลเกาส์

#### 5.2 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

หลังจากที่ออกแบบ และสร้างวงจรส่วนแสดงผลเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลขแล้ว สามารถพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น ดังพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ปัญหาสัญญาณรบกวนจากภาคจ่ายไฟ เนื่องจากตัวไอซีตัวเดียว เบอร์ ICL7106 มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้น ในย่านวัดที่ต้องการความละเอียดสูงจึงมักเกิดสัญญาณรบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระเพื่อมของแรงดันที่จ่ายมาจากแหล่งจ่ายไฟ

การแก้ไขปัญหามาสามารถทำได้โดยการแยกภาคจ่ายไฟออกเป็น 2 ชุด โดยชุดหนึ่งจ่ายให้กับวงจรส่วนการวัดค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก และอีกส่วนหนึ่งจ่ายให้กับวงจรส่วนแสดงผล โดยในส่วนของวงจรภาคแสดงผลแหล่งจ่ายแรงดันที่สร้างขึ้นจะต้องใช้แหล่งจ่ายที่มีประสิทธิภาพ และมีเสถียรภาพที่ดี ซึ่งจะต้องอาศัยการป้องกันสัญญาณรบกวนที่คิพอ ส่วนอีกแนวทางหนึ่งซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ใช้ในการแก้ไขปัญหานี้คือ การใช้แบตเตอรี่ ขนาด 9 โวลต์ เป็นตัวจ่ายแรงดันซึ่งสามารถแก้ปัญหานั้นได้

2. ปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุปกรณ์ เช่น ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน โดยจะมีผลทำให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ มีความคลาดเคลื่อนจนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเหตุให้การปรับศูนย์อัตโนมัติของไอซี 7106 มีความไม่แน่นอนส่งผลให้ค่าแรงดันอ้างอิงที่  
ตั้งเอาไว้แปรเปลี่ยนไป ดังนั้นการแสดงผลในกรณีที่ปรับศูนย์จึงไม่สามารถทำได้

การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดต่ำมาใช้ โดยใช้ตัวต้านทานชนิดที่มีค่าความผิดพลาด  $\pm 1$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ตัวเก็บประจุ  
ที่มีคุณภาพดีซึ่งจะทำให้ลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับไอซี 7106 ได้

3. ปัญหาการปรับศูนย์ในการวัดค่าความเข้มแสงแม่เหล็กไม่สามารถทำได้เนื่องจาก  
จากสาเหตุ 2 ประการ คือการเสื่อมสภาพของหัววัด และการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน  
ตามที่ออกแบบไว้ การเสื่อมสภาพของหัววัด (Probe) มีสาเหตุมาจากการที่หัววัดได้รับความ  
กระทบกระเทือนอย่างรุนแรง หรือการใช้หัววัดผิดวิธี เมื่อหัววัดเสื่อมสภาพจะทำให้การปรับ  
สมดุลย์แรงดันเพื่อหักล้างอำนาจสนามแม่เหล็กที่ค้างอยู่ในหัววัดไม่สามารถทำได้ ส่วนสาเหตุ  
จากการใช้อุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐานจะส่งผลให้วงจรภาคสมดุลย์ทำงานผิดพลาด

การแก้ปัญหานี้ ถ้าหากปัญหาเกิดจากหัววัดเสื่อมสภาพจะไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้  
นอกจากการเปลี่ยนหัววัดอันใหม่ ส่วนปัญหาที่เกิดจากการจัดหาอุปกรณ์ไม่ได้ตามมาตรฐาน  
นั้นสามารถทำได้โดยการสั่งซื้ออุปกรณ์จากต่างประเทศที่ได้ตามมาตรฐานมาใช้โดยทางคณะ  
ผู้จัดทำได้สั่งซื้อจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย ซึ่งควรจะสั่งซื้อล่วงหน้า

4. ปัญหาเรื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กไม่สามารถแสดงขั้วแม่เหล็กได้ ปัญหา  
นี้มีสาเหตุมาจากการเชื่อมต่อวงจรส่วนการวัดขั้วแม่เหล็กกับวงจรส่วนแสดงขั้วแม่เหล็กไม่  
สามารถทำได้เนื่องจากการใช้กราวด์อ้างอิงต่างกันจึงทำให้วงจรเปรียบเทียบไม่สามารถเปรียบเทียบ  
ค่าความแตกต่างได้

การแก้ปัญหานี้มีแนวทางการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

1. การสร้างวงจรเลียนแบบส่วนการวัดขั้วแม่เหล็กเพิ่มเข้ามาอีกวงจรหนึ่ง โดยวง  
จรนี้จะเป็นอิสระจากการวัดขั้วแม่เหล็กโดยจะจ่ายกระแสคงที่ออกมา 50 ไมโครแอมป์ และใช้  
วงจรที่สร้างขึ้นนี้เป็นวงจรอ้างอิงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรการวัดขั้วแม่เหล็กเดิมที่จะ  
จ่ายกระแสออกมาตามขั้วแม่เหล็กที่ทำการวัด กล่าวคือถ้าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือวงจรจะจ่าย  
กระแสออกมา 78 ไมโครแอมป์ ส่วนถ้าเป็นขั้วใต้วงจรจะจ่ายกระแสออกมา 22 ไมโครแอมป์  
แล้วนำค่ากระแสที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวงจรที่สร้างขึ้นมาใหม่เพื่อนำไปใช้ในการแสดงขั้วแม่  
เหล็กที่ได้จากการวัด

2. การอ่านค่ากระแสจากจอ LCD โดยการเปลี่ยนวงจรส่วนการแสดงผลแบบตัว

เลขซึ่งเป็นการแสดงค่าแรงดันให้เป็นการแสดงค่ากระแสแทนซึ่งทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า 1 กิโลโหม้ม ขนานที่อินพุตของไอซี เบอร์ ICL7106 เพื่อให้สามารถวัดค่ากระแสได้ โดยถ้าอ่านค่ากระแสได้ประมาณ 78 ไมโครแอมป์แสดงว่าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ แต่ถ้าหากอ่านค่าได้ประมาณ 22 ไมโครแอมป์แสดงว่าแสดงว่าขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วใต้

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

เนื่องจากเครื่องวัดความเข้มเส้นทรงแม่เหล็กแบบตัวเลขนี้มีความสามารถเพียงรูปแบบการแสดงผลจากหน้าปัทม์แบบเข็มเป็นแบบแสดงผลตัวเลขเท่านั้น ในการพัฒนาสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของส่วนแสดงผลของการวัด
2. การใช้ส่วนแสดงผลเป็นแบบ LCD DOT MATRIX สามารถแสดงได้ทั้งตัวอักษรและตัวเลข
3. เพิ่มหน่วยความจำเพื่อบันทึกผลการวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก และสามารถเรียกข้มมูออกมาดูได้ โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการจัดการทางด้านซอฟต์แวร์
4. สามารถทำการวัดโดยวิธีการเปลี่ยนย่านการวัดอัตโนมัติ เพื่อความสะดวกในการวัดมากขึ้น
5. ลดขนาดของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อสามารถพกพาไปได้สะดวก และใช้กับแบตเตอรี่ได้

ซึ่งแนวทางในการพัฒนาทั้งหมดที่กล่าวไปแล้ว เพื่อให้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลขนั้น มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งน่าจะมีการพัฒนาให้เป็นไปได้ โดยส่วนสำคัญของการพัฒนาจะอยู่ที่การพัฒนาทางด้านซอฟต์แวร์ และการควบคุมการทำงานโดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาช่วยควบคุมการทำงาน

ภาคผนวก ก  
รูปเครื่องต้นแบบของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข





รูปที่ 1 ด้านหน้าของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

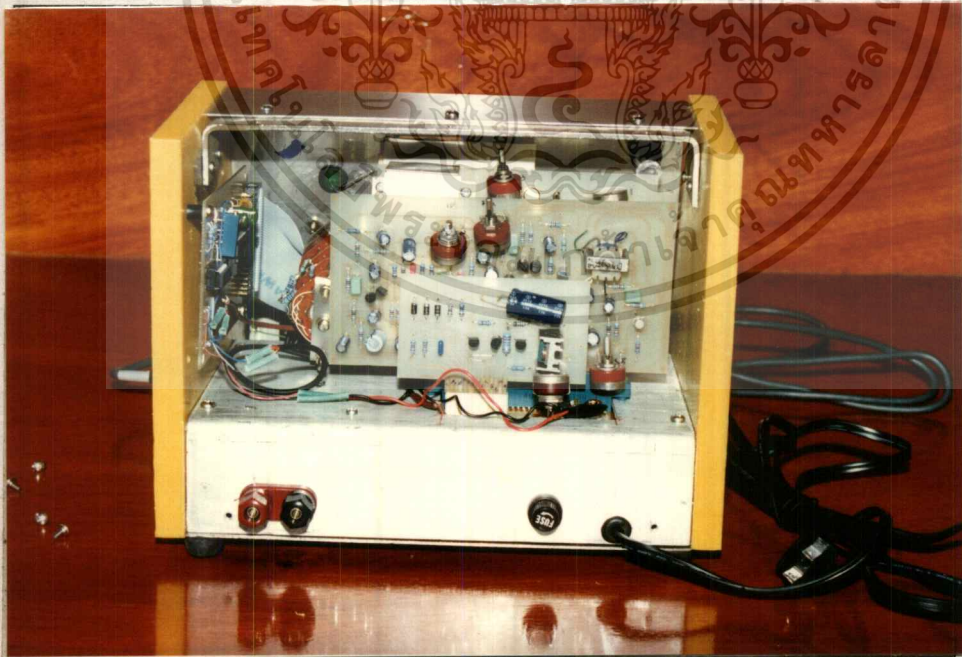


รูปที่ 2 ด้านหลังของเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

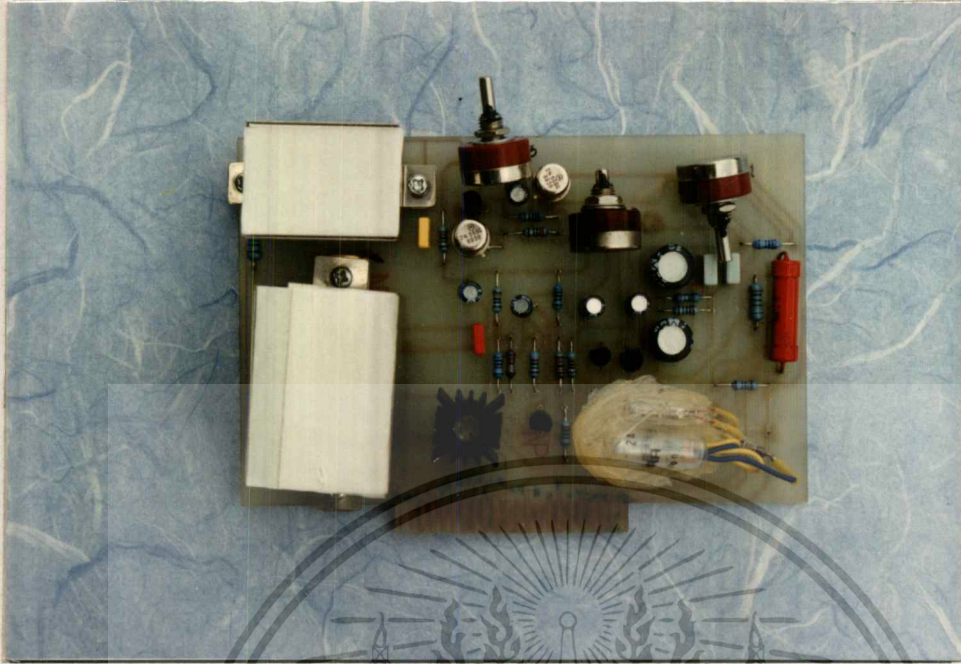


รูปที่ 3 หัววัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

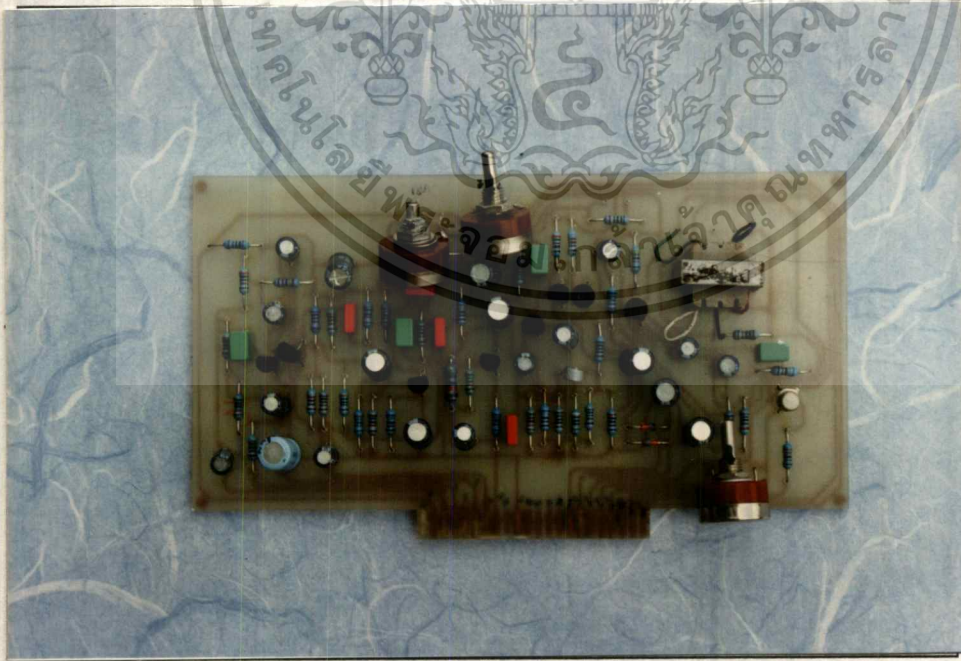


รูปที่ 4 ภายในเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

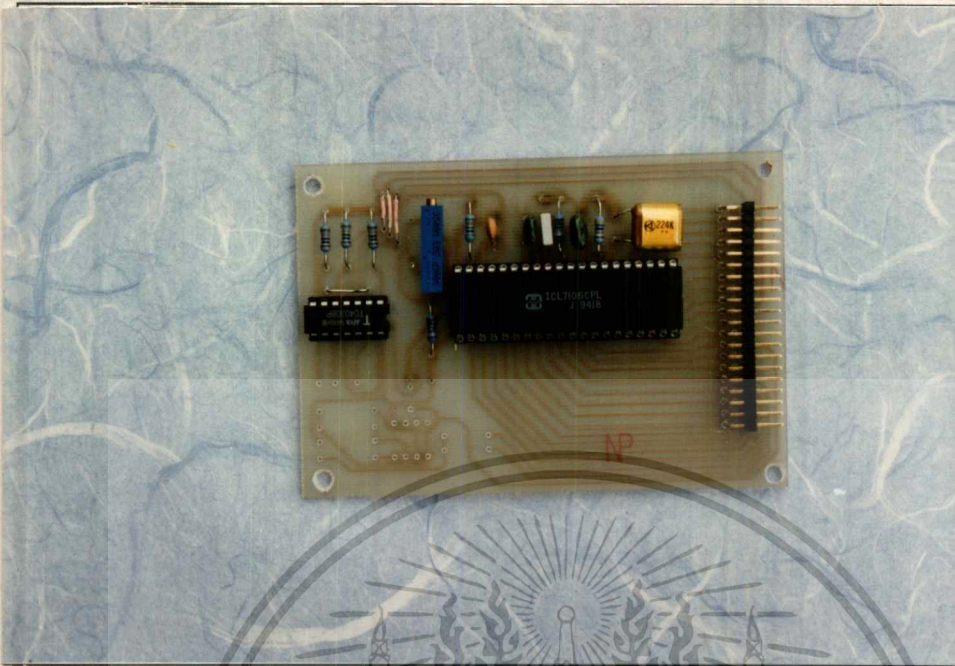


รูปที่ 5 แผงวงจรจ่ายกระแสคงที่



รูปที่ 6 แผงวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แผงวงจรส่วนแสดงผล



รูปที่ 8 จอแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

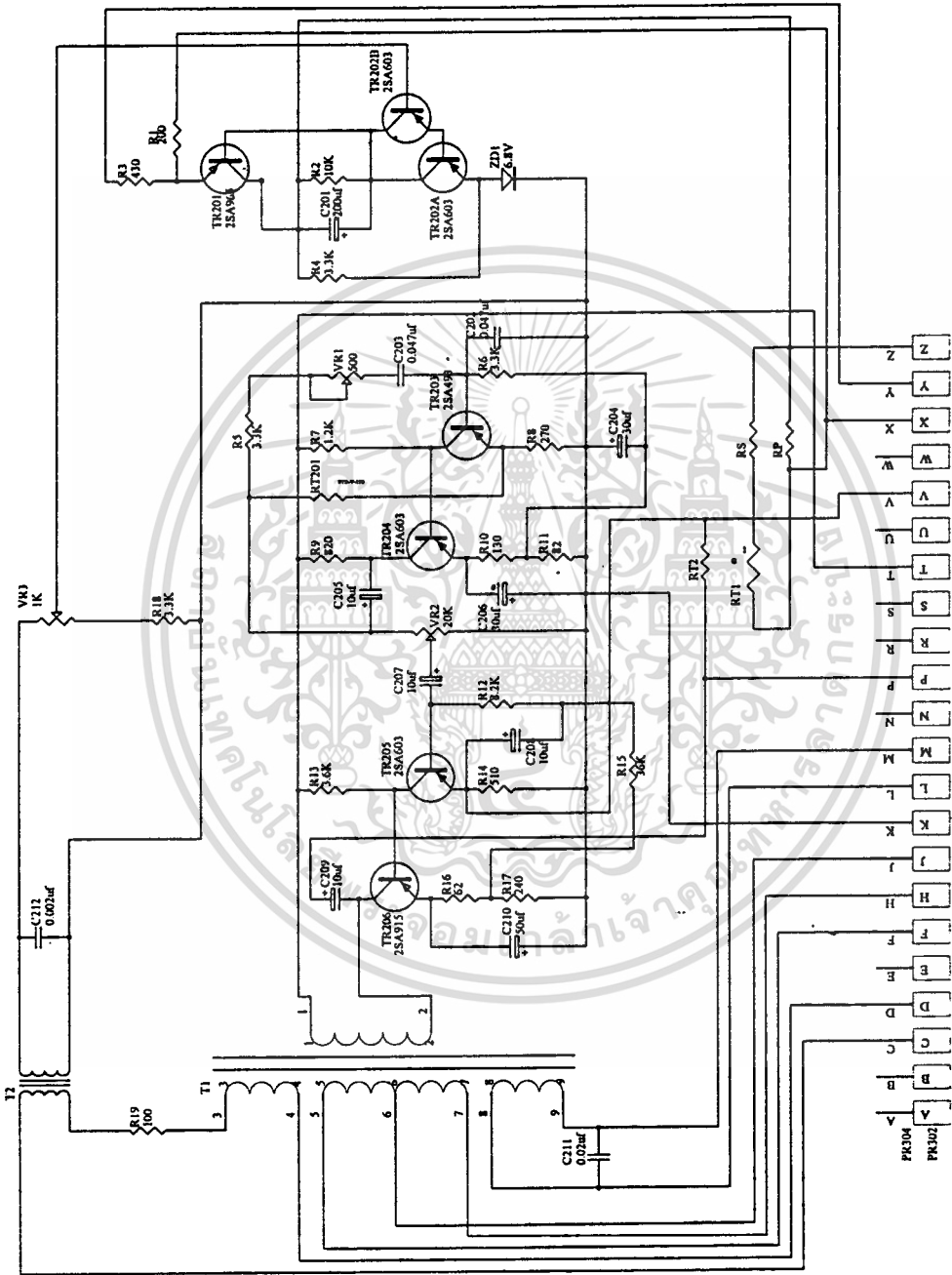
ภาคผนวก ข

วงจร และแผ่นวงจรพิมพ์ของเครื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กแบบตัวเลข



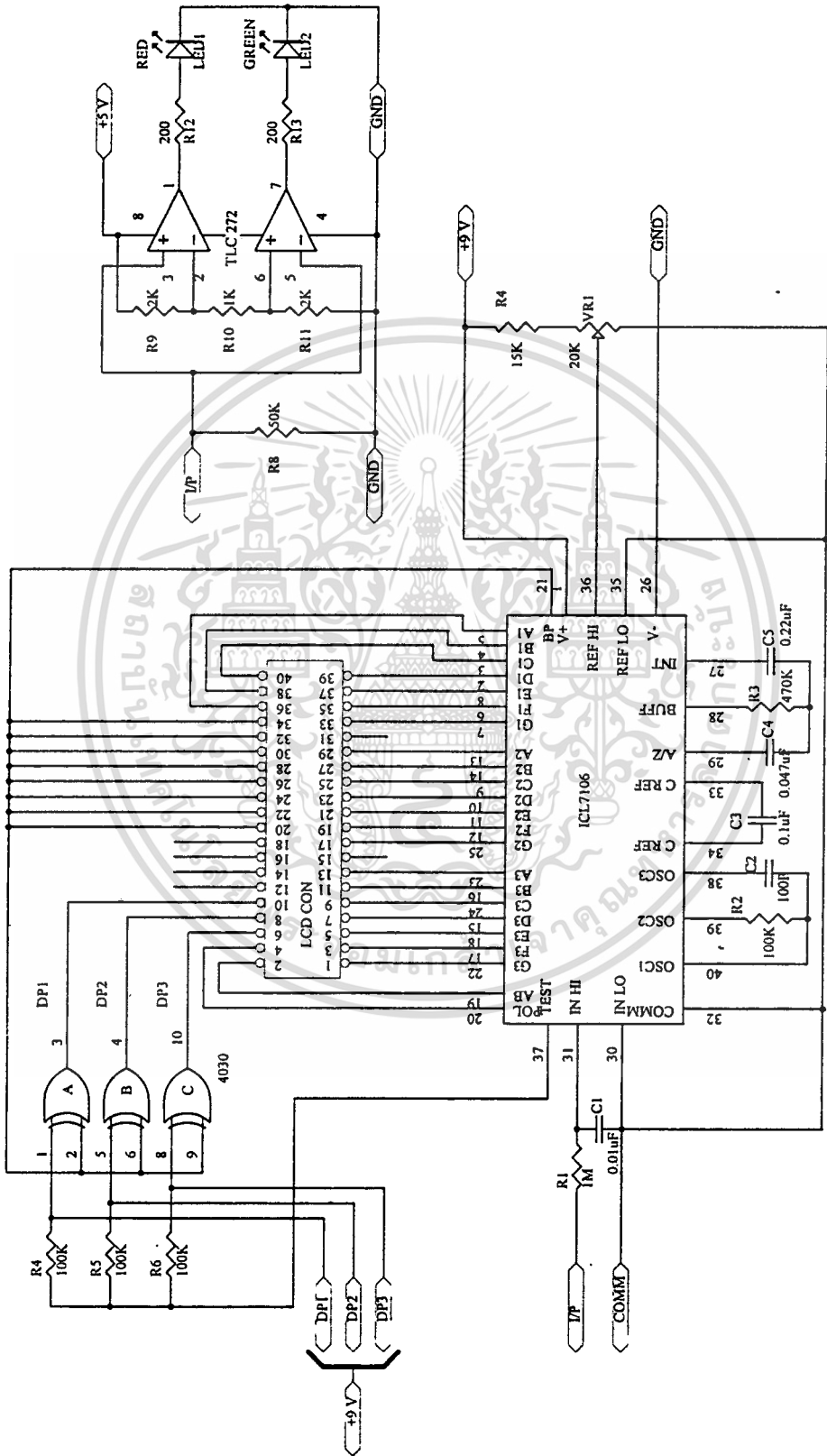
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





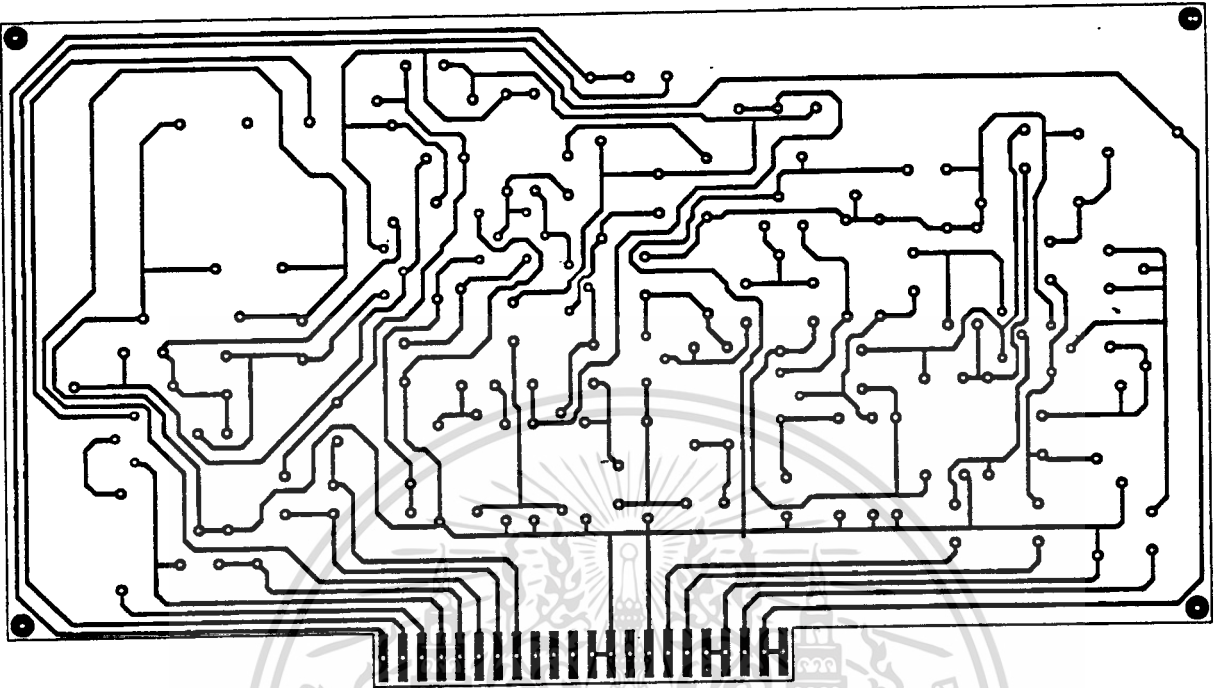
วงจรรหัสย้ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

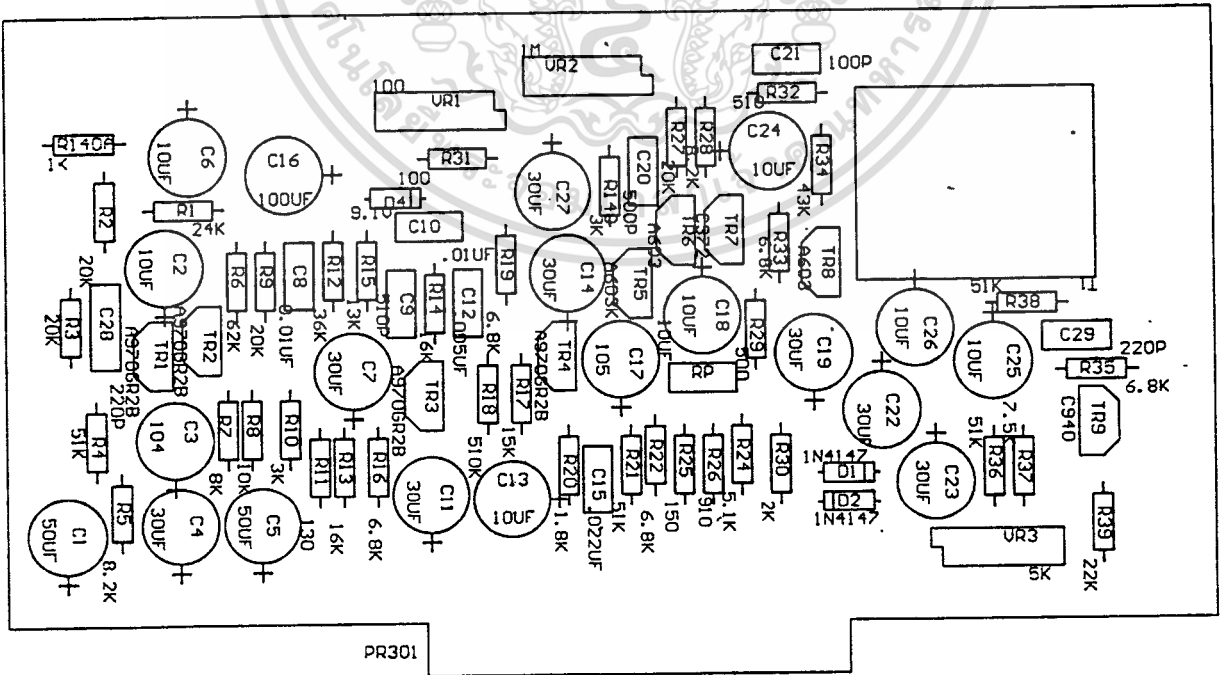


วงจรแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



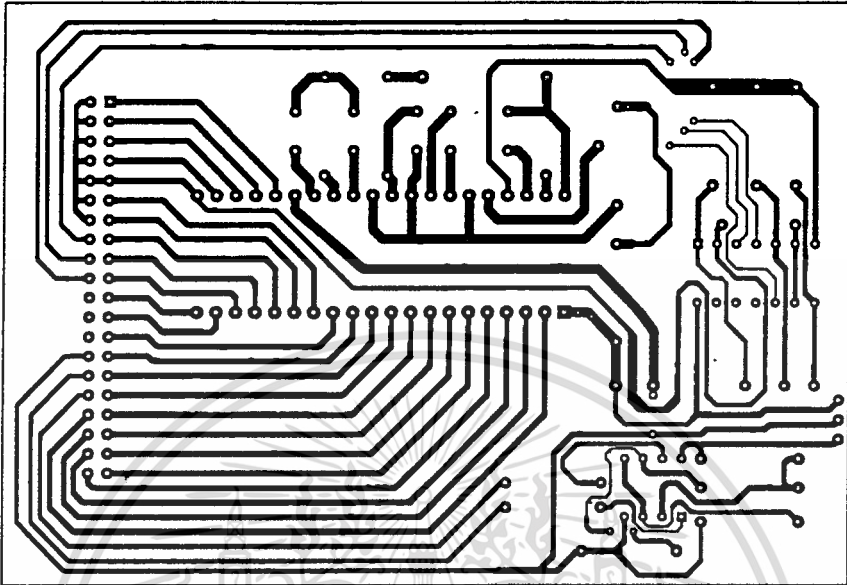
แผ่นวงจรพิมพ์วงจรขยาย



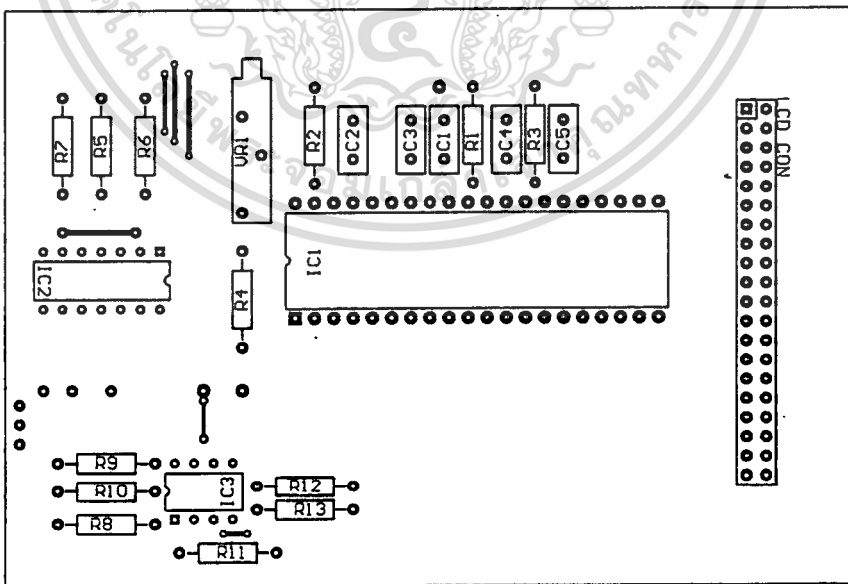
ด้านการลงอุปกรณ์วงจขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



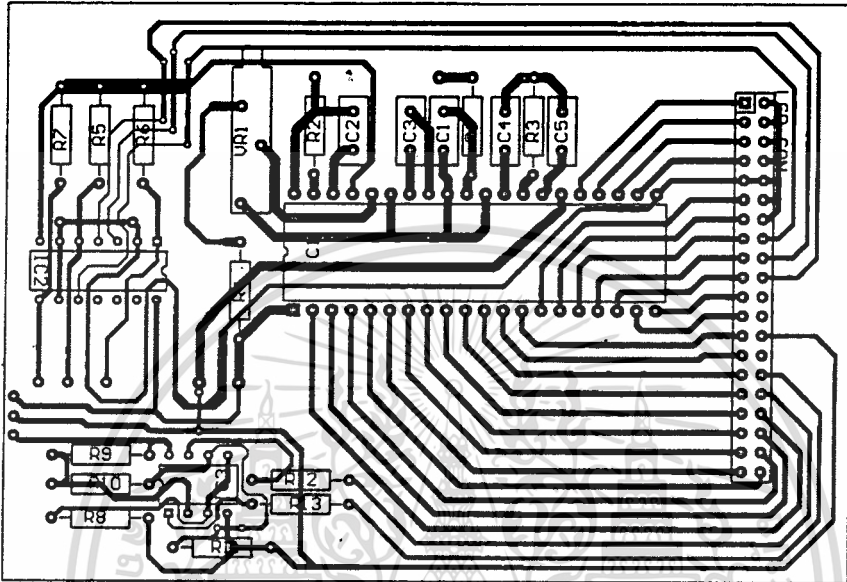


แผ่นวงจรพิมพ์วงจรส่วนแสดงผล



ด้านการลงอุปกรณ์วงจรส่วนแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การลงอุปกรณ์วงจรภาคแสดงผลลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานเครื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กแบบตัวเลข



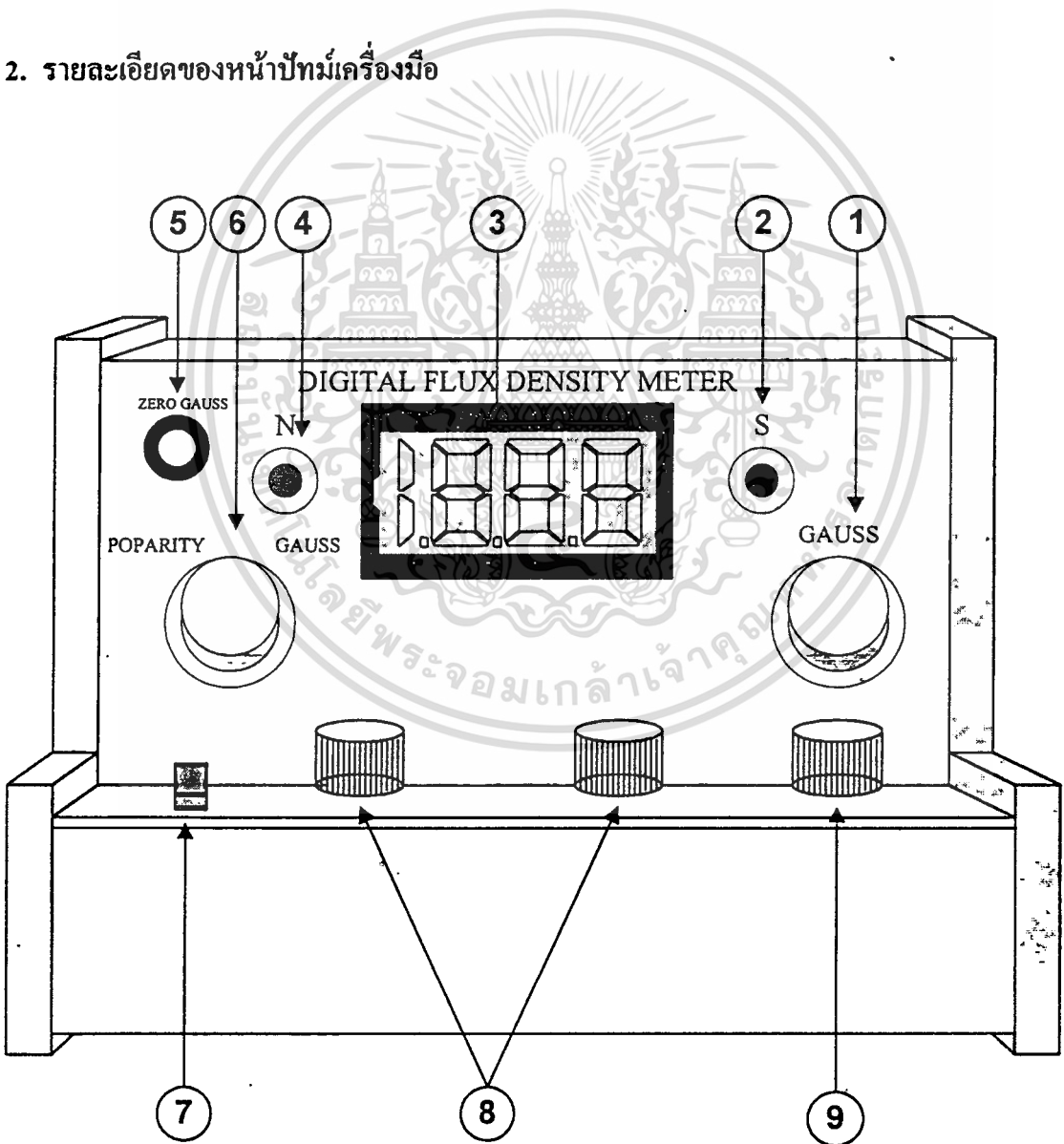
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คู่มือการใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

### 1. กล่าวนำ

ก่อนที่จะลงมือใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข ควรจะทำการศึกษาการใช้งานจากคู่มือให้เข้าใจเพื่อผลการวัดค่าที่ถูกต้อง และเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมือวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

### 2. รายละเอียดของหน้าปัทม์เครื่องมือ



1. สวิตช์เลือกย่านการวัด
2. จอแสดงผล LCD
3. หลอด LED แสดงขั้วได้
4. หลอด LED แสดงขั้วเหนือ
5. ช่องเสียบหัววัดเพื่อปรับศูนย์
6. สวิตช์เลือกโหมดการวัด
7. สวิตช์เปิด-ปิด เครื่อง
8. ปุ่มปรับศูนย์แบบละเอียด
9. ปุ่มปรับศูนย์แบบหยาบ

### 3. คุณสมบัติของเครื่องวัดความเข้มแสงแม่เหล็กแบบตัวเลข

3.1 หลักการวัด	ใช้การจ่ายกระแสคงที่ 7.5 มิลลิแอมป์ ให้แก่หัววัดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิดเยอรมันเนียม
3.2 ย่านการวัด	วัดได้ตั้งแต่ 20, 50, 100, 200, 500, 1K, 2K, 5K, 10K และ 20K
3.3 ตัวแสดงผล	ใช้ LCD ขนาด 3.5 หลัก ความสูง 0.5 นิ้ว
3.4 การแสดงขั้วแม่เหล็ก	ใช้ LED เป็นตัวแสดงผล
3.5 ความถี่ของสนามแม่เหล็ก	วัดได้ตั้งแต่ 0-500 เฮิร์ต
3.6 ความเที่ยงตรง	(สำหรับการอ่านแบบเต็มสเกล) ±0.25% ที่ย่านวัด 20G,50G,100G,200G,500G ±0.5% ที่ย่านวัด 1KG,2KG,5KG,10KG,20KG
3.7 ความผิดพลาด	±5%
3.8 เอาต์พุตภายนอก	สามารถต่อวัดกับออสซิลโลสโคปได้
3.9 แหล่งจ่ายพลังงาน	ไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ ±20 โวลต์ ความถี่ 50-60 เฮิร์ต
3.10 ขนาดของเครื่องวัด	ประมาณ 194 x 250 x 235 มิลลิเมตร
3.11 ขนาดของหัววัด	0.8 x 3.2 x 8.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การใช้งานเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

4.1 ต่อหัววัดเข้ากับเครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก

4.2 ตั้งย่านการวัดไว้ที่ 1KG

4.3 เปิดสวิตช์ให้เครื่องทำงานทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที เพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้

อย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 นำหัววัดสอดเข้าไปในช่อง Zero Gauss

4.5 ทำการปรับปุ่มศูนย์ ( Zero adjust) ให้ตัวเลขที่จอ LCD แสดงค่าศูนย์

4.6 ถ้าไม่ทราบค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กที่จะวัดให้ตั้งย่านการวัดไว้ที่ย่านสูงๆ

เสมอ หลังจากนั้นปฏิบัติเหมือนในข้อ 4 และข้อ 5

4.7 นำหัววัดไปวัดแท่งแม่เหล็กที่ต้องการวัด

4.8 อ่านค่าที่วัดได้บนจอ LCD

#### 5. ข้อควรระวังในการใช้เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบตัวเลข

5.1 อย่าเปิดสวิตช์ไฟเมื่อไม่ได้ต่อหัววัด

5.2 เมื่อไม่ทราบค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ต้องตั้งย่านการวัดไว้ที่ย่านสูงๆก่อนเสมอ

5.3 หัววัดที่ใช้วัด มีความเปราะบางมากจะต้องไม่ให้ได้รับแรงกระทบกระเทือนดังนั้น

เมื่อไม่ได้ใช้งานควรที่จะเก็บไว้ในกล่องที่ป้องกันการกระทบกระเทือนได้ดี

#### 6. การบำรุงรักษา

6.1 ฟิวส์ขาด

ถ้าหลอดไฟแสดงการทำงานไม่ติด และค่าที่แสดงบน LCD ไม่เท่ากับ 1000 เมื่อเปิดสวิตช์ให้เครื่องทำงานแสดงว่าฟิวส์ขาด

6.2 ความผิดพลาดของหัววัด

ถ้าการปรับศูนย์ไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้พอดี กรณีนี้อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นกับหัววัด

6.3 ความสกปรกของหน้าสัมผัส

กรณีนี้จะทำให้การปรับศูนย์ไม่สามารถทำได้เนื่องจากหน้าสัมผัสของตัวต้านทานปรับค่าได้เกิดความสกปรก การแก้ไขทำได้โดยการหมุนตัวต้านทานกลับไปกลับมาหลายๆครั้ง

ภาคผนวก ง

รายการข้อมูล และคุณสมบัติของอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ICL7106, ICL7107

## 3 1/2 Digit LCD/LED Display A/D Converter

December 1993

### Features

- Guaranteed Zero Reading for 0V Input on All Scales
- True Polarity at Zero for Precise Null Detection
- 1pA Typical Input Current
- True Differential Input and Reference, Direct Display Drive
  - LCD ICL7106
  - LED ICL7107
- Low Noise - Less Than 15µVp-p
- On Chip Clock and Reference
- Low Power Dissipation - Typically Less Than 10mW
- No Additional Active Circuits Required
- New Small Outline Surface Mount Package Available

### Description

The Harris ICL7106 and ICL7107 are high performance, low power 3 1/2 digit A/D converters. Included are seven segment decoders, display drivers, a reference, and a clock. The ICL7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a multiplexed backplane drive; the ICL7107 will directly drive an instrument size light emitting diode (LED) display.

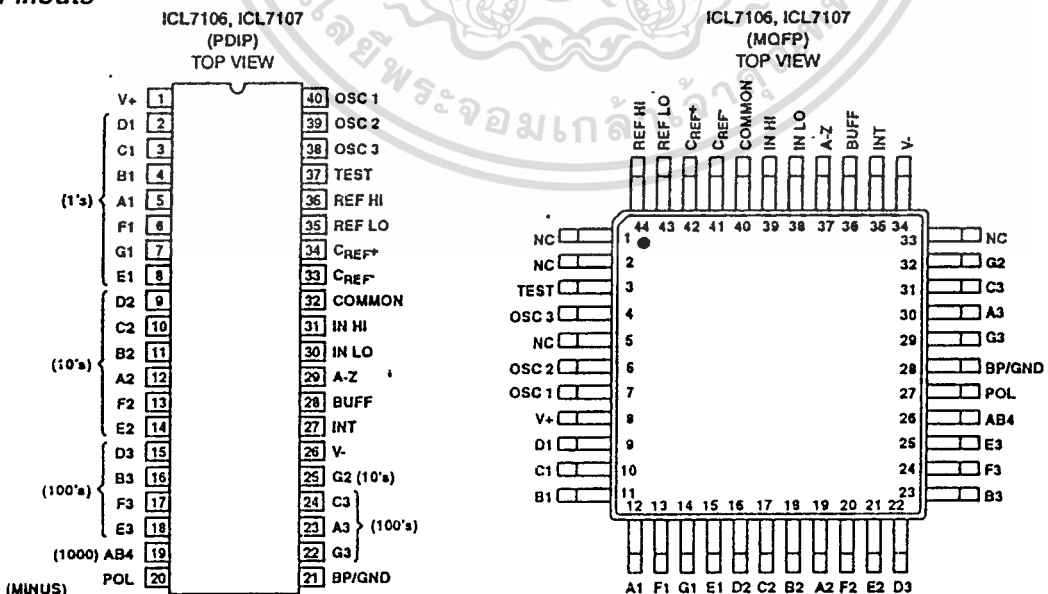
The ICL7106 and ICL7107 bring together a combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features auto-zero to less than 10µV, zero drift of less than 1µV/°C, input bias current of 10pA max., and rollover error of less than one count. True differential inputs and reference are useful in all systems, but give the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge type transducers. Finally, the true economy of single power supply operation (ICL7106), enables a high performance panel meter to be built with the addition of only 10 passive components and a display.

### Ordering Information

PART NUMBER	TEMPERATURE RANGE	PACKAGE
ICL7106CPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP
ICL7106RCPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP (Note 1)
ICL7106CM44	0°C to +70°C	44 Lead Metric Plastic Quad Flatpack
ICL7107CPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP
ICL7107RCPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP (Note 1)
ICL7107CM44	0°C to +70°C	44 Lead Metric Plastic Quad Flatpack

NOTE: 1. "R" indicates device with reversed leads.

### Pinouts



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Specifications ICL7106, ICL7107

## Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	
ICL7106, V+ to V-	15V
ICL7107, V+ to GND	6V
ICL7107, V- to GND	-9V
Analog Input Voltage (Either Input) (Note 1)	V+ to V-
Reference Input Voltage (Either Input)	V+ to V-
Clock Input	
ICL7106	TEST to V+
ICL7107	GND to V+

## Thermal Information

Thermal Resistance (MAX, See Note 1)	$\theta_{JA}$
40 Pin Plastic Package	50°C/W
44 Pin MQFP Package	80°C/W
Maximum Power Dissipation	
ICL7106	1.0W
ICL7107	1.2W
Operating Temperature Range	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering 10s Max)	+265°C
Junction Temperature	+150°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

## Electrical Specifications (Note 3)

PARAMETERS	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
SYSTEM PERFORMANCE					
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0V$ , Full-Scale = 200mV	-000.0	±000.0	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF}$ , $V_{REF} = 100mV$	999	999/1000	1000	Digital Reading
Rollover Error	$-V_{IN} = +V_{IN} \approx 200mV$ Difference in Reading for Equal Positive and Negative Inputs Near Full-Scale	-	±0.2	±1	Counts
Linearity	Full-Scale = 200mV or Full-Scale = 2V Maximum Deviation from Best Straight Line Fit (Note 5)	-	±0.2	±1	Counts
Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = 1V$ , $V_{IN} = 0V$ , Full-Scale = 200mV (Note 5)	-	50	-	μV/V
Noise	$V_{IN} = 0V$ , Full-Scale = 200mV (Pk-Pk Value Not Exceeded 95% of Time)	-	15	-	μV
Leakage Current Input	$V_{IN} = 0$ (Note 5)	-	1	10	pA
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0$ , $0^\circ < T_A < +70^\circ C$ (Note 5)	-	0.2	1	μV/°C
Scale Factor Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199mV$ , $0^\circ < T_A < +70^\circ C$ , (Ext. Ref. 0ppm/°C) (Note 5)	-	1	5	ppm/°C
End Power Supply Character V+ Supply Current	$V_{IN} = 0$ (Does Not Include LED Current for ICL7107)	-	0.8	1.8	mA
End Power Supply Character V- Supply Current	ICL7107 Only	-	0.6	1.8	mA
COMMON Pin Analog Common Voltage	25kΩ Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	2.4	2.8	3.2	V
Temperature Coefficient of Analog Common	25kΩ Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	-	80	-	ppm/°C
DISPLAY DRIVER ICL7106 ONLY					
Pk-Pk Segment Drive Voltage	$V_{+} = \text{to } V_{-} = 9V$ , (Note 4)	4	5	6	V
Pk-Pk Backplane Drive Voltage					

ICL7106, ICL7107

Electrical Specifications (Note 3) (Continued)

PARAMETERS	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
ICL7107 ONLY					
Segment Sinking Current (Except Pin 19 and 20)	V+ = 5V, Segment Voltage = 3V	5	8	-	mA
Pin 19 Only		10	16	-	mA
Pin 20 Only		4	7	-	mA

NOTES:

1. Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to  $\pm 100\mu\text{A}$ .
2. Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board.
3. Unless otherwise noted, specifications apply to both the ICL7106 and ICL7107 at  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $f_{\text{CLOCK}} = 48\text{kHz}$ . ICL7106 is tested in the circuit of Figure 1. ICL7107 is tested in the circuit of Figure 2.
4. Back plane drive is in phase with segment drive for 'off' segment,  $180^\circ$  out of phase for 'on' segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.
5. Not tested, guaranteed by design.

Typical Applications and Test Circuits

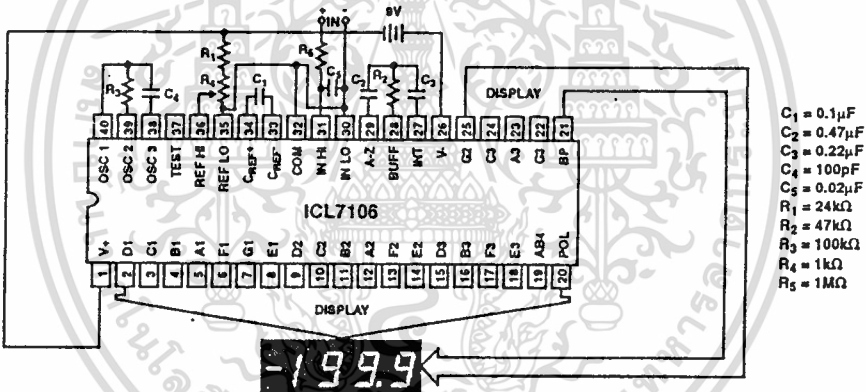


FIGURE 1. ICL7106 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LCD DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL-SCALE

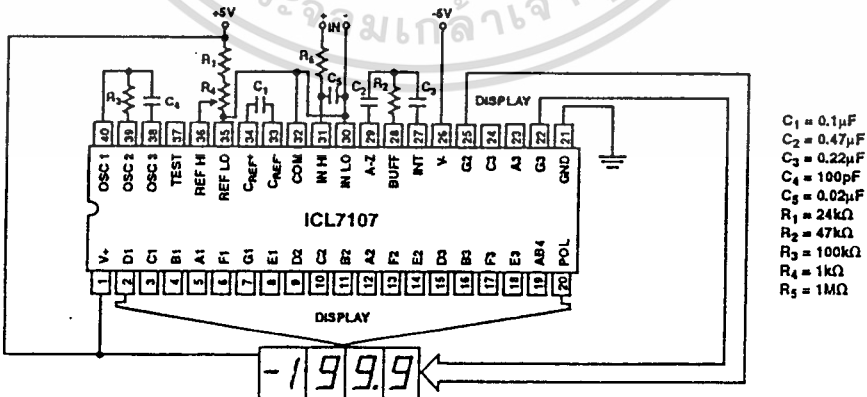


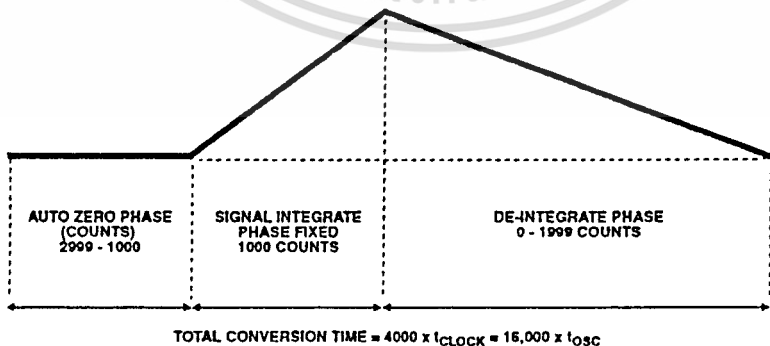
FIGURE 2. ICL7107 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LED DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL-SCALE

## ICL7106, ICL7107

## Design Information Summary Sheet

- **OSCILLATOR FREQUENCY**  
 $f_{OSC} = 0.45/RC$   
 $C_{OSC} > 50pF$ ;  $R_{OSC} > 50K\Omega$   
 $f_{OSC} \text{ Typ.} = 48KHz$
- **OSCILLATOR PERIOD**  
 $t_{OSC} = RC/0.45$
- **INTEGRATION CLOCK FREQUENCY**  
 $f_{CLOCK} = f_{OSC}^4$
- **INTEGRATION PERIOD**  
 $t_{INT} = 1000 \times (4/f_{OSC})$
- **60/50Hz REJECTION CRITERION**  
 $t_{INT}/t_{50Hz}$  or  $t_{INT}/t_{60Hz} = \text{Integer}$
- **OPTIMUM INTEGRATION CURRENT**  
 $I_{INT} = 4.0\mu A$
- **FULL-SCALE ANALOG INPUT VOLTAGE**  
 $V_{INFS}$  Typically = 200mV or 2.0V
- **INTEGRATE RESISTOR**  
 $R_{INT} = \frac{V_{INFS}}{I_{INT}}$
- **INTEGRATE CAPACITOR**  
 $C_{INT} = \frac{(t_{INT})^2 (I_{INT})}{V_{INT}}$
- **INTEGRATOR OUTPUT VOLTAGE SWING**  
 $V_{INT} = \frac{(I_{INT})^2 (t_{INT})}{C_{INT}}$
- **$V_{INT}$  MAXIMUM SWING:**  
 $(V+ + 0.5V) < V_{INT} < (V+ - 0.5V)$ ,  $V_{INT}$  typically = 2.0V
- **DISPLAY COUNT**  
 $COUNT = 1000 \times \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$
- **CONVERSION CYCLE**  
 $t_{CYC} = t_{CLOCK} \times 4000$   
 $t_{CYC} = t_{OSC} \times 16,000$   
when  $f_{OSC} = 48KHz$ ;  $t_{CYC} = 333ms$
- **COMMON MODE INPUT VOLTAGE**  
 $(V- + 1.0V) < V_{IN} < (V+ - 0.5V)$
- **AUTO-ZERO CAPACITOR**  
 $0.01\mu F < C_{AZ} < 1.0\mu F$
- **REFERENCE CAPACITOR**  
 $0.1\mu F < C_{REF} < 1.0\mu F$
- **$V_{COM}$**   
Biased between  $V+$  and  $V-$ .
- **$V_{COM} \cong V+ - 2.8V$**   
Regulation lost when  $V+$  to  $V- < \cong 6.8V$ .  
If  $V_{COM}$  is externally pulled down to  $(V+ + V-)/2$ , the  $V_{COM}$  circuit will turn off.
- **ICL7106 POWER SUPPLY: SINGLE 9V**  
 $V+ - V- = 9V$   
Digital supply is generated internally  
 $V_{GND} \cong V+ - 4.5V$
- **ICL7106 DISPLAY: LCD**  
Type: Direct drive with digital logic supply amplitude.
- **ICL7107 POWER SUPPLY: DUAL  $\pm 5.0V$**   
 $V+ = +5.0V$  to GND  
 $V- = -5.0V$  to GND  
Digital Logic and LED driver supply  $V+$  to GND
- **ICL7107 DISPLAY: LED**  
Type: Non-Multiplexed Common Anode

## Typical Integrator Amplifier Output Waveform (INT Pin)



ICL7106, ICL7107

Detailed Description

Analog Section

Figure 3 shows the Analog Section for the ICL7106 and ICL7107. Each measurement cycle is divided into three phases. They are (1) auto-zero (A-Z), (2) signal integrate (INT) and (3) de-integrate (DE).

Auto-Zero Phase

During auto-zero three things happen. First, input high and low are disconnected from the pins and internally shorted to analog COMMON. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor  $C_{AZ}$  to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator, and comparator. Since the comparator is included in the loop, the A-Z accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than 10µV.

Signal Integrate Phase

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The converter then integrates the differential voltage between IN HI and IN LO for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range: up to 1V from either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, IN LO can be tied to analog COMMON to establish the correct common mode voltage. At the end of this phase, the polarity of the integrated signal is determined.

De-integrate Phase

The final phase is de-integrate, or reference integrate. Input low is internally connected to analog COMMON and input high is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the correct polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is:

$$DISPLAY\ COUNT = 1000 \left( \frac{V_{IN}}{V_{REF}} \right)$$

Differential Input

The input can accept differential voltages anywhere within the common mode range of the input amplifier, or specifically from 0.5V below the positive supply to 1.0V above the negative supply. In this range, the system has a CMRR of 86dB typical. However, care must be exercised to assure the integrator output does not saturate. A worst case condition would be a large positive common mode voltage with a near full-scale negative differential input voltage. The negative input signal drives the integrator positive when most of its swing has been used up by the positive common mode voltage. For these critical applications the integrator output swing can be reduced to less than the recommended 2V full-scale swing with little loss of accuracy. The integrator output can swing to within 0.3V of either supply without loss of linearity.

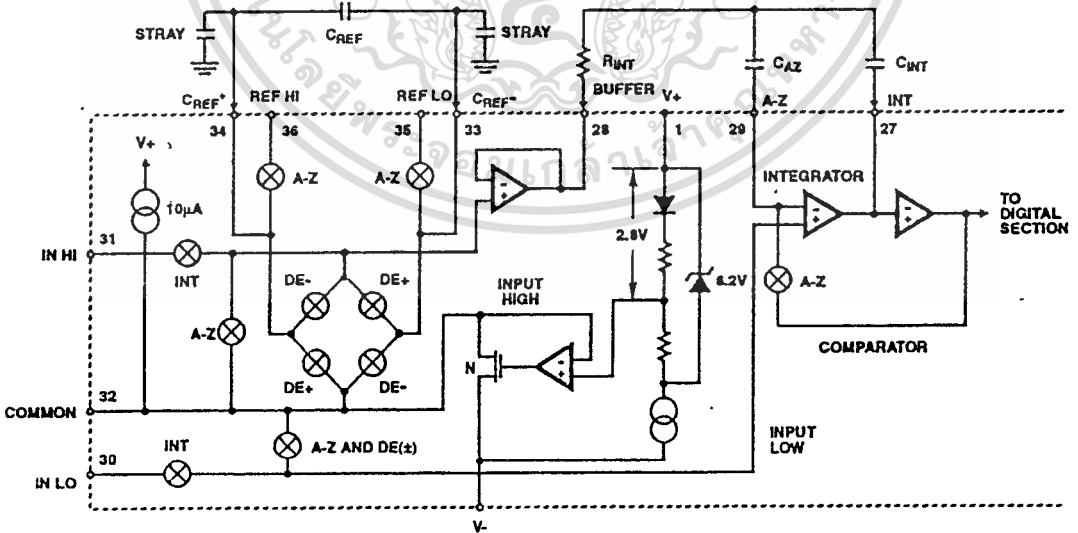


FIGURE 3. ANALOG SECTION OF ICL7106 AND ICL7107

## ICL7106, ICL7107

## Differential Reference

The reference voltage can be generated anywhere within the power supply voltage of the converter. The main source of common mode error is a roll-over voltage caused by the reference capacitor losing or gaining charge to stray capacity on its nodes. If there is a large common mode voltage, the reference capacitor can gain charge (increase voltage) when called up to de-integrate a positive signal but lose charge (decrease voltage) when called up to de-integrate a negative input signal. This difference in reference for positive or negative input voltage will give a roll-over error. However, by selecting the reference capacitor such that it is large enough in comparison to the stray capacitance, this error can be held to less than 0.5 count worst case. (See Component Value Selection.)

## Analog COMMON

This pin is included primarily to set the common mode voltage for battery operation (ICL7106) or for any system where the input signals are floating with respect to the power supply. The COMMON pin sets a voltage that is approximately 2.8V more negative than the positive supply. This is selected to give a minimum end-of-life battery voltage of about 6V. However, analog COMMON has some of the attributes of a reference voltage. When the total supply voltage is large enough to cause the zener to regulate ( $>7V$ ), the COMMON voltage will have a low voltage coefficient ( $0.001\%/V$ ), low output impedance ( $\approx 15\Omega$ ), and a temperature coefficient typically less than  $80\text{ppm}/^\circ\text{C}$ .

The limitations of the on chip reference should also be recognized, however. With the ICL7107, the internal heating which results from the LED drivers can cause some degradation in performance. Due to their higher thermal resistance, plastic parts are poorer in this respect than ceramic. The combination of reference Temperature Coefficient (TC), internal chip dissipation, and package thermal resistance can increase noise near full-scale from  $25\mu\text{V}$  to  $80\mu\text{Vp-p}$ . Also the linearity in going from a high dissipation count such as 1000 (20 segments on) to a low dissipation count such as 1111 (8 segments on) can suffer by a count or more. Devices with a positive TC reference may require several counts to pull out of an over-range condition. This is because over-range is a low dissipation mode, with the three least significant digits blanked. Similarly, units with a negative TC may cycle between over-range and a non-over-range count as the die alternately heats and cools. All these problems are of course eliminated if an external reference is used.

The ICL7106, with its negligible dissipation, suffers from none of these problems. In either case, an external reference can easily be added, as shown in Figure 4.

Analog COMMON is also used as the input low return during auto-zero and de-integrate. If IN LO is different from analog COMMON, a common mode voltage exists in the system and is taken care of by the excellent CMRR of the converter. However, in some applications IN LO will be set at a fixed known voltage (power supply common for instance). In this application, analog COMMON should be tied to the same point, thus removing the common mode voltage from the

converter. The same holds true for the reference voltage. If reference can be conveniently tied to analog COMMON, it should be since this removes the common mode voltage from the reference system.

Within the IC, analog COMMON is tied to an N channel FET that can sink approximately 30mA of current to hold the voltage 2.8V below the positive supply (when a load is trying to pull the common line positive). However, there is only  $10\mu\text{A}$  of source current, so COMMON may easily be tied to a more negative voltage thus overriding the internal reference.

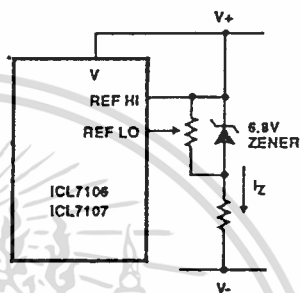


FIGURE 4A.

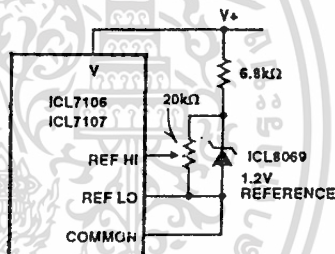


FIGURE 4B.

FIGURE 4. USING AN EXTERNAL REFERENCE

## TEST

The TEST pin serves two functions. On the ICL7106 it is coupled to the internally generated digital supply through a  $500\Omega$  resistor. Thus it can be used as the negative supply for externally generated segment drivers such as decimal points or any other presentation the user may want to include on the LCD display. Figures 5 and 6 show such an application. No more than a 1mA load should be applied.

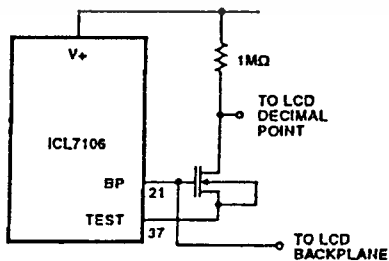


FIGURE 5. SIMPLE INVERTER FOR FIXED DECIMAL POINT

ICL7106, ICL7107

The second function is a "lamp test". When TEST is pulled high (to V+) all segments will be turned on and the display should read "1888". The TEST pin will sink about 15mA under these conditions.

**CAUTION:** In the lamp test mode, the segments have a constant DC voltage (no square-wave). This may burn the LCD display if maintained for extended periods.

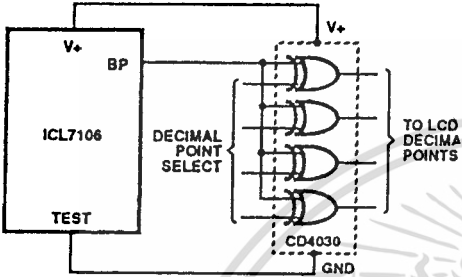


FIGURE 6. EXCLUSIVE 'OR' GATE FOR DECIMAL POINT DRIVE

Digital Section

Figures 7 and 8 show the digital section for the ICL7106 and ICL7107, respectively. In the ICL7106, an internal digital ground is generated from a 6V Zener diode and a large P-channel source follower. This supply is made stiff to absorb the relative large capacitive currents when the back plane (BP) voltage is switched. The BP frequency is the clock frequency divided by 800. For three readings/second this is a 60Hz square wave with a nominal amplitude of 5V. The segments are driven at the same frequency and amplitude and are in phase with BP when OFF, but out of phase when ON. In all cases negligible DC voltage exists across the segments.

Figure 8 is the Digital Section of the ICL7107. It is identical to the ICL7106 except that the regulated supply and back plane drive have been eliminated and the segment drive has been increased from 2mA to 8mA, typical for instrument size common anode LED displays. Since the 1000 output (pin 19) must sink current from two LED segments, it has twice the drive capability or 16mA.

In both devices, the polarity indication is "on" for negative analog inputs. If IN LO and IN HI are reversed, this indication can be reversed also, if desired.

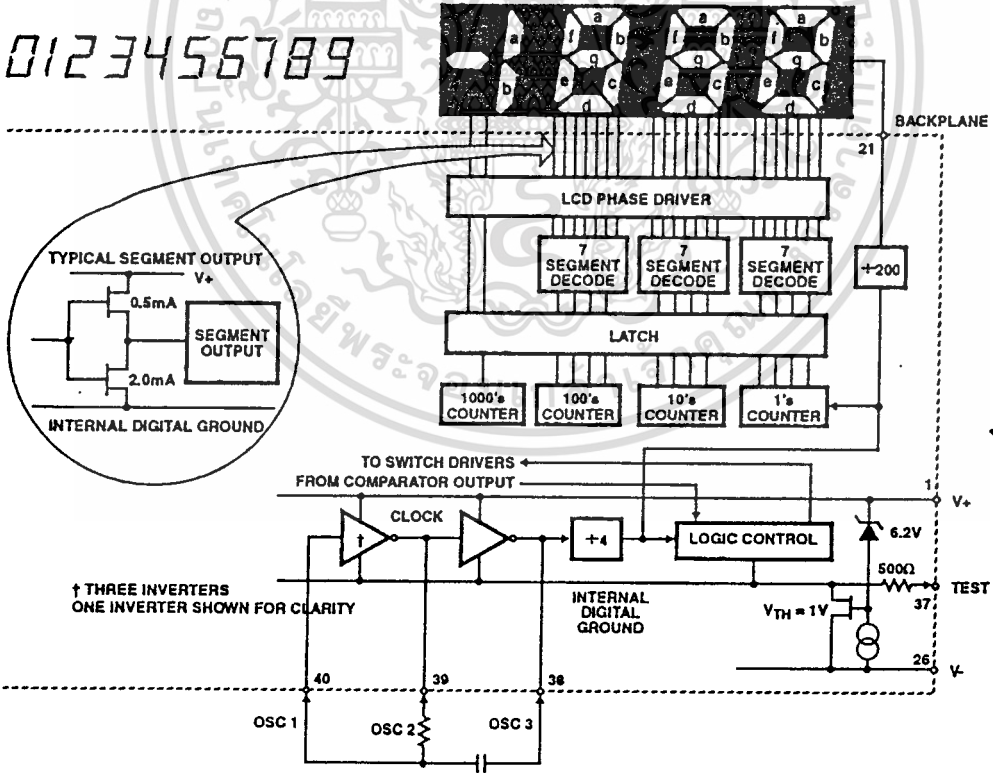


FIGURE 7. ICL7106 DIGITAL SECTION

ICL7106, ICL7107

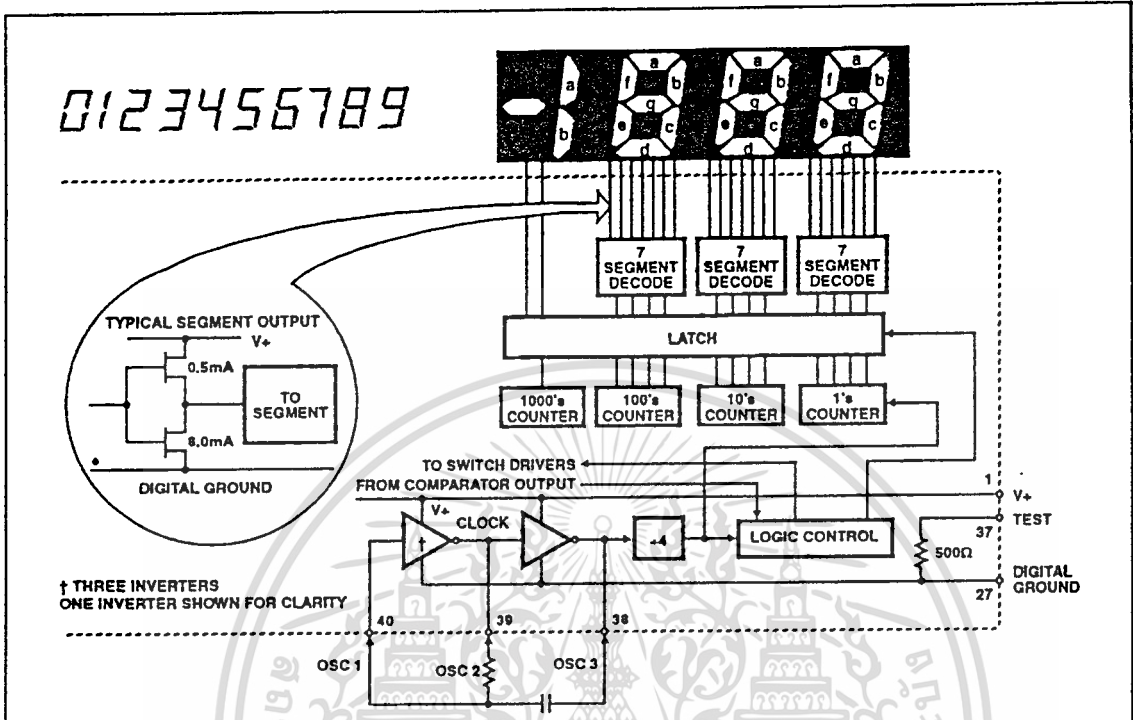


FIGURE 8. ICL7107 DIGITAL SECTION

System Timing

Figure 9 shows the clocking arrangement used in the ICL7106 and ICL7107. Two basic clocking arrangements can be used:

1. An external oscillator connected to pin 40.
2. An R-C oscillator using all three pins.

The oscillator frequency is divided by four before it clocks the decade counters. It is then further divided to form the three convert-cycle phases. These are signal integrate (1000 counts), reference de-integrate (0 to 2000 counts) and auto-zero (1000 to 3000 counts). For signals less than full-scale, auto-zero gets the unused portion of reference de-integrate. This makes a complete measure cycle of 4,000 counts (16,000 clock pulses) independent of input voltage. For three readings/second, an oscillator frequency of 48kHz would be used.

To achieve maximum rejection of 60Hz pickup, the signal integrate cycle should be a multiple of 60Hz. Oscillator frequencies of 240kHz, 120kHz, 80kHz, 60kHz, 48kHz, 40kHz,  $33\frac{1}{3}$ kHz, etc. should be selected. For 50Hz rejection, oscillator frequencies of 200kHz, 100kHz,  $66\frac{2}{3}$ kHz, 50kHz, 40kHz, etc. would be suitable. Note that 40kHz (2.5 readings/second) will reject both 50Hz and 60Hz (also 400Hz and 440Hz).

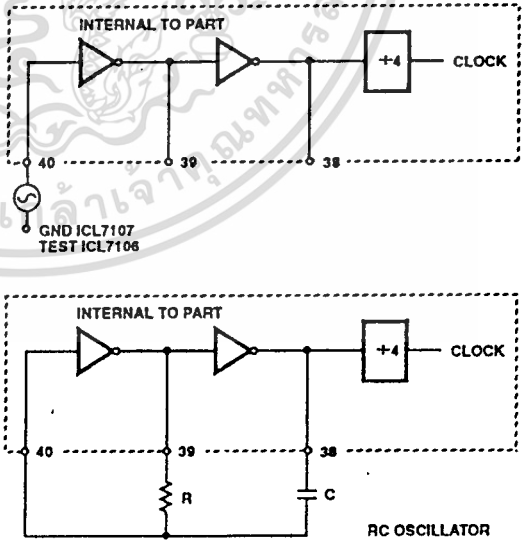


FIGURE 9. CLOCK CIRCUITS

## ICL7106, ICL7107

**Component Value Selection****Integrating Resistor**

Both the buffer amplifier and the integrator have a class A output stage with 100 $\mu$ A of quiescent current. They can supply 4 $\mu$ A of drive current with negligible nonlinearity. The integrating resistor should be large enough to remain in this very linear region over the input voltage range, but small enough that undue leakage requirements are not placed on the PC board. For 2V full-scale, 470k $\Omega$  is near optimum and similarly a 47k $\Omega$  for a 200mV scale.

**Integrating Capacitor**

The integrating capacitor should be selected to give the maximum voltage swing that ensures tolerance buildup will not saturate the integrator swing (approximately 0.3V from either supply). In the ICL7106 or the ICL7107, when the analog COMMON is used as a reference, a nominal +2V full-scale integrator swing is fine. For the ICL7107 with +5V supplies and analog COMMON tied to supply ground, a  $\pm$ 3.5V to +4V swing is nominal. For three readings/second (48kHz clock) nominal values for  $C_{INT}$  are 0.22 $\mu$ F and 0.10 $\mu$ F, respectively. Of course, if different oscillator frequencies are used, these values should be changed in inverse proportion to maintain the same output swing.

An additional requirement of the integrating capacitor is that it must have a low dielectric absorption to prevent roll-over errors. While other types of capacitors are adequate for this application, polypropylene capacitors give undetectable errors at reasonable cost.

**Auto-Zero Capacitor**

The size of the auto-zero capacitor has some influence on the noise of the system. For 200mV full-scale where noise is very important, a 0.47 $\mu$ F capacitor is recommended. On the 2V scale, a 0.047 $\mu$ F capacitor increases the speed of recovery from overload and is adequate for noise on this scale.

**Reference Capacitor**

A 0.1 $\mu$ F capacitor gives good results in most applications. However, where a large common mode voltage exists (i.e. the REF LO pin is not at analog COMMON) and a 200mV scale is used, a larger value is required to prevent roll-over error. Generally 1.0 $\mu$ F will hold the roll-over error to 0.5 count in this instance.

**Oscillator Components**

For all ranges of frequency a 100k $\Omega$  resistor is recommended and the capacitor is selected from the equation

$$f = \frac{0.45}{RC} \text{ For 48kHz Clock (3 Readings/second),}$$

$$C = 100\text{pF}$$

**Reference Voltage**

The analog input required to generate full-scale output (2000 counts) is:  $V_{IN} = 2V_{REF}$ . Thus, for the 200mV and 2V scale,  $V_{REF}$  should equal 100mV and 1V, respectively. However, in many applications where the A/D is connected to a transducer, there will exist a scale factor other than unity between the input voltage and the digital reading. For instance, in a weighing system, the designer might like to have a full-scale reading when the voltage from the transducer is 0.662V. Instead of dividing the input down to 200mV, the designer should use the input voltage directly and select  $V_{REF} = 0.341V$ . Suitable values for integrating resistor and capacitor would be 120k $\Omega$  and 0.22 $\mu$ F. This makes the system slightly quieter and also avoids a divider network on the input. The ICL7107 with  $\pm$ 5V supplies can accept input signals up to  $\pm$ 4V. Another advantage of this system occurs when a digital reading of zero is desired for  $V_{IN} \neq 0$ . Temperature and weighing systems with a variable fare are examples. This offset reading can be conveniently generated by connecting the voltage transducer between IN HI and COMMON and the variable (or fixed) offset voltage between COMMON and IN LO.

**ICL7107 Power Supplies**

The ICL7107 is designed to work from  $\pm$ 5V supplies. However, if a negative supply is not available, it can be generated from the clock output with 2 diodes, 2 capacitors, and an inexpensive I.C. Figure 10 shows this application. See ICL7660 data sheet for an alternative.

In fact, in selected applications no negative supply is required. The conditions to use a single +5V supply are:

1. The input signal can be referenced to the center of the common mode range of the converter.
2. The signal is less than  $\pm$ 1.5V.
3. An external reference is used.

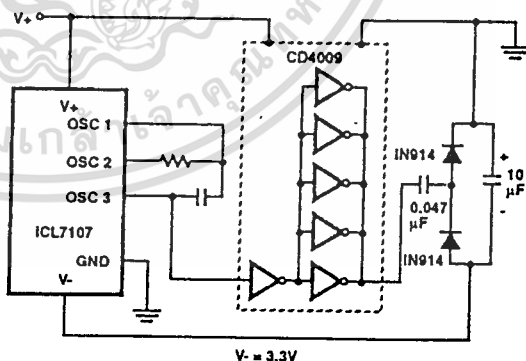


FIGURE 10. GENERATING NEGATIVE SUPPLY FROM +5V

ICL7106, ICL7107

Typical Applications

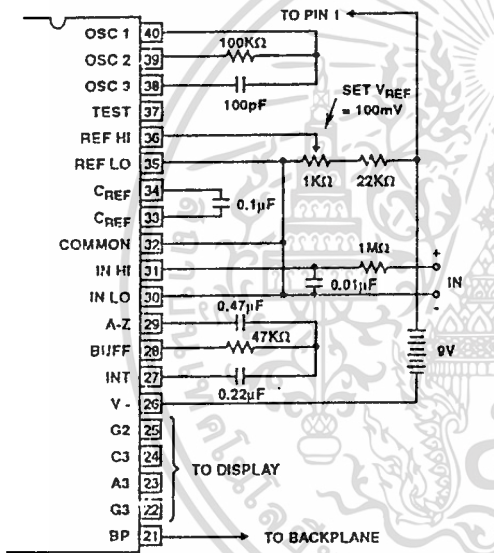
The ICL7106 and ICL7107 may be used in a wide variety of configurations. The circuits which follow show some of the possibilities, and serve to illustrate the exceptional versatility of these A/D converters.

The following application notes contain very useful information on understanding and applying this part and are available from Harris semiconductor.

Application Notes

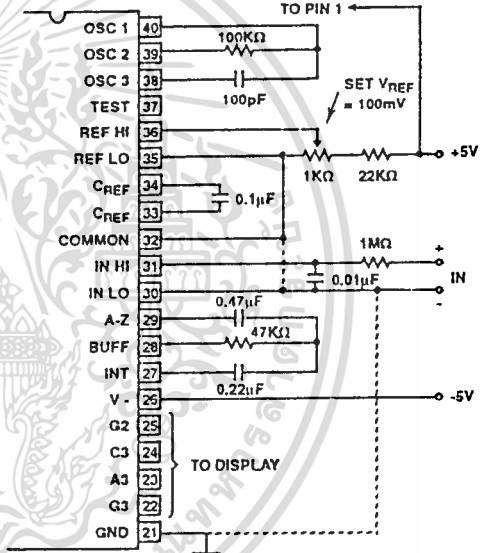
- A016 "Selecting A/D Converters"
- A017 "The Integrating A/D Converter"
- A018 "Do's and Don'ts of Applying A/D Converters"
- A023 "Low Cost Digital Panel Meter Designs"
- A032 "Understanding the Auto-Zero and Common Mode Performance of the ICL7106/7/9 Family"
- A046 "Building a Battery-Operated Auto Ranging DVM with the ICL7106"
- A052 "Tips for Using Single Chip 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Digit A/D Converters"

Typical Applications



Values shown are for 200mV full-scale, 3 readings/sec., floating supply voltage (9V battery).

FIGURE 11. ICL7106 USING THE INTERNAL REFERENCE



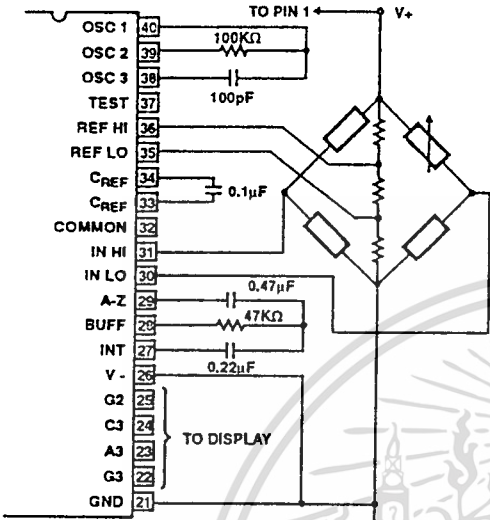
Values shown are for 200mV full-scale, 3 readings/sec. IN LO may be tied to either COMMON for inputs floating with respect to supplies, or GND for single ended inputs. (See discussion under Analog COMMON.)

FIGURE 12. ICL7107 USING THE INTERNAL REFERENCE



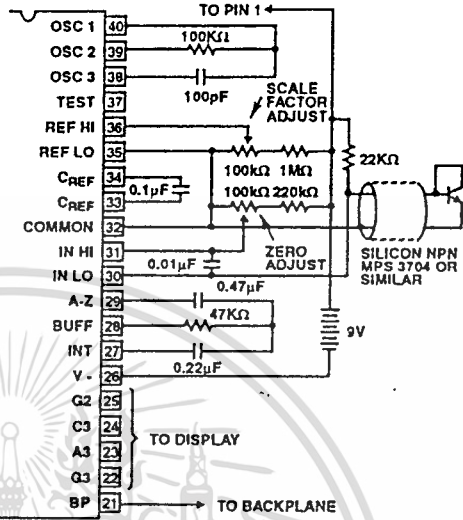
ICL7106, ICL7107

Typical Applications (Continued)



The resistor values within the bridge are determined by the desired sensitivity.

FIGURE 17. ICL7107 MEASURING RATIOMETRIC VALUES OF QUAD LOAD CELL



A silicon diode-connected transistor has a temperature coefficient of about  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ . Calibration is achieved by placing the sensing transistor in ice water and adjusting the zeroing potentiometer for a 000.0 reading. The sensor should then be placed in boiling water and the scale-factor potentiometer adjusted for a 100.0 reading.

FIGURE 18. ICL7106 USED AS A DIGITAL CENTIGRADE THERMOMETER

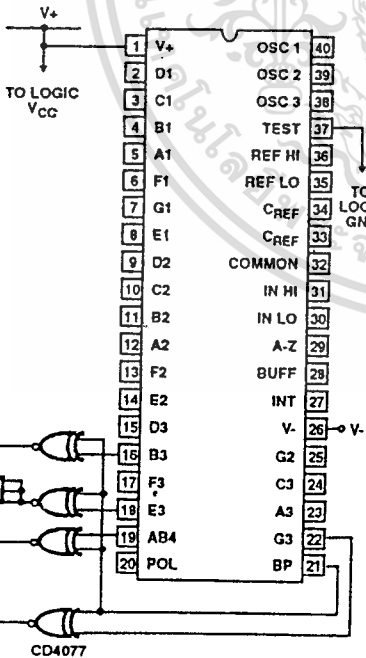


FIGURE 19. CIRCUIT FOR DEVELOPING UNDERRANGE AND OVERRANGE SIGNAL FROM ICL7106 OUTPUTS

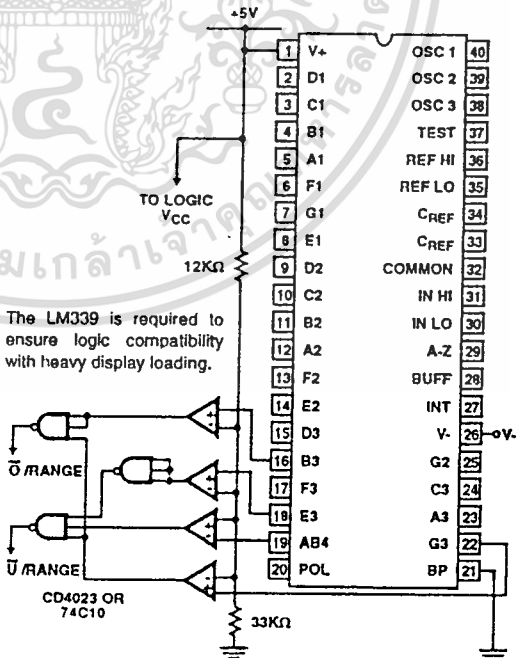
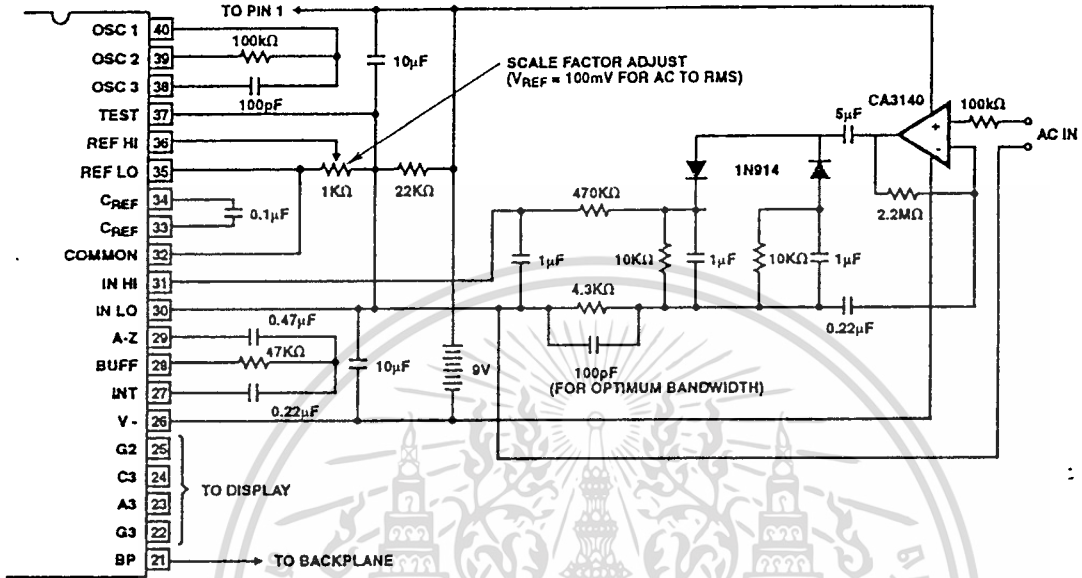


FIGURE 20. CIRCUIT FOR DEVELOPING UNDERRANGE AND OVERRANGE SIGNALS FROM ICL7107 OUTPUT

ICL7106, ICL7107

Typical Applications (Continued)



Test is used as a common-mode reference level to ensure compatibility with most op amps.

FIGURE 21. AC TO DC CONVERTER WITH ICL7106

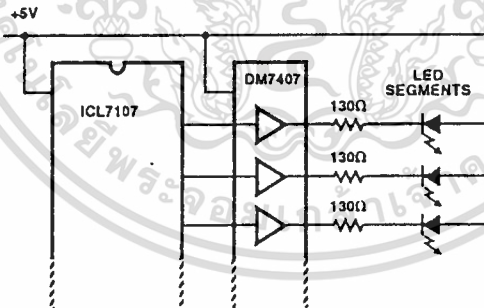


FIGURE 22. DISPLAY BUFFERING FOR INCREASED DRIVE CURRENT

**TYPES TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**LinCMOST™ QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**I-SUFFIX TYPES**

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{DD} = 10\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>1</sup>	TLC272_I			TLC27L2_I			TLC27M2_I			UNIT	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
$V_{IO}$ Input offset voltage	TLC27_2I TLC27_2AI TLC27_2BI $V_O = 1.4\text{ V}$ $R_S = 50\ \Omega$	25°C		10		10		10			mV	
		-40°C to 85°C		13		13		13				
		25°C		5		5		5				
		-40°C to 85°C		7		7		7				
		25°C		2		2		2				
		-40°C to 85°C		3.5		3.5		3.5				
$\alpha V_{IO}$ Average temperature coefficient of input offset voltage		-40°C to 85°C		5		0.7		2		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$		
$I_{IO}$ Input offset current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ $V_O = 5\text{ V}$	25°C		1		1		1		$\mu\text{A}$		
		-40°C to 85°C		200		200		200				
$I_{IB}$ Input bias current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ $V_O = 5\text{ V}$	25°C		1		1		1		$\mu\text{A}$		
		-40°C to 85°C		300		300		300				
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range		25°C	-0.2 to 9	-0.2 to 9	-0.2 to 9	-0.2 to 9	-0.2 to 9	-0.2 to 9		V		
$V_{OM}$ Peak output voltage swing <sup>2</sup>	$V_{ID} = 100\text{ mV}$	25°C	8	8.6	8	8.6	8	8.6		V		
		-40°C to 85°C	7.8		7.8		7.8					
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$V_O = 1\text{ to }6\text{ V}$ $R_S = 50\ \Omega$	25°C	10	40	30	500	20	280		V/mV		
		-40°C to 85°C	7		20		10					
$CMRR$ Common-mode rejection ratio	$V_O = 1.4\text{ V}$ $V_{IC} = V_{ICR\text{ min}}$	25°C	70	88	70	88	70	88		dB		
$t_{SVR}$ Supply voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC}/\Delta V_{IO}$ )	$V_{DD} = 5\text{ to }10\text{ V}$ $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	65	82	70	88	70	88		dB		
$I_{OS}$ Short-circuit output current	$V_O = 0$ $V_{ID} = 100\text{ mV}$	25°C	-55			-55			-55			mA
	$V_O = V_{DD}$ $V_{ID} = -100\text{ mV}$		15			15			15			
$I_{DD}$ Supply current (each amplifier)	No load.	25°C	1000			10			150			$\mu\text{A}$
	$V_O = 5\text{ V}$ $V_{IC} = 5\text{ V}$	-40°C to 85°C	2000			40			300			
			2500			40			500			

<sup>1</sup> All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Unless otherwise noted, an output load resistor is connected from the output to the ground pin.

<sup>2</sup> The output will swing to the potential of the ground pin.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LINEAR  
INTEGRATED  
CIRCUITS**
**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2  
LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

D2752, JUNE 1983—REVISED OCTOBER 1983

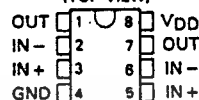
- **Wide Range of Supply Voltages:**  
1 V to 16 V (TLC252C)  
3 V to 16 V (TLC272C, TLC272I)  
4 V to 16 V (TLC272M)
- **True Single-Supply Operation**
- **Common-Mode Input Voltage Includes the Negative Rail**
- **Low Noise . . . 30 nV/√Hz Typ at  
f = 1 kHz (High-Bias Versions)**

**description**

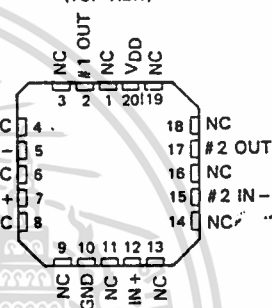
The TLC252 and TLC272 series are low-cost, low-power dual operational amplifiers designed to operate with single or dual supplies. These devices utilize the Texas Instruments silicon gate LinCMOST™ process, giving them stable input offset voltages that are available in selected grades of 2, 5 or 10 mV maximum, very high input impedances, and extremely low input offset and bias currents. Because the input common-mode range extends to the negative rail and the power consumption is extremely low, this series is ideally suited for battery-powered or energy-conserving applications. The TLC252 types offer guaranteed operation down to a 1-V supply. All devices are unity-gain stable and have excellent noise characteristics.

**D, JG, OR P DUAL-IN-LINE PACKAGE**

(TOP VIEW)

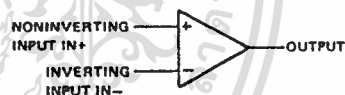

**FH OR FK PACKAGE**

(TOP VIEW)



NC—No internal connection

symbol (each amplifier)


**DEVICE FEATURES**

PARAMETER	TLC25L2 TLC27L2 (LOW BIAS)	TLC25M2 TLC27M2 (MEDIUM BIAS)	TLC252 TLC272 (HIGH BIAS)
Supply current (Typ)	20 $\mu$ A	300 $\mu$ A	2000 $\mu$ A
Slew rate (Typ)	0.04 V/ $\mu$ s	0.6 V/ $\mu$ s	4.5 V/ $\mu$ s
Input offset voltage (Max)			
... Standard types	10 mV	10 mV	10 mV
... A-suffix types	5 mV	5 mV	5 mV
... B-suffix types	2 mV	2 mV	2 mV
Offset voltage drift (Typ)	0.1 $\mu$ V/month <sup>†</sup>	0.1 $\mu$ V/month <sup>†</sup>	0.1 $\mu$ V/month <sup>†</sup>
Offset voltage temperature coefficient (Typ)	0.7 $\mu$ V/°C	2 $\mu$ V/°C	5 $\mu$ V/°C
Input bias current (Typ)	1 pA	1 pA	1 pA
Input offset current (Typ)	1 pA	1 pA	1 pA

<sup>†</sup>The offset voltage drift applies after the first month only.

**TEMPERATURE RANGES AND PACKAGES**

TYPES	TEMPERATURE RANGE	PACKAGES
TLC25_2_C	0°C to 70°	JG, P, D
TLC27_2_C	0°C to 70°C	JG, P, D
TLC27_2_I	-40°C to 85°C	JG, P, D
TLC27_2_M	-55°C to 125°C	JG, FH, FK

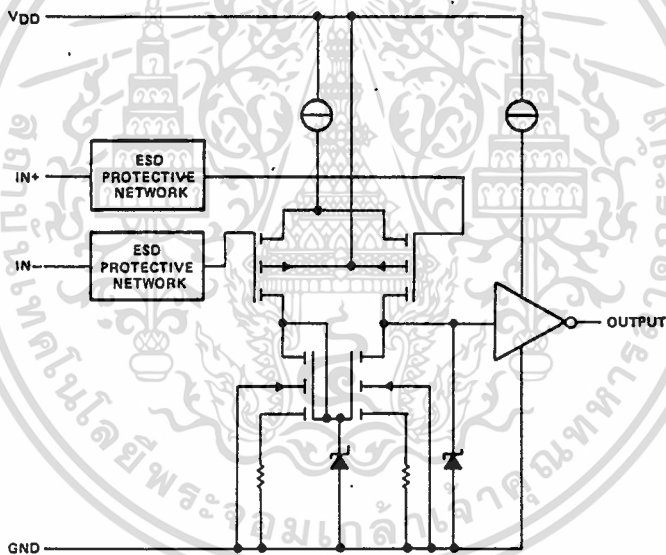
## TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2- LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL APPLIFIERS

### description (continued)

These devices have internal electrostatic discharge (ESD) protection circuits that will prevent catastrophic failures at voltages up to 2000 volts as tested under MIL-STD-883B, Method 3015.1. However, care should be exercised in handling these devices as exposure to ESD may result in a degradation of the device parametric performance.

Because of the extremely high input impedance and low input bias and offset currents, applications for the TLC252 and TLC272 series include many areas that have previously been limited to BIFET and NFET product types. Any circuit using high-impedance elements and requiring small offset errors is a good candidate for cost-effective use of these devices. Many features associated with bipolar technology are available with LinCMOST™ operational amplifiers without the power penalties of traditional bipolar devices. General applications such as transducer interfacing, analog calculations, amplifier blocks, active filters, and signal buffering are all easily designed with the TLC252 and TLC272 series. Remote and inaccessible equipment applications are possible using the low-voltage and low-power capabilities of the TLC252. The TLC252 types are well suited to solve the difficult problems associated with single-battery and solar-cell-powered applications. This series includes devices that are characterized for commercial, industrial, and military temperature ranges and are available in 8-pin plastic and ceramic dual-in-line (DIP) packages, small outline (D) package, and chip carrier (FH, FK) packages.

### schematic (each amplifier)



**TYFES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2  
LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)**

Supply voltage, VDD (see Note 1) .....	18 V
Differential input voltage (see Note 2) .....	±18 V
Input voltage range (any input) .....	-0.3 V to 18 V
Duration of short-circuit at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 3) .....	unlimited
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 4):	
D package .....	725 mW
FH package (see Note 5) .....	1200 mW
FK package (see Note 5) .....	1375 mW
JG package .....	1050 mW
P package .....	725 mW
Operating free-air temperature range:	
TLC27_2_M .....	-55°C to 125°C
TLC27_2_I .....	-40°C to 85°C
TLC25_2_C, TLC27_2_C .....	0°C to 170°C
Storage temperature range .....	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,8 mm (1/16 inch) from the case for 60 seconds: JG package .....	300°C
Lead temperature 1,8 mm (1/16 inch) from the case for 10 seconds: D or P package .....	260°C

- NOTES:**
1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to network ground terminal.
  2. Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
  3. The output may be shorted to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure the maximum dissipation rating is not exceeded.
  4. For operation above 25°C free-air temperature, refer to the Dissipation Derating Table.
  5. For FH and FK packages, power rating and derating factor will vary with the actual mounting technique used. The values stated here are believed to be conservative.

**DISSIPATION DERATING TABLE**

PACKAGE	POWER RATING	DERATING FACTOR	ABOVE TA
D	725 mW	5.8 mW/°C	25°C
FH	1200 mW	9.6 mW/°C	25°C
FK	1375 mW	11 mW/°C	25°C
JG	1050 mW	8.4 mW/°C	25°C
P	725 mW	5.8 mW/°C	25°C

**recommended operating conditions**

		TLC25_2 TLC25_2A TLC25_2B			TLC27_2 TLC27_2A TLC27_2B			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, VDD	M-suffix types				4		16	V
	I-suffix types				3		16	
	C-suffix types	1		16	3		16	
Common-mode input voltage, VIC	VDD = 1 V	0		0.2				V
	VDD = 4 V	0		3	0		3	
	VDD = 10 V	-0.05		9	-0.05		9	
	VDD = 18 V	-0.05		14	-0.05		14	
Operating free-air temperature, TA	M-suffix types				-55		125	°C
	I-suffix types				-40		85	
	C-suffix types	0		70	0		70	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPES TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**LinCMOST™ QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**
**M-SUFFIX TYPES**

 electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{DD} = 10\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS <sup>1</sup>	TLC272_M			TLC27L2_M			TLC27M2_M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$	Input offset voltage	$V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$	25°C			10			10			mV
			-55°C to 125°C			12			12			
			25°C			5			5			
			-55°C to 125°C			6.5			6.5			
			25°C			2			2			
			-55°C to 125°C			3.5			3.5			
$\theta_{VIO}$	Average temperature coefficient of input offset voltage	-55°C to 125°C	5			0.7			2			$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$I_{IO}$	Input offset current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 5\text{ V}$	25°C			1			1			pA
$I_{IB}$	Input bias current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 5\text{ V}$	25°C			1			1			nA
			-55°C to 125°C			35			35			nA
$V_{ICR}$	Common-mode input voltage range		25°C			-0.2 to 9			-0.2 to 9			V
$V_{OM}$	Peak output voltage swing <sup>2</sup>	$V_{ID} = 100\text{ mV}$	25°C			8 8.6			8 8.6			V
$A_{VD}$	Large-signal differential voltage amplification	$V_O = 1\text{ to }6\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$	25°C			10 40			30 500			V/mV
			-55°C to 125°C			7			20			
$CMRR$	Common-mode rejection ratio	$V_O = 1.4\text{ V}$ , $V_{IC} = V_{ICR\ min}$	25°C			70 88			70 88			dB
$KS_{VR}$	Supply voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC}/\Delta V_{IO}$ )	$V_{DD} = 5\text{ to }10\text{ V}$ , $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C			85 82			70 88			dB
$I_{OS}$	Short-circuit output current	$V_O = 0$ , $V_{ID} = 100\text{ mV}$ , $V_O = V_{DD}$ , $V_{ID} = -100\text{ mV}$	25°C			-55			-55			mA
						15			15			
$I_{DD}$	Supply current (each amplifier)	No load, $V_O = 5\text{ V}$ , $V_{IC} = 5\text{ V}$	25°C			1000 2000			10 20			$\mu\text{A}$
			-55°C to 125°C			3000			40 500			

<sup>1</sup> All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Unless otherwise noted, an output load resistor is connected from the output to the ground pin.

<sup>2</sup> The output will swing to the potential of the ground pin.

**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**1inCMOSTM DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**
**C-SUFFIX TYPES**

 electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{DD} = 10\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS <sup>1</sup>	TLC252_C, TLC272_C			TLC25L2_C, TLC27L2_C			TLC25M2_C, TLC27M2_C			UNITS	
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
$V_{IO}$	Input offset voltage	$V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$	TLC2_2C		25°C		10		10			mV	
					0°C to 70°C		12		12		12		
			TLC2_2AC		25°C		5		5		5		
					0°C to 70°C		6.5		6.5		6.5		
			TLC2_2BC		25°C		2		2		2		
					0°C to 70°C		3		3		3		
$\alpha_{VIO}$	Average temperature coefficient of input offset voltage		0°C to 70°C		5		0.7		2		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$		
$I_{IO}$	Input offset current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 5\text{ V}$	25°C		1		1		1		pA		
$I_{IB}$	Input bias current	$V_{IC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 5\text{ V}$	25°C		1		1		1		pA		
			0°C to 70°C		150		150		150				
$V_{ICR}$	Common-mode input voltage range		25°C		-0.2 to 9		-0.2 to 9		-0.2 to 9		V		
$V_{OM}$	Peak output voltage swing <sup>2</sup>	$V_{ID} = 100\text{ mV}$	25°C		8 8.6		8 8.6		8 8.6		V		
			0°C to 70°C		7.8		7.8		7.8				
$A_{VD}$	Large-signal differential voltage amplification	$V_O = 1\text{ to }6\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$	25°C		10	40	30	500	20	280	V/mV		
$CMRR$	Common-mode rejection ratio	$V_O = 1.4\text{ V}$ , $V_{IC} = V_{ICR\ min}$	25°C		70		88		70		88		dB
			Supply voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC}/\Delta V_{ID}$ )		55		82		70		88		
$I_{OS}$	Short-circuit output current	$V_O = 0$ , $V_{ID} = 100\text{ mV}$ , $V_O = V_{DD}$ , $V_{ID} = -100\text{ mV}$	25°C		-55		-55		-55		mA		
			No load, $V_O = 5\text{ V}$ , $V_{IC} = 5\text{ V}$		1000		2000		10			20	
$I_{DD}$	Supply current (each amplifier)	No load, $V_O = 5\text{ V}$ , $V_{IC} = 5\text{ V}$	25°C		1000		2000		150		300		$\mu\text{A}$
			0°C to 70°C		2200		30		400				

<sup>1</sup> All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Unless otherwise noted, an output load resistor is connected from the output to the ground pin.

<sup>2</sup> The output will swing to the potential of the ground pin.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2**  
**LinCMOS™ QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**C-SUFFIX TYPES**

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{DD} = 1\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>†</sup>	TLC252_C			TLC25L2_C			TLC25M2_C			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	TLC25_2C $V_O = 0.2\text{ V}$ , $R_S = 50\ \Omega$	25°C		10		10		10			mV
		0°C to 70°C		12		12		12			
		25°C		5		5		5			
		0°C to 70°C		6.5		6.5		6.5			
		25°C		2		2		2			
		0°C to 70°C		3		3		3			
$\mu V_{IO}$ Average temperature coefficient of input offset voltage		0°C to 70°C		1		1		1		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
$I_{IO}$ Input offset current	$V_O = 0.2\text{ V}$	25°C		1		1		1		pA	
		0°C to 70°C		100		100		100			
$I_{IB}$ Input bias current	$V_O = 0.2\text{ V}$	25°C		1		1		1		pA	
		0°C to 70°C		150		150		150			
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range		25°C	0 to 0.2		0 to 0.2		0 to 0.2			V	
$V_{OM}$ Peak output voltage swing <sup>‡</sup>	$V_{ID} = 100\text{ mV}$	25°C		450		450		450		mV	
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$V_O = 100\text{ to }300\text{ mV}$ , $R_S = 50\ \Omega$	25°C		10		20		20		V/mV	
$CMRR$ Common-mode rejection ratio	$V_O = 0.2\text{ V}$ , $V_{IC} = V_{ICR\ min}$	25°C		77		77		77		dB	
$I_{DD}$ Supply current (each amplifier)	No load, $V_O = 0.2\text{ V}$	25°C		12		2		2		$\mu\text{A}$	

<sup>†</sup> All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Unless otherwise noted, an output load resistor is connected from the output to the ground pin.

<sup>‡</sup> The output will swing to the potential of the ground pin.

operating characteristics,  $V_{DD} = 1\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$

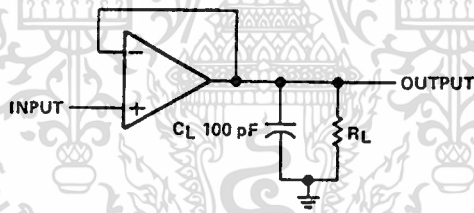
PARAMETER	TEST CONDITIONS	TLC252_C			TLC25L2_C			TLC25M2_C			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$B_1$ Unity-gain bandwidth	$A_V = 40\text{ dB}$ , $C_L = 10\text{ pF}$ , $R_S = 50\ \Omega$		75			12			12		kHz
$SR$ Slew rate at unity gain	See Figure 1		0.01			0.001			0.001		V/ $\mu\text{s}$
Overshoot factor	See Figure 1		30%			35%			35%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

 operating characteristics,  $V_{DD} = 10\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ 

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TLC252_C TLC272_M TLC272_I TLC272_C			TLC25L2_C TLC27L2_M TLC27L2_I TLC27L2_C			TLC25M2_C TLC27M2_M TLC27M2_I TLC27M2_C			UNIT			
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
$B_1$	Unity-gain bandwidth	$A_V = 40\text{ dB}$ , $C_L = 10\text{ pF}$ , $R_S = 50\ \Omega$			2.3			0.1			0.7			MHz
SR	Slew rate at unity gain	See Figure 1			4.5			0.04			0.6			V/ $\mu\text{s}$
	Overshoot factor	See Figure 1			35%			30%			35%			
$\phi_m$	Phase margin at unity gain	$A_V = 40\text{ dB}$ , $R_S = 100\ \Omega$ , $C_L = 10\text{ pF}$			$50^\circ$			$43^\circ$			$43^\circ$			
$V_n$	Equivalent input noise voltage	$f = 1\text{ kHz}$ , $R_S = 100\ \Omega$			30			70			38			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$V_{o1}/V_{o2}$	Cross talk attenuation	$A_V = 100$			120			120			120			dB

**PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION**

**FIGURE 1—UNITY GAIN AMPLIFIER**

TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2  
LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

TYPICAL CHARACTERISTICS

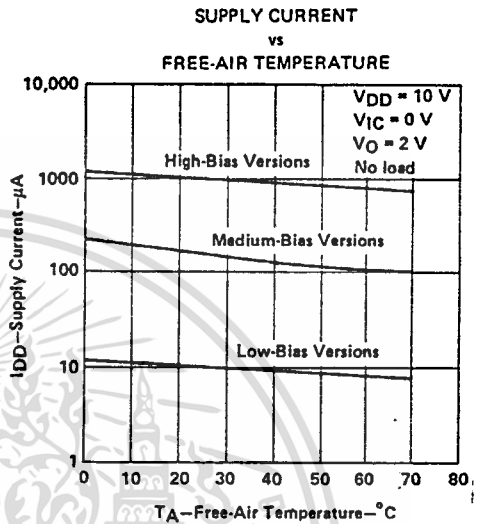
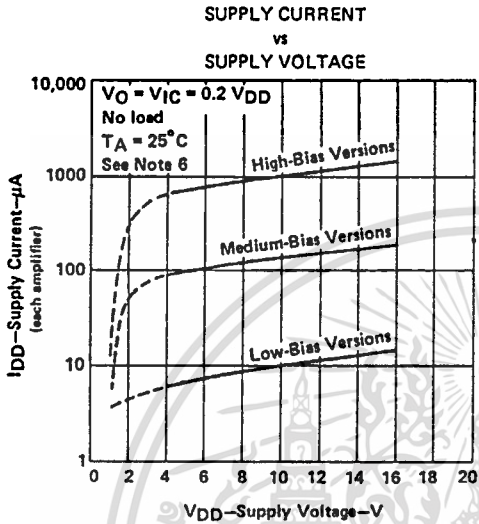


FIGURE 2

FIGURE 3

NOTE 6: Data for  $V_{DD}$  less than 4 V does not apply for the TLC272 series.

LOW-BIAS VERSIONS  
LARGE-SIGNAL  
DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION  
and PHASE SHIFT  
vs  
FREQUENCY

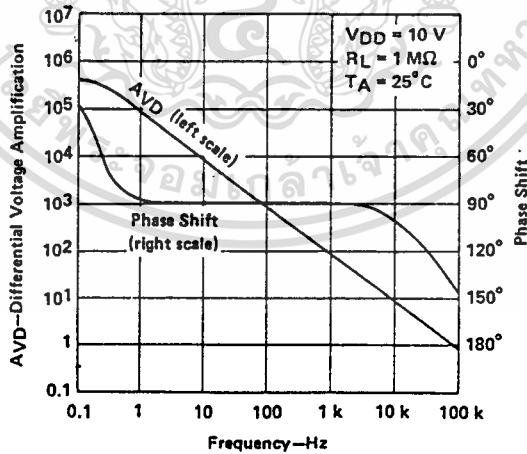


FIGURE 4

**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**TYPICAL CHARACTERISTICS**

MEDIUM-BIAS VERSIONS  
 LARGE-SIGNAL  
 DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION  
 and PHASE SHIFT

vs

FREQUENCY

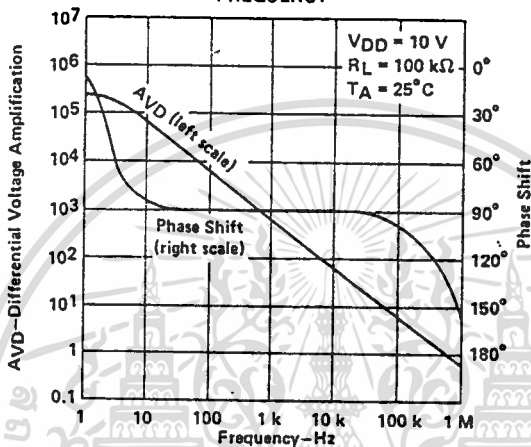


FIGURE 5

HIGH-BIAS VERSIONS  
 LARGE-SIGNAL  
 DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION  
 and PHASE SHIFT

vs

FREQUENCY

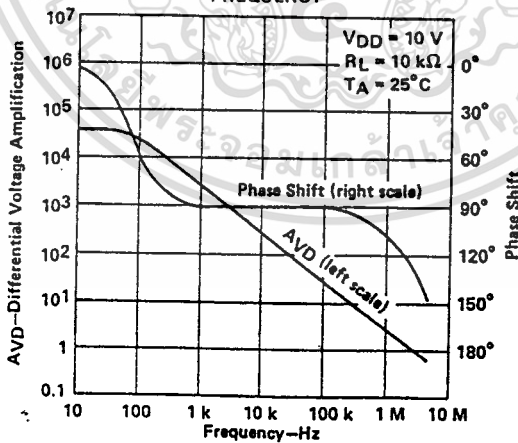


FIGURE 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPES TLC252, TLC25L2, TLC25M2, TLC272, TLC27L2, TLC27M2**  
**LinCMOST™ DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**TYPICAL APPLICATION INFORMATION**

**latchup avoidance**

Junction-isolated CMOS circuits have an inherent parasitic PNP structure that can function as an SCR. Under certain conditions, this SCR may be triggered into a low-impedance state, resulting in excessive supply current. To avoid such conditions, no voltage greater than 0.3 V beyond the supply rails should be applied to any pin. In general, the op amp supplies should be established simultaneously with, or before, any input signals are applied.

**output stage considerations**

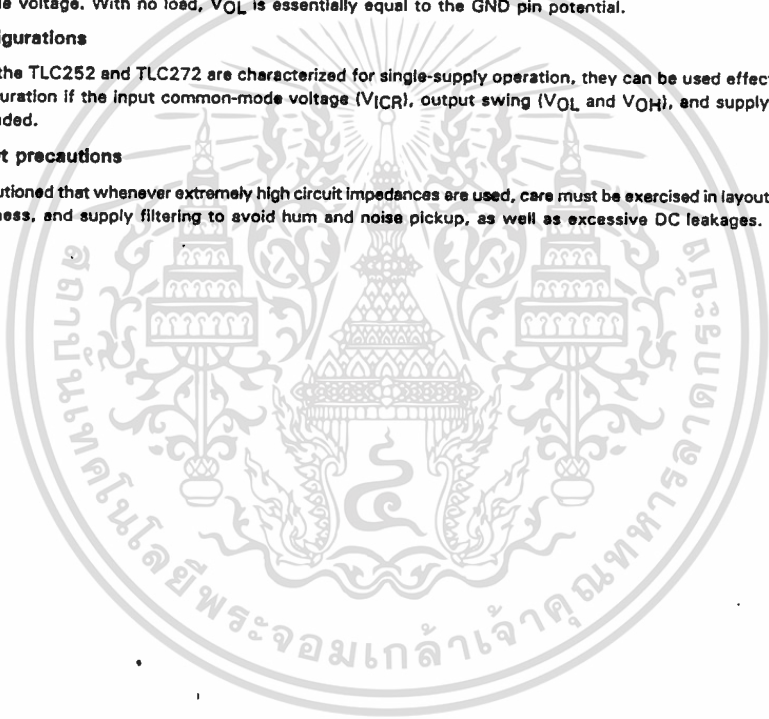
The amplifier's output stage consists of a source follower connected pullup transistor and an open drain pulldown transistor. The high-level output voltage ( $V_{OH}$ ) is virtually independent of the  $I_{DD}$  selection, and increases with higher values of  $V_{DD}$  and reduced output loading. The low-level output voltage ( $V_{OL}$ ) decreases with reduced output current and higher input common-mode voltage. With no load,  $V_{OL}$  is essentially equal to the GND pin potential.

**supply configurations**

Even though the TLC252 and TLC272 are characterized for single-supply operation, they can be used effectively in a split supply configuration if the input common-mode voltage ( $V_{ICR}$ ), output swing ( $V_{OL}$  and  $V_{OH}$ ), and supply voltage limits are not exceeded.

**circuit layout precautions**

The user is cautioned that whenever extremely high circuit impedances are used, care must be exercised in layout, construction, board cleanliness, and supply filtering to avoid hum and noise pickup, as well as excessive DC leakages.



## บรรณานุกรม

- เปรมจิต วิสุทธีศิริ, “LCD สถาปัตยกรรมของจอแสดงผล”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์,  
ฉบับที่ 98, (กุมภาพันธ์-มีนาคม 2533), หน้า 272-281
- เปรมจิต วิสุทธีศิริ, “พื้นฐานวงจรเอทดี ดีทเอ ตอน 2 วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 103, (ธันวาคม 2533), หน้า 302-309
- ทวิศักดิ์ ไพศาลภาณุมาศ, “การป้องกันความผิดพลาดจากสัญญาณแอนะล็อกของอินพุตวงจรร A/D”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 140, (มิถุนายน 2527), หน้า 141-146
- มนตรี เข้มวงษ์, ผศ, “ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ PH484”, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2530
- เสกสิทธิ์ คำชมภู, “เทคนิคการออกแบบวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 136 (กุมภาพันธ์ 2537), หน้า 100-101
- เสกสิทธิ์ คำชมภู, “หลากหลายกับชุดแสดงผลแบบ LCD”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 141, (สิงหาคม 2537), หน้า 116-120
- สมคิด วิริยะประสิทธิ์ชัย, อรรถพล มณีโชติ และธนาวัฒน์ ภมรรักษ์ตพงศ์, “ความรู้เบื้องต้นทางอิเล็กทรอนิกส์”, กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2535
- สมชาย บรรยงพาณิชย์, “ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็ก”, เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 109, (สิงหาคม 2534), หน้า 111-117
- มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, “เอกสารการสอนชุดวิชาวิทยาศาสตร์ 1”, พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, 2526
- อาภรณ์ เก่งพล และโอซามุ นิชิโนะ, “เครื่องวัด และการวัดทางไฟฟ้า”, กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, 2529
- Harris Semiconductor, “Data Acquisition”, 1994, USA, (1994), pp

