# การควบคุมระดับของเหลว
# โดยไม่ใช้ลูกลอยแบบไร้สาย
# WIRELESS FLOATLESS LIQUID LEVEL CONTROLLING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2536

# WIRELESS FLOATLESS LEQUID LEVEL CONTROLLING

โดย


นาย คม ฉันทกมลวิทย์

นาย สาเริง ศรียานงค์

นาย สุริยันต์ สายพานิชย์

นาย เสกสรรค์ อุดสาหวรารัตน์

รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐาเวิญ

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



033327

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2536
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง WIRELESS FLOATLESS LIQUID LEVEL CONTROLLING

ผู้จัดทำ :

1. นายคม ฉันทกมลวิทย์
2. นายสำเริง ศรียานงค์
3. นายสุริยันต์ สายพานิชย์
4. นายเสกสรรค์ อุตสาหวารัตน์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การควบคุมระดับของเหลวโดยไม่ใช้ลูกลอยแบบไร้สาย

# Wireless Floatless Liquld Level Contsrolling

โดย นาย คม ฉันทกมลวิทย์

นาย สาเริง ศรียานงค์

นาย สุริยนต์ สายพานิชย์

นาย เสกสรรค์ อุดสาหวรารัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา ร.ศ. ดร. วิริยะ พิเชษฐาเริญ

บทคัดย่อ

การทำงานวิจัยนี้ได้พยายามทำการพัฒนา "ระบบการควบคุมระดับของเหลวโดยไม่ใช้ลูกลอย ซึ่งพัฒนาต่อจากแบบเดิมที่มีลูกลอย และได้พยายามพัฒนาต่อโดยใช้ระบบการควบคุมวงจรระบบไร้สาย เข้ามาช่วยในการส่งงานโดยทำเป็นคลื่นวิทยุส่งออกทั้งนี้หวังที่จะทำเครื่องต้นแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม และ สามารถประยุกต์ใช้งานในสถานที่ ๆ มีสารอันตรายหรืองานควบคุมในระยะไกลๆ ขั้นตอนการศึกษาค้นคว้า จะแบ่งออกเป็นการศึกษาหาข้อมูล การออกแบบวงจรการรับคลื่น และส่งคลื่นที่มีประสิทธิภาพ และการทดลองต่างๆ เพื่อที่จะได้ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ABSTRACT

This research is trying to develop "Floatless Liquid level controllong system" was developed from the old ayatem and try for use wireless system circuit to control system. This controlling used radio wave to transmission for control. We hope to make first product uaing the more effieiency. And pcan be apply in the hazard zone or the long length control (Remote Control) the study of this project can be divided by Seeking Informstion , designing of circuit for Receiving and transmission and miscellancous experiment. For the most effigency of controlling system.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ และขอบเขตโครงงาน

เพื่อพัฒนาระบบการควบคุมระดับของเหลว เราจึงใช้ทำการวิจัยและข้นคว้าหาสิ่งที่จะนำมาซึ่งความสะดวกสบายในการใช้งานของการควบคุมระดับของเหลว

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนา ระบบควบคุมน้ำขึ้นเป็นอย่างมากทั้งนี้เพื่อต้องการให้การใช้น้ำในการอุปโภค บริโภค เป็นไปอย่างคุ้มค่า และประหยัดระบบการควบคุมน้ำในสมัยก่อนที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือลูกลอย และพัฒนามาจนกลายเป็นใช้แห่งอีเลคโทรด โดยออกแบบวงจรเพื่อควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำอย่างเหมาะสมเรียกว่า floatless

ในการทำ Project ของเรานี้มีจุดประสงค์ คือ ทำการพัฒนา Floatless ให้มีการใช้งานได้อย่างมากขึ้น และใช้การควบคุมหรือสั่งงานโดยคลื่นวิทยุ แทนวงจร Control แบบเดิม.

ทั้งนี้หวังที่จะให้เป็นประโยชน์ต่อไป ในการประยุกต์ใช้งาน ในอนาคตคการควบคุมในระยะไกลๆ โดยไม่ต้องเดินสายนำสัญญาณ และยังทำการศึกษาชดแสดงผลหรือแสดงระดับของเหลวมาด้วย ทั้งหมดนี้คณะผู้จัดทำหวังว่าจะใช้ประโยชน์เพื่อทำการพัฒนาต้องหรือนำไปใช้งานในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ


| | | | หน้า |
|---|---|---|---|
| บทคัดย่อ | | | |
| Abstract | | | |
| บทที่ 1 | | บทนำ | |
| | 1.1 | การควบคุมระดับคืออะไร | 1 |
| | 1.1.1 | อุปกรณ์การควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ลูกลอย | 1 |
| | 1.1.2 | อุปกรณ์การควบคุมระดับของเหลวโดยใช้อิเลคโทรด | 3 |
| | 1.2 | Floatless flow liquid level control | 5 |
| บทที่ 2 | | หลักการและทฤษฎีการควบคุมของเหลวพร้อมอุปกรณ์ควบคุม | |
| | 2.1 | Supply Voltage | 7 |
| | 2.2 | Control Unit | 7 |
| | 2.3 | Relay | 8 |
| | 2.4 | Circuit | 27 |
| | 2.4.1 | Bipolar Transistors | 27 |
| | 2.4.2 | โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ | 28 |
| | 2.4.3 | การให้ BIAS แก่ทรานซิสเตอร์ | 32 |
| | 2.4.4 | การไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์ | 33 |
| | 2.4.5 | วงจรทรานซิสเตอร์ | 35 |
| | 2.4.6 | วงจร Common-BASE | 35 |
| | 2.5 | อัตราการขยายกระแส | 37 |
| | 2.6 | อัตราส่วนความต้านทาน | 37 |
| | 2.7 | อัตราการขยายกำลัง (Ap) | 38 |
| | 2.8 | วงจรขยายทรานซิสเตอร์ | 38 |
| | 2.9 | กราฟคุณสมบัติของวงจร Common-BASE | 39 |
| | 2.10 | วงจร Common-Emitter | 43 |
| | 2.11 | วงจร Common-Collector | 52 |
| | 2.12 | ตัวต้านทาน | 55 |
| | 2.13 | คาบาซิเตอร์ | 59 |
| | 2.14 | ไดโอด | 61 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|---|---|---|
| 2.15 | ทฤษฎีของวงจรอิเลคทรอนิคส์ที่นำมาใช้ในวงจร | 64 |
| 2.15.1 | วงจรฮาล์ฟเรคติไฟเออร์ | 65 |
| 2.15.2 | วงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์ | 67 |
| 2.15.3 | วงจรฟูลเวฟแบบบริดจ์เรคติไฟเออร์ | 68 |
| 2.15.4 | วงจรกรองแรงดันหรือฟิลเตอร์ | 69 |
| 2.16 | วงจรการกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ | 89 |
| 2.16.1 | วงจรการกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ | 71 |
| 2.16.2 | วงจรการกรองแรงดันแบบพาย | 72 |
| 2.16.3 | วงจรการกรองแรงดันแบบรูปตัวแอล | 72 |
| 2.16.4 | วงจรการกรองแรงดันแบบ RC | 73 |
| บทที่ 3 | หลักการสื่อสารด้วยวิทยุ | 74 |
| 3.1 | การรวมความถี่ | 75 |
| 3.2 | การมอดูเลสัญญาณ | 77 |
| 3.3 | สัญญาณความถี่วิทยุ | 78 |
| 3.4 | การมอดูเลททางแอมปลิจูด | 79 |
| 3.5 | การดีมอดูเลทสัญญาณ AM | 85 |
| 3.6 | การมอดูเลททางความถี่ | 86 |
| บทที่ 4 | วงจรรีโซแนนซ์ | 92 |
| 4.1 | วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม | 92 |
| 4.2 | วงจรรีโซแนนซ์ขนาน | 98 |
| 4.3 | การหาค่า L หรือ C เพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ขนาน | 103 |
| 4.4 | วงจรขยายย่านความถี่วิทยุ | 105 |
| 4.4.1 | วงจรขยายความถี่วิทยุใช้ทรานซิสเตอร์ | 105 |
| 4.4.2 | ทรานซิสเตอร์ความถี่สูง | 108 |
| 4.4.3 | วงจรเลือกความถี่ชนิดจูนข้างเดียว | 110 |
| 4.5 | RF ทรานซิสเตอร์ | 113 |
| 4.5.1 | อิมพุตอิมพิแดนซ์ | 116 |
| 4.5.2 | เอาต์พุตอิมพิแดนซ์ | 118 |
| 4.5.3 | คุณสมบัติการป้อนกลับ | 120 |
| 4.5.4 | อัตราการขยาย | 121 |
| 4.6 | วงจรออสซิลเลเตอร์ | 125 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์ 126
4.6.2 วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น 128
4.6.3 วงจรออสซิลเลเตอร์ย่านความถี่สัญญาณวิทยุ 130
4.6.4 วงจรรีโซแนนท์ออสซิลเลเตอร์ 132
4.6.5 วงจรออสซิลเลเตอร์ลนิค จุนอินพุต จุลเอาท์พุต 133
4.6.6 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ในย่านความถี่วิทยุที่ใช้ฟิลด์เอฟเฟค ทรานซิสเลเตอร์ 134
4.6.7 วงจรออสซอลเลเตอร์ใช้ผลึกควอร์ด หรือ คริสตอล 135
บทที่ 5 หลักการและทฤษฎีของ Floatless Flow Liquid 141
5.1 การเซ็คระดับของสารแบบเป็นจุด (Set-point) 141
5.2 การเซ็คระดับของสารอย่างต่อเนื่อง 142
5.3 การเซ็คระดับอย่างต่อเนื่องผ่านความถี่วิทยุ 143
5.4 ภาครับข้อมูล 150
5.4.1 ภาครับสัญญาณคลื่นวิทยุ 150
5.4.2 ภาคควบคุมข้อมูลและประมวลข้อมูล 151
5.5 ภาคส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ 156
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง 179
บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ 186
อุปกรณ์การควบคุมระดับ ภาคผนวก ก
หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทนำ**

ในปัจจุบันนี้การพัฒนาการของเครื่องอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์นั้น มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยอย่างไม่หยุดยั้ง ซึ่งจะนำมาตอบสนองความต้องการของคนเราเป็นอย่างมากดังนั้น เราจึงได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ ซึ่งจะช่วยนำมาซึ่งความสะดวกสบาย การนำเทคโนโลยี ใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้ให้มีประโยชน์ยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่าแต่ก่อนนั้นการควบคุมระดับน้ำนั้นอาจจะใช้อุปกรณ์ทาง Machomic เป็นตัวสั่งงานปิดเปิดแล้วนั้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเช่น ลูกลอยใช้ควบคุมระดับน้ำในถังน้ำของรถส้วนซึ่งเป็นระบบเล็กๆ ในระบบที่ใหญ่ๆ การควบคุมการปิด-เปิดน้ำ ยังมีปรากฏในปัจจุบันว่าใช้คน เป็นตัวสั่งงานปิดหรือเปิดมอเตอร์ปั๊มน้ำในปั๊มน้ำจากถังพักน้ำ ไปเก็บไว้ยังถังบนเพื่อจ่ายน้ำไปใช้งานได้ในระยะทางไกลๆจะเห็นว่าคนซึ่งรับผิดชอบการปิด-เปิด Switch มอเตอร์ให้ปั๊มน้ำนั้นจะต้องคอยดูระดับน้ำตลอดเวลา ซึ่งเป็นการเสียเวลาโดยเปล่าประโยชน์และบางทีอาจทำให้น้ำล้นถังอยู่เสมอๆ เป็นการสูญเสียทรัพยากรน้ำด้วย ระบบใหญ่ๆ นี้เช่นการเก็บน้ำและจ่ายน้ำของการประปา, การจ่ายน้ำในอาคารสูง เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการปิด-เปิด มอเตอร์ปั๊นน้ำแทนคน คือ Floatless Control จึงช่วยอำนวยความสะดวกแก่คนเป็นอย่างมากดังนั้นเราจึงพยายามพัฒนา Floatless ต่อ โดยที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานควบคุมระดับของเหลวซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นน้ำ เช่น ใช้Floatless ควบคุมระดับของน้ำ ทรัดในการทำน้ำอัดลมในโรงงานอุตสาหกรรม หรือนำ Floatless มาควบคุมระดับของสารอันตรายในโรงงานรอุตสาหกรรม. ในการทำการพัฒนาต่อนั้นเราได้ใช้การควบคุมการสั่งงานโดยใช้คลื่นวิทยุสั่งงานแทนสายนำสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการสั่งงานระยะไกล โดยไม่ต้องเดินสายนำสัญญาณจะขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 การควบคุมระดับคืออะไร

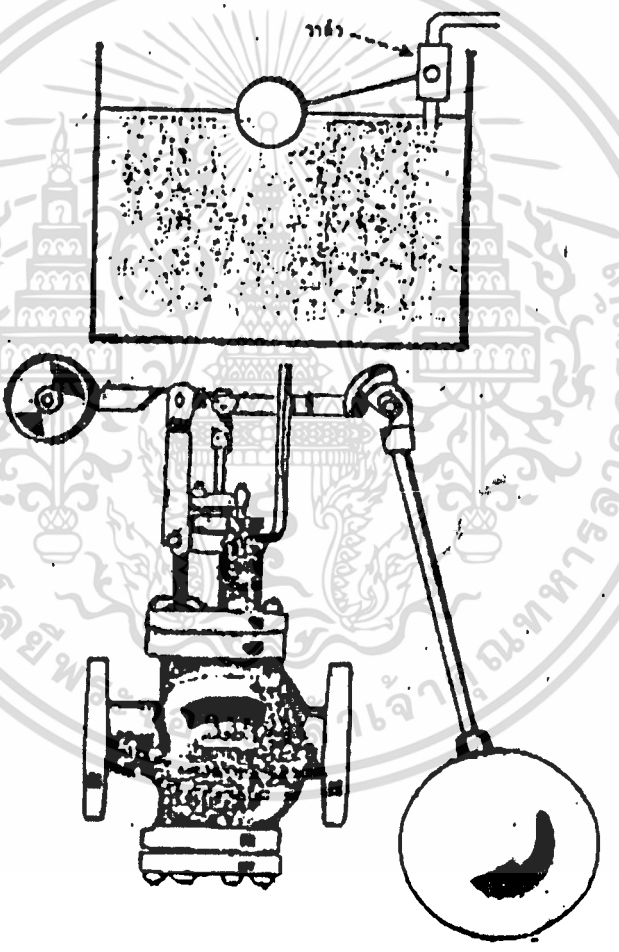
ระดับเป็นพารามิเตอร์ (Parameter) ตัวหนึ่งใน ๔ ตัวสำคัญในวงการอุตสาหกรรม อันประกอบไปด้วย การวัดอุณฯ,แรงดันยและการไหลในปัจจุบันการวัดระดับใช้กันทั้งฯ ไปมีถึง ๑๖ วิธี มีทั้งข้อดีและข้อเสีย อุปกรณ์มีทั้งแบบเชิงกลและไฟฟ้าและแบบอิเลคทรอนิคส์ เครื่องวัดระดับมี ๒ ชนิดคือ แบบชิ้นอกระดับ, ทั้งของแข็งและของเหลว และแบบที่ใช้ทำการควบคุมระดับได้ (โดยรายละเอียดของอุปกรณ์เหล่านี้ดูได้จากภาคผนวก ก.) ดังนั้น การควบคุมระดับจึงหมายถึง การตั้งค่าฯหนึ่งไว้เพื่อสนองต่อความต้องการและต้องใช้องค์ประกอบร่วมคือ การวัดระดับ ซึ่งเป็นสิ่งตรวจสอบว่าปริมาณความต้องการสิ่งค่าที่ตั้งไว้หรือยัง และการควบคุมระดับน้ำจึงหมายถึง การควบคุมระดับของน้ำที่อยู่ในภาชนะไม่ว่าจะเป็น Tanle หรือภาชนะอะไรก็ตาม ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เพื่อสะดวกต่อการนำน้ำไปใช้งาน และให้มีน้ำใช้งานอยู่ตลอดเวลา โดยเป็นความประหยัดหรือมีระบบควบคุมไม่ให้น้ำล้นออกจากภาชนะถังน้ำ อุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำที่นิยมใช้กัน และสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันคือ ลูกลอยและแบบที่ใช้วิธีของการนำไฟฟ้า (Condwetioity)

### 1.1.1 อุปกรณ์การควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ลูกลอย

ลูกลอย : เป็นอุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายและมีใช้กันมาก เช่นใช้ควบคุมระดับน้ำในถังพักน้ำของส้วมชักโครก,อ่างน้ำในห้องน้ำ เป็นต้น โดยชุดของอุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอย ประกอบด้วยลูกลอยที่เคลื่อนที่ได้ง่าย ๆ ตามระดับความสูงระดับน้ำและที่ระดับสูงจะปิดวาล์วหยุดการส่งน้ำ ราคาอุปกรณ์ต่ำ แต่เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่จึงอาจเสียได้ง่าย ชิ้นส่วนที่มักจะเสียบ่อย คือ วาล์ว โดยเฉพาะคือ ซีล (Seat) และเนื่องจาก ผลของช่วงคุมระดับน้ำ ขึ้นอยู่กับความยาวของแกนที่ต่อจากลูกลอยไปที่วาล์วเท่านั้น พร้อมทั้งการเคลื่อนที่ของลูกลอยลอยหมุนเป็นรูปเส้นโค้งวงกลม (Arc) จึงทำให้ช่วงการควบคุมระดับน้ำสั้น และไม่สามารถใช้งานได้กับระดับน้ำที่มีอุณหภูมิสูงที่อาจมีผลต่อโครงสร้างทางกายภาพของลูกลอย และความผิดพลาดในการควบคุมระดับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลูกลอย อันเนื่องมาจากความผิดปรกติทางกลไกของชุดควบคุม จึงไม่เป็นที่นิยมในการจะนำเอาชุดควบคุมระดับน้ำ แบบลูกลอย มาใช้งานในบลักษณะที่ต้องการความแน่นอน และสภาพการทำงานที่พิเศษเฉพาะ

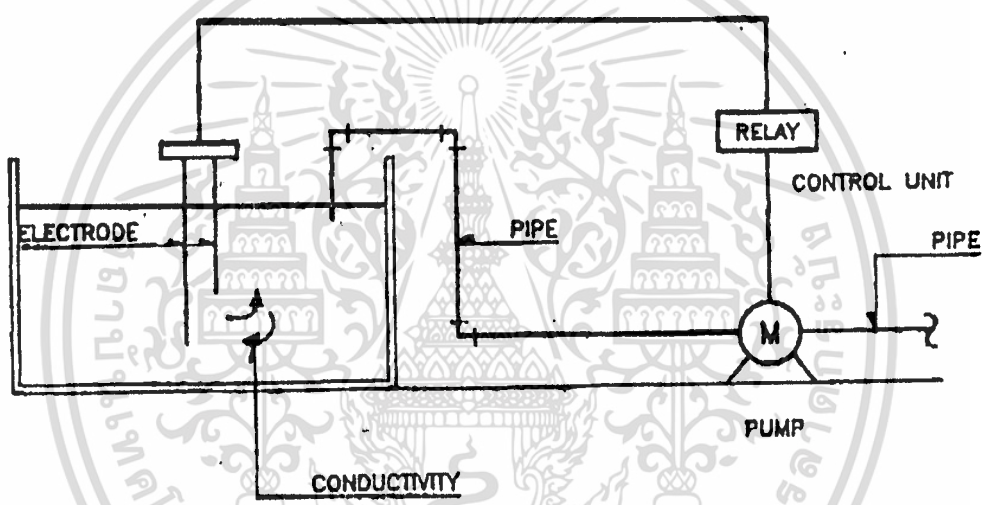



รูป 1.1 การควบคุมระดับใช้ลูกลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 อุปกรณ์การควบคุมของเหลวโดยใช้อิเล็คโทรด

อุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำแบบใช้หลักการการนำไฟฟ้า (conductivity) จากลักษณะด้วยของการใช้อุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอยดังที่กล่าวมาแล้ว จึงได้มีการนำเอาการควบคุมแบบนี้มาใช้แทน เนื่องจากว่าที่สภาวะเดียวกัน ชุดอุปกรณ์การควบคุมแบบนี้จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า




รูป 1.2 การควบคุมระดับน้ำแบบใช้หลักการนำไฟฟ้า (conductivity)

การควบคุมระดับน้ำแบบใช้หลักการนำไฟฟ้า ใช้สำหรับการควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ซึ่งระดับไม่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมากนัก เท่านั้น ใช้มากในสารละลาย เช่น น้ำเสีย sewage) , น้ำในอุตสาหกรรม (industrial water) , น้ำบาดาล (DISTILLED WATER) เป็นต้น และสามารถใช้ได้กับของน้ำที่มีอุณภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดอุปกรณ์การควบคุมระดับน้ำแบบนี้ เป็นเครื่องอิเลคโทรนิคส์ที่ง่าย และเชื่อถือได้ อีเล็คโทรด (electrode) วัดระดับจะติดตั้งในน้ำ โดยให้ปลาย (Tip)อยู่ในระดับที่ต้องการควบคุม ปรกติแล้วจะใช้กราวนด์ อีเล็คโทรด (ground elec-trode) ที่ไวกว่า ในการทำงานจะป้อนสัญญาณ เอ.ซี. (AC : Alter nating current) แรงเคลื่อนต่ำเข้าสู่อีเล็คโทรดวัดระดับ (Level elec trode) เมื่อของเหลวที่เป็นตัวนำลัดวงจรระหว่างอีเล็คโทรดสู่กราวนด์อีเล็คโทรด รีเลย์ในชุดควบคุมจะทำงาน ตามตัวอย่างในรูปที่ 2.2 เราใช้อีเล็คโทรดตรวจ ระดับสามแห่ง แห่งหนึ่งสำหรับระดับต่ำ , ระดับกลาง และแห่งที่เหลืออีกแห่งก็สำ หรับระดับสูงซึ่งจะนำเอาผลที่ได้นำไปควบคุมปั๊ม(pump)ระบบเช่นนี้เมื่อใช้กับจำนวน อีเล็คโทรดที่มีความยาวต่างกันหลาย ๆ แห่งก็สามารถทำเป็นฟังค์ชั่น (Function) ต่าง ๆอย่างได้ผล เช่น ใช้เป็นสวิทช์สำหรับ การควบคุมลำดับการเปิดปิดปั๊ม (pumpsequence) หรือการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

ระบบควบคุมนี้มีข้อดีคือ

1. ราคาต่ำ
2. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่
3. สามารถทำเป็นฟังค์ชั่นการทำงานได้หลายวิธี
4. ใช้ได้กับที่เป็นสารละลายที่มีสารแขวนลอย อุณหภูมิสูงได้
5. ใช้วงจรอีเล็คโทรนิคส์ดเป็นแบบง่าย ๆ และทนทาน
6. ให้ความแน่นอนและ ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าลูกลอย

แต่ระบบควบคุมแบบนี้ ใช้ได้กับของเหลวและของแข็งที่เปียกชื้นบาง ชนิดเท่านั้น เนื่องจากการควบคุมแบบนี้ใช้อุปกรณ์การควบคุมโดยใช้แท่งอีเล็คโทรด แทนลูกลอยจึงมีชื่อเรียกว่า Floatless flow Iiquild level control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 Floatless Flow liguid level Control

คือการควบคุมระดับน้ำหรือของเหลวโดยอาศัยหลักการนำไฟฟ้า โดอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ ในการควบคุมเพื่อติดต่อให้ pump ทำงานหรือหยุดทำงานซึ่งตัวที่จะสร้างสัญญาณให้วงจรอิเลคทรอนิคส์ทำงานก็คือ แท่งตัวนำ ที่ทำจากโลหะที่เราเรียกว่า แท่งอิเลคโทรด ซึ่งแท่งนี้เราสามารถปรับตำแหน่งจุดเต็มและจุดหมดของน้ำได้ นอกจากนี้ยังทนอุณหภูมิสูงๆได้โดยไม่เกิดการผิดเพี้ยน เพราะฉะนั้นโรงงานอุตสาหกรรม จึงนิยมใช้กันมากกว่า ลูกลอย

ความต้องการพื้นฐานทั่ว ๆ ไปในระบบการควบคุม คือความต้องการความมั่นคง (stable)ในการทำงาน หน่วยควบคุมการทำงานร่วมกับหน่วยวัดตรวจสอบความเบี่ยงเบนของโปรเซส(process)โดยการเปรียบเทียบตัวแปรโปรเซสกับค่าเป้าหมาย เพื่อสร้างสัญญาณไฟควบคุมโปรเซสให้ทำงานตามเป้าหมายที่กำหนด การกระทำของหน่วยควบคุมดังกล่าวเรียกว่า control mode หรือ control action

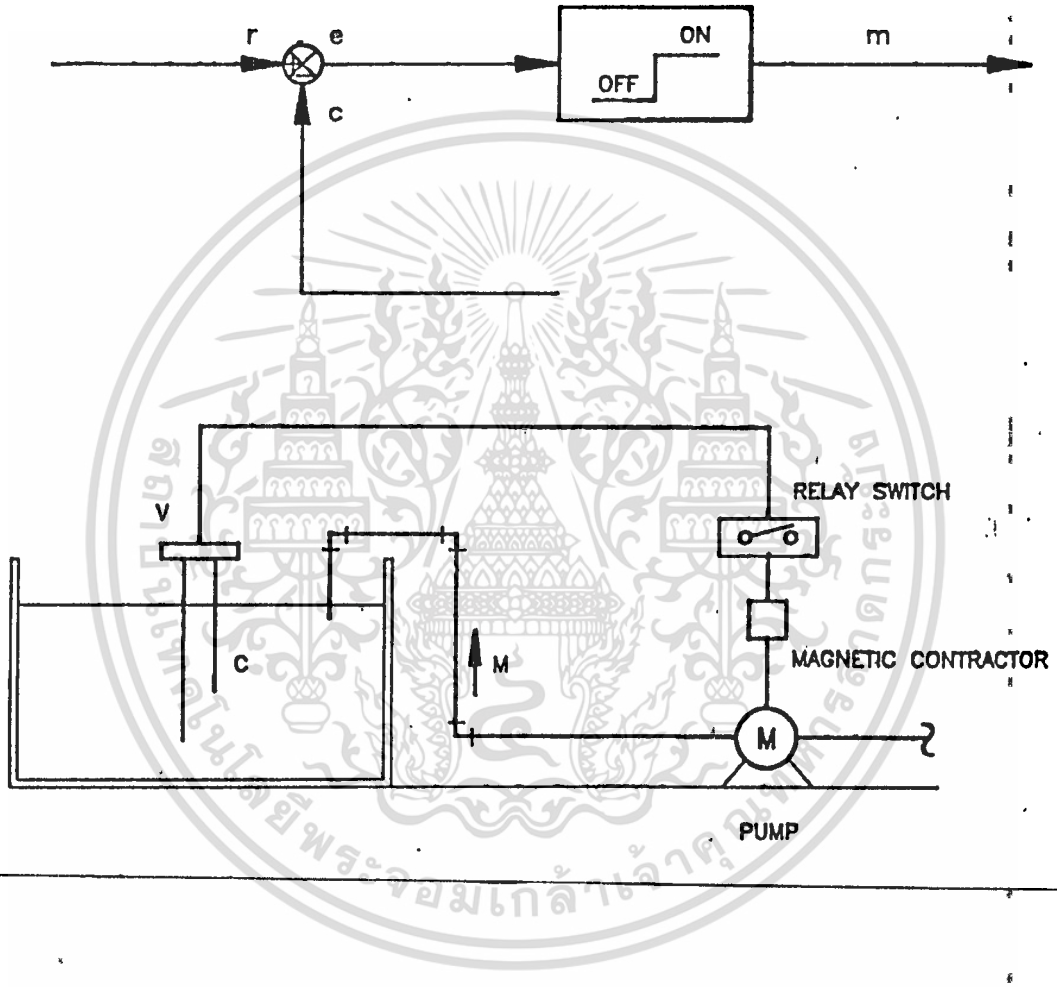
control mode แบ่งตามลักษณะการทำงานคือ two position control หรือ on-off control , proportional (P) control , integral (I) control,derivative (D)control, proportional-inregral (PI) contsrol,proportional derivative (PI) control และ proportional-integral-derivative (PID) control ส่วนในรายละเอียดเหล่านี้หาอ่านได้จากหลักการควบคุมอัตโนมัติ

ตามที่ได้เสนอบางส่วนของ การควบคุมอัตโนมัติมาเพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงงานเรื่อง floatless flow liquidlevd control นี้ใช้หลักการของ ControlMode คือ Two Position Control หรือ On Off Control

on off control หรือ two-piosition controlเป็นระบบควบคุมที่ใช้มากทั้งในวงการอุตสาหกรรมและตามบ้านอยู่อาศัยทั่วๆ ไป เพราะใช้ง่ายราคาถูก การควบคุมจะใช้คอนแทคจากลีเลย์เป็นสวิทช์ตัดต่อ เพื่อให้ค่าสัญญาณควบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุมเปลี่ยนไปอยู่ที่ค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุม คือ สภาพ off ค่าสูงสุดคือสภาพ on ดังรูป




รูปที่ 1.3 การส่งสัญญาณให้รีเลยสั่งงานให้มอเตอร์ทำงาน

เมื่อ C = ตัวแปรโปรเซส (Control variable)

V = เป้าหมาย (Sefpomt)

M = ตัวแปรขับเคลื่อน

จากหลักการาข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เราจะนำไปประยุกต์สร้าง Hoatless ขึ้นมาดังจะกล่าวในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีการควบคุมของเหลวพร้อมอุปกรณ์ควบคุม

## 2.1 SUPPLY VOLTAGE

ในที่นี้หมายถึงแหล่งจ่ายแรงดันที่จะนำมาใช้กับมอเตอร์ปั๊ม, ขดลวดของแมกเนติคคอนแทคเตอร์ (MAGNETIC CONTACTOR), ชุด CONTROL ดังนั้นก่อนอื่นในการจะนำเอาระบบแรงดันขนาดเท่าใดมาใช้จะต้องพิจารณาระบบแรงดันที่จะต้องใช้กับมอเตอร์ปั๊มก่อนเช่น มอเตอร์ปั๊มที่ใช้ทั่วๆไปเป็นระบบ 3 เฟส 380 โวลท์หรือจะเป็นแบบเฟสเดี่ยว (SINGLE PHASE) 1 เฟส 220 โวลท์ ต่อมาก็พิจารณาว่าขดลวดของแมกนิติคคอนแทคเตอร์ใช้ไฟกี่โวลท์ส่วนมากก็เป็น 220,380 โวลท์ แล้วแต่การใช้งานของระบบนั้นๆอีกทั้งค่า AC ของแมกนิติคด้วยว่าใช้ในงานอะไรเช่น AC 1 ใช้กับโหลด RESISTOR AC 2 ใช้กับโหลด ที่มีค่า INDUCTIVE ที่มีค่าน้อยเป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นว่า แหล่งจ่ายแรงดันที่จะนำมาใช้กับระบบจะต้องให้มีค่าเท่ากับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ให้มีค่าเท่ากับค่าแรงดันของอุปกรณ์ต่างๆ ในชุด FLOATLESS RELAY ต้องการ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อตัวอุปกรณ์และเกิดประสิทธิภาพในการทำงานเต็มที่

## 2.2 CONTROL UNIT

คือ ชุดควบคุมที่เป็นวงจรอิเลคทรอนิคส์แบบหนึ่ง ที่ให้สถานะเอาท์พุท (OUT PUT) ออกมาเป็นสถานะ ON-OFF ตัวรีเลย์ โดยอาศัยการตรวจจับของระดับน้ำในถังเก็บกักน้ำ คำว่า ตรวจจับในที่นี้หมายถึง การปรับความยาวของแท่งอิเลคโทรดให้ได้ระดับที่ต้องการแล้ว ก็ใช้แท่งอิเลคโทรดกราวนด์อีกแท่งในการผ่านกระแสไฟฟ้าของวงจรอิเลคทรอนิคส์ ให้ครบวงจรที่แท่งอิเลคโทรนิคอันหนึ่ง ที่ปรับตั้งไว้เพื่อกำหนดระดับที่ต้องการซึ่งตัวกลางคือ น้ำ เมื่อระดับน้ำท่วมแท่งอิเลคโทรดกราวนด์และอิเลคโทรดที่ปรับตั้งไว้ ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าครบวงจร อันเป็นผลทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้วงจรอิเลคทรอนิคส์ทำงาน ON-OFF รีเลย์ได้นั้นคือเราใช้แท่งอิเลคโทรดเป็นตัวตรวจจับระดับน้ำในลักษณะ เช่นนี้นั้นเองคำว่า รีเลย์นี้ คืออะไรทำไมถึงจำเป็นต้องควบคุมการON-OFF รีเลย์ด้วย เราลองมาดูทฤษฎีของรีเลย์กันบ้าง

2.3 **รีเลย์ (RELAY)**

จำเป็นมากในชุดควบคุมแบบ FLOATLESS RELY เนื่องจากใช้เป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ตัวใหญ่ที่รับกระแสได้สูงโดยการนำเอาคอนแทคของตัวมันเองเป็นตัวตัดวงจรไฟจาก SUPPLY VOLTAGE เพื่อจ่ายไปยังคอยล์หรือขดลวดของแมกนิติคคอนแทคเตอร์ของ ชุดควบคุมมอเตอร์ปั๊ม

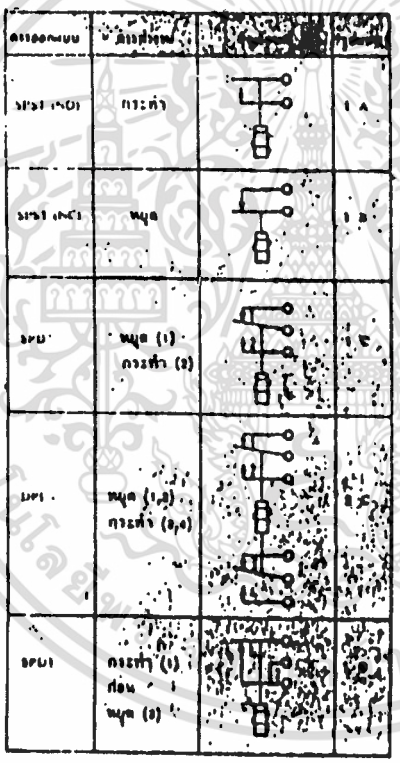
รีเลย์ เป็นสวิทช์แม่เหล็กไฟฟ้าที่อาศัยสนามแม่เหล็กจากขดลวดเป็นตัวปิดหรือเปิดวงจรโดยใช้หน้าสัมผัสหนึ่งอันหรือมากกว่า หน้าสัมผัสของรีเลย์ถูกจัดไว้หลายรูปแบบ รูปร่างของสวิทช์สังเกตโดยจำนวนของขั้ว(POLE) มีตัวย่อเป็น "P" และแขน (THROW)ย่อด้วย "T" เราจะใช้ตัวย่อแสดงถ้ามีหนึ่งเดียวโดยใช้ตัวย่อเป็น "S"(SINGLE)ถ้าเป็นคู่จะใช้"D"(DOUBLE)เช่น SPST,SPDT,DPDT ซึ่งอาจจะมีหลายชั้น เช่น 3PST , 4PDT ขดลวดรีเลย์สามารถใช้กับหน้าสัมผัสน้อยๆ ชุดหรือหลายๆชุดได้

ในรูปที่ 2.1 แสดงถึงรีเลย์แบบพื้นฐาน 4 แบบ รูปแบบที่ 1Aเป็นแบบ "ปรกติเปิด"ย่อว่า NO (NORMAL OPEN) จนกระทั่งมีไฟเลี้ยงขดลวดวงจรถึงจะปิด ในรูปที่ 1B เป็นชนิด"ปรกติปิด"ย่อว่า NC(NORMAL CLOSED) หน้าสัมผัสเป็นแบบคู่ (DOUBLE THROW CONTACT) ในแบบแรกเป็นการจัดตัวชนิด "หยุดก่อนทำ" ( BREAK-BEFORE-MAKE ) และแบบหลังเป็น "ทำก่อนหยุด" ( MAKE-BEFORE-BREAK ) การอ้างอิงถึงรุ่นรีเลย์ในแบบ A-D ซึ่งเป็นแบบมาตรฐานจะใช้การเติมจำนวนของขั้วเข้าไปข้างหน้าของตัวอักษรจากรูป คือ เขียนเป็น 1A,1B,1C,2C และ 1D รีเลย์ที่เป็นชนิดที่มีหน้าสัมผัสรวมหลายๆหน้าสัมผัสเขียนเป็น เช่น 1A,1B 2A2C, หลายๆชนิดจะมีรูปแบบทำนองเดียวกัน

ในรูปแบบ C ชุดของหน้าสัมผัสทั้งคู่จะเปิดขั้วขณะโดยหน้าสัมผัสตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่มีการกระตุกและปราศจาก [illegible] ในตอนที่เกิดการสวิทช์ซึ่งกับระบบสัญญาณเสียงที่กระแสจากัดหรือเพื่อใช้กับสัญญาณควบคุมหรือ เป็นการลดปัญหา เนื่องจากการสไปส (SPIKE) ซึ่งเกิดจากที่เราทำการสวิทช์ซึ่งโหลดที่เป็นขดลวด โดยธรรมชาติแล้วหน้าสัมผัสรูปแบบ D จะไม่สามารถสวิทช์ระหว่าง 2 แหล่งจ่ายได้เพราะจะเกิดการลัดวงจรทำให้เกิดความเสียหายได้



รูป 2.7 แสดงการจัดตัวของรีเลย์ระบุเป็นรูปแบบ A-D, แบบ A คือ "ปรกติเปิด" ในขณะที่รูปแบบ B เป็น "ปรกติปิด" สำหรับรูปแบบ C และ D ใช้หน้าสัมผัสที่เป็นแบบคู่โดยที่รูปแบบ C คือ"หยุดก่อนทำ" ส่วนรูปแบบ D คือ "ทำก่อนหยุด"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
033327

รีเลย์ส่วนใหญ่ใช้เป็นสวิตช์สัญญาณ โดยมีช่วงจากกำลังงานต่ำเป็นไมโครวัตต์ ของสัญญาณจนถึงหลายๆ เมกกะวัตต์ โดยขนาดของรีเลย์จะแปรเปลี่ยนไปตามเทคนิคของการสร้าง ตารางที่ 1 จะสรุปชนิดต่างๆ ของรีเลย์ที่พบเห็นบ่อยมากที่สุด

**ตารางที่ 1 คุณสมบัติของรีเลย์ชนิดต่างๆ**

| ชนิด | ขนาด (นิ้ว) | อัตราหน้าสัมผัส | กำลังและแรงดันของขดลวด | เวลาสวิตช์ |
|---|---|---|---|---|
| ใช้งานทั่วไป (แบบปลั๊กอิน) | 0.8-1.5W<br>0.8-1.4D<br>1.2-2.0H | 3-10A<br>28 $V_{DC}$<br>120-240 $V_{ac}$ | 6, 12, 24, 120V<br>1.2 W DC<br>2 VA ac | 15-30 ms |
| ใช้งานทั่วไป (ขนาดเล็ก) | 0.8-1.2W<br>0.4-0.75D<br>0.4-0.7H | 1-3 VA<br>28 $V_{DC}$<br>120 หรือ 240 $V_{ac}$ | 5, 6, 12<br>24, 48 $V_{DC}$<br>0.8-1 W | 5-10 ms |
| รีดรีเลย์ | 0.8-1.2W<br>0.3-0.8D<br>0.3-0.5H<br>ใช้กับรูปแบบ DIP ได้ด้วย | 0.5-2A<br>5-50W<br>28-250 $V_{DC}$<br>และ ac | 5, 6, 12, 24 $V_{DC}$<br>50-400 mW<br>(ใช้ได้กับขดลวดถึง 1V) | 0.2-1 ms |
| เฮอร์เมติก TO-5 | 0.6-1W<br>0.3-0.5D<br>0.3-0.8H | 0.5-5A<br>28 $V_{DC}$<br>115 $V_{ac}$ | 4-32 $V_{DC}$<br>120 mW | 1 ms |
| เฮอร์เมติก และมีการซีลด์ | 0.8-1W<br>0.3-0.5D<br>0.3-0.9H | 0.5-2A<br>28 $V_{DC}$<br>115 $V_{ac}$ | 5-115 $V_{DC}$<br>100-400 mW | 2 ms |
| RF รีเลย์ | 0.8-1W<br>0.4-1D<br>0.4-1H | 10-25 W RF<br>hot To 150W<br>RF dry | 5-50 $V_{DC}$<br>250 mW | 5-10 ms |
| กำลัง | ขนาดทั่วไป 2-4 นิ้ว | 10-40A<br>120, 240 $V_{ac}$<br>และสูงกว่า | 6, 12, 24, 120<br>208, 240V<br>2-5 W DC<br>6-20 VA ac | 15-50 ms |

รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงรีเลย์ที่ใช้งานทั่วไปเป็นแบบปลั๊กอิน (PLUG-IN) โดยมีขาเป็นซ็อคเกต เหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีกำลังปานกลาง คือกระแส 10-30 แอมป์ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 10-30 แอมป์ ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

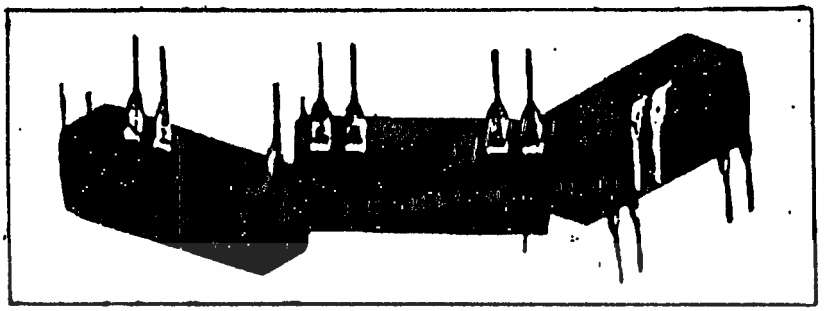
120/240 โวลต์ ซ็อคเกตเป็นแบบข้ากลม 8 ขา ขนาดโตสุดของรีเลย์ชนิดนี้มีขนาด 2 นิ้ว โดยมีฝาครอบกันฝุนละออง ซึ่งเป็นการป้องกันเบื้องต้นแต่ไม่ได้ ถูกผนึก (SEALED) รีเลย์ที่ใช้งานทั่วไปขนาดเล็กมักจะมีฝาครอบเป็นพลาสติก และมีขาต่อที่สามารถต่อลงยังแผ่นวงจรพิมพ์ส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาด .1 นิ้ว ทนกระแสการสวิทช์ซึ่งได้ 1-5 แอมแปร์

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างรีเลย์ชนิดใช้งานทั่วไปที่ส่วนมากจะมีขาเป็นซ็อกเกต

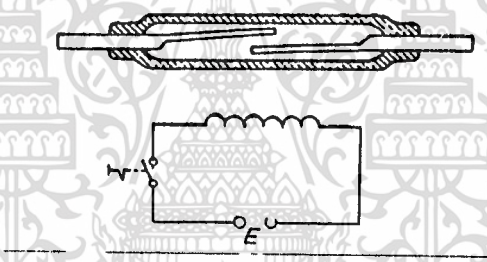
หรีดรีเลย์(REED RELAY) แสดงในรูปที่ 2.4 มีทั้งแบบเปลือยและแบบผนึกไว้โดยปกติแล้วมีขาต่อใช้งานบนแผ่นวงจรพิมพ์ (มีขาคล้ายๆกับขาไอซีแบบ DIP) รูปที่ 2.5 เป็นหรีดรีเลย์แบบหน้าสัมผัสเดียว สนามแม่เหล็กจะถูกผนึกอยู่ภายในตัวถังที่เป็นแก้ว ความเร็วในการสวิทช์จะเร็วกว่าแบบใช้งานทั่วไปมากคือประมาณ 500 ไมโครวินาที โดยที่รีเลย์ที่ใช้งานทั่วไปมีความเร็วประมาณ 5-30 มิลลิวินาที

หรีดรีเลย์ทั้งหลายมุ่งที่จะทำเป็นหน้าสัมผัสแบบแห้ง (DRY CONTRACT) ซึ่งแตกต่างไปจากแบบที่ใช้เป็นแบบเปียก (ใช้สารปรอทเรียกว่าMERCURY WETTED) หรีดรีเลย์ใช้ ในงานสวิทช์ซึ่งที่มีกำลังต่ำ โดยปกติหน้าสัมผัสจะทนแรงดัน ได้ตั้งแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หรีดรีเลย์ในรูปบบของไอซีที่สามารถติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้สะดวก




รูปที่ 2.5 หรีดสวิทช์หน้าสัมผัสเดียวบรรจุอยู่ในตัวถังแบบผนึกแน่นจนอากาศเข้าไม่ได้มีความเร็วในการสวิทช์สูงถึง 500 ไมโครวินาทีการสวิทช์

200-500 โวลต์ กำลังงานของการสวิทช์จะเป็น 10-30 วัตต์เท่านั้นซึ่งกระแสจะได้เพียง 0.5-2 แอมป์ หรีดรีเลย์ที่มีใช้อาจมีถึง 6 ชั้ว ชนิดพิเศษแรงดันได้สูงถึง 1 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นชนิดสารบรอท (MERCURY REED RELAY) สามารถใช้กับงานกำลังสูงถึง 100 วัตต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าของขดลวดที่ใช้อยู่ในช่วง 1-24 โวลต์ และต้องการกำลังงานแค่เศษสวนของวัตต์เท่านั้น

ปัจจุบันมีรุ่นที่เล็กที่สุดโดยบรรจุอยู่ในตัวถังแบบ TO-5 ซึ่งมองดูเหมือนทรานซิสเตอร์ แต่บางแบบก็เป็นสี่เหลี่ยมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหรือ ความกว้างประมาณ 0.3 นิ้วคุณสมบัติต่างๆของหน้าสัมผัสมีข้อจำกัดมากกว่าหรีดรีเลย์ทั่วๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้ 28 โวลต์ หรือไฟฟ้ากระแสสลับ 120 โวลต์ ที่กระแสประมาณ 1 แอมป์ กำลังงานสูญเสียของขดลวดจะต่ำเพียงเศษส่วนของวัตต์เดียว ซึ่งใช้แรงดัน 32 โวลต์ รีเลย์จะถูกผนึกในตัวถังที่อากาศเข้าไม่ได้อุณหภูมิทำงานอยู่ในช่วง -40 องศาเซลเซียส ถึง 125 องศาเซลเซียส

รีเลย์ที่ถูกผนึกทุกด้านขนาดใหญ่ จะสามารถสวิทช์ที่กระแสได้สูงถึง 5 แอมป์ โดยมีโครงเป็นกระป๋องผลึก (CRYSTAL CAN) และมีหมุดสำหรับ ต่อภายนอกรีเลย์ชนิดนี้เป็นรีเลย์ที่ใช้กับความถี่วิทยุ โดยมีขั้วต่อเป็น โคแอกเซียล ดังรูปที่ 2.6

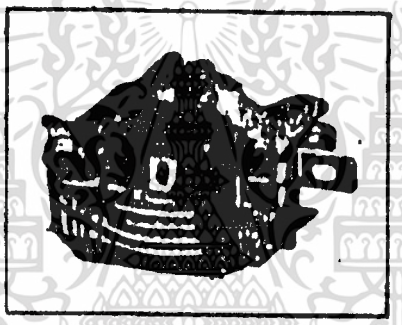
รูปที่ 2.6 รีเลย์แบบตัวถังถูกผนึกแน่นจนอากาศเข้าไม่ได้อีกชนิดหนึ่งมีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ใช้ในย่านความถี่วิทยุตั้งแต่ 500 เมกกะเฮิรตซ์มีขาต่อเป็นสายโคแอกเซียลทุกขา และอัตราใช้งานของหน้าสัมผัสอยู่ที่ 150 วัตต์

ที่จะแม็ตช์กับอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์มของสายส่งกำลังทั่วๆ ไปสามารถใช้กับความถี่ตั้งแต่ 500 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ซึ่งขึ้นอยู่กับรุ่นของรีเลย์ปกติอัตราทนกำลังของหน้าสัมผัสประมาณ 150 วัตต์

รีเลย์แบบกำลัง (POWER-SWITCHING RELAY) มีขนาดใหญ่กว่าและมีโครงสร้างเป็นแบบเปิดใช้สำหรับการสวิทช์ทุกๆ ระดับของกำลังงานจนถึงหลายๆ เมกะวัตต์ ดังรูปที่ 2.7 เป็นรีเลย์ที่ใช้กับงานที่ต้องการกำลังสูง เช่นในวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์รีเลย์ชนิดนี้ทนกระแสได้สูงถึง 30 แอมป์มีขนาด 2-4 นิ้วกำลังงานที่สูญเสียไปในขดลวดประมาณ 2 วัตต์ ถ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและประมาณ 5-10 โวลต์แอมป์กรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหน้าสัมผัสสำหรับ เพื่อการสวิตช์ซึ่งมอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีหน้าที่เช่นเดียวกับรีเลย์แบบกำลัง แต่โครงสร้างจะใหญ่เป็นพิเศษกว่าเพื่องานที่ต้องการ การใช้งานหนักๆ หน้าสัมผัสถูกทำให้เคลื่อนที่ โดยการอาศัยโซลีน่อยด์ ซึ่งจะใช้แรงดันที่มากกว่าแรงในภาวะปกติที่ถูกใช้ในรีเลย์แบบไม่ใช้กำลังซึ่งนำมาแทนที่แบบที่ขดลวดพันอยู่บนแกนที่ตายตัว



รูปที่ 2.7 รีเลย์แบบกำลังที่มีโครงสร้างแบบเปิดสามารถสวิทช์ที่กระแสได้สูงถึง 40 แอมป์ใช้สำหรับงานควบคุม

เราได้เห็นแล้วว่ารีเลย์ที่ใช้งานกับระดับสัญญาณต่ำนั้น ไม่สามารถใช้ได้กับงานที่ต้องการกำลังสูงๆ หรือในทางกลับกัน รีเลย์แบบกำลังไม่มีคุณภาพดีพอกับงานที่มีระดับสัญญาณต่ำ การเลือกใช้หน้าสัมผัสสรุปได้ตามตารางที่ 2 การเลือกใช้งานหน้าสัมผัสให้ถูกต้องนั้นเป็นข้อที่สำคัญเพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยลดแบบกำลัง (POWER LOAD) จะมีการทำความสะอาดหน้าสัมผัสด้วยตัวเอง (SELF CLEANING CONTACT) เมื่อมีความโน้มเอียงที่จะเกิดการอาร์ค (ARC) และอาจจะเกิดการไหม้เนื่องจากปฏิกริยาออกซิเดชั่น (OSIDATION) หรือทำให้หน้าสัมผัสเปรอะเปื้อนได้ ( เรียกว่าหน้าข้าวดัง ) วงจรที่ใช้งานระดับสัญญาณต่ำ ไม่จำเป็นต้องทำอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีโหลดแบบกำลังแต่เราเองควรมีการทำความสะอาดหน้าสัมผัสเหมือนกัน เพราะถ้ารอยเปรอะเปื้อนของหน้าสัมผัส ทำให้สัญญานขนาดต่ำๆไม่สามารถผ่านไปได้โดยสะดวกจะเป็นปัญหาต่อการใช้งาน

หน้าสัมผัสที่ใช้ในวงจรแบบแห้ง ( DRY-CIRCUIT CONTACT) หมายถึงหน้าสัมผัสนั้นเป็นพาหะของกระแสแต่จะไม่ NAKE และ BREAK กระแสในขณะที่วงจรโหลดของม้วนพลังงาน) จะใช้วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น หรือใช้การชุบวัสดุดังกล่าว การใช้งานจะเป็นการบัดเช้าหากัน (WIPING) ดังนั้นหน้าสมัผัสจะถูกเลื่อนให้เข้าหากันและกัน และเป็นลักษณะ 2 แฉก ( BIFURCATED) กล่าวคือช่องตามยาวตรางกลางของหน้าสัมผัสจะแยกออกเป็น 2 ส่วนซึ่งเพียงพอสำหรับกระแสไฟฟ้าที่จะเดินได้แล้ว ชนิดที่ใช้กับสัญญาณต่ำ ๆ หน้าสัมผัสของรีเลย์ที่เป็นแฉกมักชุบด้วยทองคำหรือใช้โลหะมีค่าชนิดอื่น ๆ ( เช่น ทองคำ,เงิน หรือ ทองคำขาว) หน้าสัมผัสในหรีดรีเลย์หรือในริเลย์ที่ถูกผนึกแน่นจนอากาศเข้าไม่ได้ (เรียกว่า HERMETRICALLYRELAY) นั้น ก็ไม่ต้องการที่จะมีความต้านทานเกิดขึ้นเช่นกัน ซึ่งปกติจะทำด้วยโลหะจำพวกโรเดี่ยม (RHODIUM) หรือ รูธิเนียม (RUTHENIUM)

รีเลย์แบบกำลังต้องการหน้าสัมผัสที่ใหญ่ ซึ่งต้องมีแรงในการตัดต่อหน้าสัมผัสสูง ซึ่งจะสามารถใช้กับกระแสและแรงดันที่สูงได้การอาร์คที่เกิดขึ้นจะต้องต่ำและความต้านทานที่เกิดขึ้นไม่ว่าโดยการกระทำจากกระแสไฟฟ้า หรืออุณหภูมิจะต้องต่ำด้วย เพื่อจะลดปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นโดยปกติมักใช้หน้าสัมผัสเป็นแบบปุ่ม (คล้ายกระดุม) ในรุ่นที่ใช้กับกำลังงานสูงจะนิยมใช้ออกไซด์ของ เงิน-แคดเมียม เพราะทนเรื่องของการเชื่อมติด (WELDING) ได้ดีรวมทั้งเรื่องของการดับอาร์คที่เกิดขึ้นและเหมาะสำหรับโหลดที่เป็นรีแอกติฟ (WELDING) คืออุปกรณ์จำพวกตัวต้านทาน) หรือกับโหลดที่มีการกระชากของกระแสสูง แต่จะไปใช้สวิตซึ่งแรงดันต่ำกว่า 12 โวลต์ โลหะที่เป็นเงินเหมาะกับโหลดที่มีกำลังงานปานกลางและงานในระบบสื่อสารแต่จะใช้งานไม่ต่ำกว่ 6 โวลต์ เงินเป็นโลหะที่เกิดออกไซด์ได้ง่ายดีดังนั้นหน้าสัมผัสจึงมักจะชุบด้วยทองคำเพื่อป้องกันการสะสม ทองคำจะทำให้หน้าสัมผัสมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความทนทานต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้หน้าสัมผัสขึ้นอยู่กับการเสียดกันและการรักษาหน้าสัมผัสของการใช้งานอีกด้วย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำเป็นหน้าสัมผัส

| ชนิดของหน้าสัมผัส | การประยุกต์ใช้งาน | อัตราใช้งาน | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| แยกเป็น 2 แฉก, ชุบทอง หรือ เคลือบทอง | แบบ "แห้ง" และกระแสต่ำ ใช้ในเครื่องมือวัด และการสวิตชิ่งสัญญาณ | 0-0.2A ทนแรงดันได้ 120 $V_{ac}$ แต่ใช้งานได้ดีที่สุดที่ 24V หรือต่ำกว่า | ค่าความต้านทานหน้าสัมผัสต่ำ และไม่เปลี่ยนแปลงค่า |
| เงิน | ต้านการสื่อสาร | 2-5A | จะเกิดออกไซด์ได้ง่าย ควรชุบด้วยทองคำเพื่อป้องกันการสะสมของออกไซด์ |
| ซิลเวอร์แคดเมี่ยม-ออกไซด์ | งานแบบเพาเวอร์ที่มีโหลดแบบอินดักตีฟ และคาปาซิตีฟ, และเหมาะกับที่ที่มีกระแสไหลผ่านสูง | 5 A ขึ้นไป | ต่อต้านการเชื่อมติด, สามารถดับอาร์กได้ดี และเหมาะที่จะใช้กับแรงดันต่ำกว่า 12V |
| ปรอทเปียก | แบบ "แห้ง" และกระแสต่ำอายุการใช้งานนานเพราะไม่มีการกระโดดของหน้าสัมผัส | 2-5 A | ต้านหน่วงเคลื่อนไหวในแนวตั้ง ±30 องศา |

ซิลเวอร์พัลราเดี่ยม (SILVER PALLAKIUM คือ ธาตุแท้ชนิดหนึ่งเป็นโลหะคล้ายทองขาว) จะเกิดออกซิเดชั่นยากกว่าแต่มันจะแยกตรงเรื่องของค่าความต้านทานและค่าความเร็ว ซึ่งด้อยกว่าแบบเงินบริสุทธิ์ ซึ่งนิยมนำซิลเวอร์พัลราเดี่ยมมาใช้งานที่มีกำลังน้อย ๆ ที่ต่ำกว่า 60วัตต์ในหรีดริเลย์ที่เป็นหน้าสัมผัสแบบเปียกชนิดปรอท(MERCURY-WETTED CONTACT) จะมีฟิล์มบางๆ จากแอ่งเล็กๆ ที่มีสารปรอทาสอยู่ (โดยไม่ได้เป็นแอ่งของตัวมันเอง) ซึ่งจะสัมพันธ์กับหน้าสัมผัส

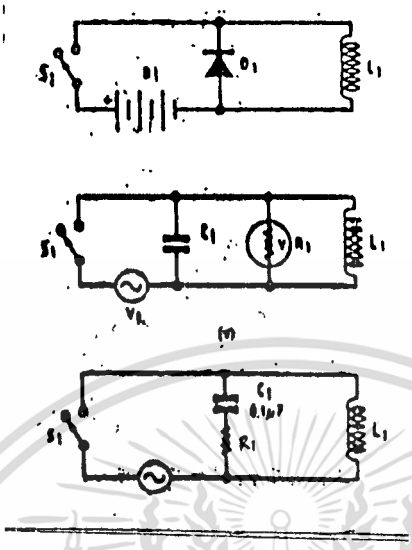
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มที่เป็นสารปรอท (MERCURY FILM) เป็นตัวเพิ่มขีดความสามารถในเรื่องของการสวิตชิ่งกำลังได้ดีและเป็นตัวลดความต้านทานหน้าสัมผัสให้ต่ำลง กล่าวคือทำให้ได้กำลังสูงนั่งเองลองดูชนิดต่าง ๆ ของรีเลย์ซึ่งมีจำกัดในตอนที่เป็นหน้าสัมผัสแบบแห้งคือมีขนาด 0.5 แอมห์, 10 วัตต์ดีซี,ความต้านทานหน้าสัมผัส 0.1 โอห์ม แต่ถ้าเป็นหน้าสัมผัสแบบเปียกที่ใช้ปรอทจะเป็น 2 แอมฟ์, 50 วัตต์ดีซี และความต้านทานหน้าสัมผัสเป็น 0.05 โอห์ม อายุการใช้งานของหน้าสัมผัสชนิดปรอทจะสูงกว่ามาก

การสวิทช์ซึ่งโหลด ที่เป็นอินดักติพจะเป็นตัวสร้างปัญหาเป็นอย่างมาก เพราะกระแสไหลผ่านขอลวดนั้นไม่สามารถที่จะหยุดได้ทันทีทันใด ถ้าขดลวดถูกเปิดออกทันทีขณะที่ยังมีกระแสไหลอยู่ก็จะเกิด สนามแม่เหล็กยุบตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นอย่างสูง (เรียกว่า BACK E.M.F.) โดยมีขั้วเช่นเดียวกับกระแสที่ไหล ซึ่งหลักการอันนี้นำมาใช้ในเรื่องของระบบจุดระเบิดในรถยนต์หรือ ในหม้อ-แปลงพลายแบ็คของโทรทัศน์ แรงดันไฟฟ้าสามารถขึ้นสูงเป็นกิโลโวลต์ซึ่งทำให้หน้าสัมผัสพังได้เนื่องจากเกิดการอาร์คอย่างรุนแรง

เมื่อโหลดที่เป็นอินดักติพถูกสวิตช์ควรใช้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ ดูดกลืนการกระชาก (SURGE SUPPRESSION) โดยการทำให้มีกระแสไหลผ่านไปอีกทางหนึ่งในขณะที่หน้าสัมผัสเปิดออก สำหรับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ไดโอดต่อแบบให้ไบแอสกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการป้องกันหน้าสัมผัสเมื่อโหลดเป็นแบบอินดักติพโดย ใช้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดกลืนการกระชาก เพื่อ "ละลาย" กระแสให้ไหลไปอีกทางหนึ่ง เมื่อหน้าสัมผัสรีเลย์เปิดออก

(ก) ต่อไดโอดแบบให้ไปแอสกลับเมื่อเป็นโหลดแบบไฟฟ้ากระแสตรง

(ข) ใช้ MOV ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ เมื่อเป็นโหลดแบบไฟฟ้ากระแสสลับ

(ค) ใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ เมื่อเป็นโหลดแบบไฟฟ้ากระแสสลับ

เมื่อหน้าสัมผัสถูกเปิดออกกระแสของโหลดก็จะไหลจนกระทั่งลดลงเป็นศูนย์ค่าของแรงดันย้อนกลับสูงสุด (PEAK INVERSE VOLTAGE เขียนย่อเป็น PIV) ของไดโอดจะต้องมีค่าเกินกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้อย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์และไดโอดควรจะมีอัตราทนกระแสที่กระชากมากกว่าค่าของกระแส ที่ไหลผ่านโหลดยามปกติ เราอาจจะต่อตัวต้านทานอนุกรมกับไดโอดซึ่งช่วยให้การลดลงของกระแสเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น แต่จะเกิดแรงดันทรานเซี้ยนต์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ ทำให้ต้องใช้ตัวต้านทานที่มีค่ามาก เพื่อที่จะหน่วงเนี่ยวกระแสที่ไหลได้ ดังนั้นถ้าต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ก็จะสามารถลดค่าตัวต้านทานลงไปได้อย่างไรก็ตามค่าคงที่เวลา(TIME CONSTANT) จะเกิดจากผลคูณของตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุคือ $T_{cap} = RC$ ขณะที่ค่าคงที่เวลาที่เกิดจากการต่อตัวเหนี่ยวนำกับตัวต้านทานเป็น $T_{ind} = L/R$ นั่นคือ $T_{ind}$ มีค่าลดลงค่าของ ทรานเซี้ยนต์สามารถหาได้โดยใช้กฎของโอห์ม ดังนี้

$$V_{peak} = I_{load} * R_{serier}$$

รูปที่ 2.8 (ข) และรูปที่ 2.8 (ค) แสดงให้เห็นถึงวิธีการหนึ่งที่จะลดปัญหาเรื่องการกระชากของโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ , ในรูปที่ 2.8 (ข) นั้นใช้วาริสเตอร์ที่ทำจากออกไซด์ของโลหะ (DETAL-OXIDE VARISTOR หรือ MOV) และตัวเห็นประจุอัตราเบรกดาวน์โวลเตนของ MOV และของตัวเก็บประจุต้องมีค่าเกินกว่าค่ายอด (PEAK) ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้แก่วงจรสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 60 เฮิรตซ์ นั้นค่าแรงดันยอดจะเป็น 1.4144* Vrms ซึ่งเราสามารถที่จะตัด MOV ออกไปได้โดยการต่อตัวต้านทาน R 1 อนุกรมกับตัวเป็นประจุแทนดังรูปที่ 2.8 (ค)

ถึงแม้ว่าโหลดไม่ได้เป็นตัวเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สูงจะทำให้เกิดการอาร์คของหน้าสัมผัสในขณะที่วงจรเกิดเปิดออกได้ การเกิดอาร์คจะต่อเนื่องโดยอากาศที่แตกตัว (ICNIZED) จนกระทั่งแหล่งจ่ายถูกตัดออก นั้นจึงเป็นเหตุผลหนึ่งว่าอัตราทนแรงดันของหน้าสัมผัสที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 120/240 โวลต์จะถูกจำกัดลงแค่ 28 โวลต์ดีซี เท่านั้น เพื่อแก้ปัญหานี้ในรีเลย์ขนาดใหญ่จะใช้แม่เหล็กเป็นตัวเป่าอาร์คที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดของหน้าสัมผัสซึ่งเรียกว่า โบลว์ เอาต์แมกเนต (BLOWOUT MAGNET)โดยอาศัยสนามแม่เหล็ก เป็นตัวทำให้อาร์คเกิดการเบี่ยงเบนออกไปเหมือนกับลำแสงอิเลคตรอนในหลอดภาพโทรทัศน์ ที่ถูกหักเหโดยการใช้สนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา รวมทั้งต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

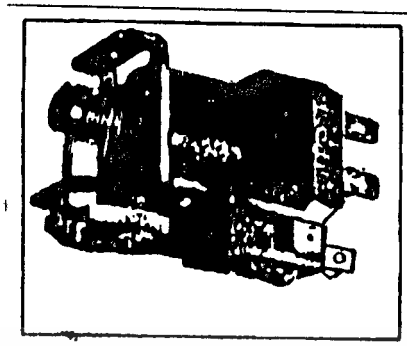
แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่พันอยู่บนส่วนคอของหลอกภาพ ( เรียกว่า โยักคอยล์ ) ดังนั้น เส้นทางของอาร์คจะไม่สามารถกระโดดจากหน้าสัมผัสหนึ่งไปยังอีกหน้าสัมผัสได้

รีเลย์ทุกชนิดสามารถใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้ รีเลย์ชนิดใช้งานทั่วไป และรีเลย์แบบกำลัง มักจะใช้ขดลวดไฟฟ้ากระแสสลับบางครั้งเราอาจจะพบว่ามีไดโอดเรียงกระแส (RECTIFIER DIODE) ต่ออยู่ภายใน จะใช้ขดลวดและแม่เหล็กที่มีโครงสร้างออกแบบไปในเชิงของไฟฟ้ากระแสสลับ การทำงานแบบกำไฟฟ้ากระแสสลับนั้นเวลาสวิทช์ชิ่ง ของรีเลย์มียาวนานเพียงพอที่จะทำให้รีเลย์ ไม่เกิดกเสียงคราง (BUZZ) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงเป็นศูนย์ซึ่งเรียกว่า ซีโร่คลอสซิ่ง (ZERO CROSSING) รีเลย์ชนิดใช้งานทั่วไปรีเลย์แบบกำลังนั้น จะมีความช้าเพียงพอ สำหรับหลีกเลี่ยงปัญหานี้ได้ เนื่องจากขดลวดของรีเลย์เป็นตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวรีเลย์จึงมีเฟสตรงข้ามกับแรงดันที่ตกคร่อมตัวรีเลย์ที่เรียกว่า " OUT OF PHASE " ในตารางที่ 1 นั้นเราจะเห็นได้ว่าอัตราไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นโวลต์แอมป์ ค่อนข้างจะสูงกว่ากำลังที่นับเป็นวัตต์ (WATTAGE) ของขดลวดไฟฟ้ากระแสตรง

รีเลย์ชนิดค้างหรือชนิดอิมพัลส์ (LATCHING OR IMPLUSE) จะเป็นตัวพลิบพลอบที่อาศัยทางด้านกลไก ซึ่งการเปลี่ยนสถานะตัวเองทำได้โดยการอาศัยพัลส์ซึ่งขณะที่ป้อนเข้ามา สามารถใช้งานกับแบตเตอรี่และแหล่งจ่ายกำลังงานขนาดต่ำ เนื่องจากมีการใช้กำลังเพียงครั้งเดียว คือตอนที่ทำให้ค้าง และจะยังคงสถานะค้างอยู่ได้ถึงแม้แหล่งจ่ายไฟจะถอดออกแล้ว ปกติมี 2 แบบคือ

1. ชนิดที่ใช้การค้างโดยสลักกลไก (MECHANICAL-TOGGLE)
2. ชนิดที่ใช้หรีดแม่เหล็ก (MAGNETIC-REED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของรีเลย์บชนิดค้างใช้การบิดสลักไปอีกด้านหนึ่ง จะเปลี่ยนสถานะก็ต่อเมื่อขดลวดถูกกระตุ้นจากสัญญาณพัลส์

ในรูปที่ 2.9 แสดงถึงรีเลย์ชนิดค้างโดยสลักกลไก กลไกของรีเลย์เหมือนกับที่ใช้ในสวิทช์ชนิดกดติดปล่อยดับขดลวดเป็นตัวดึงให้ขาขยับลงมาตรง ๆ ทำให้ยกเลิกการค้าง เมื่อไม่มีการกระตุ้น ขาจะเคลื่อนขยับขึ้นและพักอยู่บนรอยบากด้านขวามือ เมื่อถูกกระตุ้นครั้งต่อไปสลักจะถูกดึงไปด้านขวา

ในรีเลย์ชนิดค้างที่มีขดลวด 2 ขด นั้นใช้ขดหนึ่งเป็นตัวค้าง ขดที่เหลือเป็นตัวริเซต เราลองมาดูความคิดในการที่จะทำให้เกิดการค้างซึ่งมีขดลวด, ชี่เฟือง, ตัวกั้นที่ทำให้เฟืองหยุด (CAM) และชุดหน้าสัมผัสทั้งหลาย รวมกันเป็นรีเลย์ที่ใช้สำดับของอิมพัลส์ ตัวกั้นเฟืองให้หยุดปกติจะตัดให้หยุดการทำงานตามลำดับ(SEGUENCR )ที่เราต้องการ มักมีใช้ในเครื่องใช้อำนวยความสะอาดในบ้านเช่น เครื่องซักผ้าเป็นต้น สำหรับรีเลย์ชนิดค้างที่เป็นหริดแม่เหล็กจะมีแม่เหล็กถาวรอยู่ในขดลวดโดยแม่เหล็กมีแรงมากพอที่จะดูดหรือแต่ละอันพร้อม ๆ กันไว้ หลังจากที่เราให้ขดลวดทำงานคือหน้าสัมผัสดูดติดกันแล้วนั้นเองแต่ในสภาวะปกติแล้วแม่เหล็กถาวรตัวนี้มีแรงไม่พอที่จะดูดหรือให้ติดกันได้ ในช่วงที่มันหยุดนิ่งอยู่การทำให้ขดลวดทำงานทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ขั้วหนึ่งมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรวมกัน ซึ่งจะทำให้หรีดนั้นยังคงดึดกันอยู่แต่ถ้าเราป้อนกลับขั้วจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหักล้างซึ่งจะทำให้หรีดนั้นจากออกสำหรับการใช้งานจริงจะไม่สะดวกแน่ ถ้าต้องมาคอยเปลี่ยนขั้วของขดลวด จึงควรใช้ชนิดที่มีขดลวดเป็น 2 ขด คือใช้แม่เหล็กถาวรที่มีแรงน้อยกว่าที่ใช้ในชนิดที่ไม่มีการแลตช์เรียกว่าโพลาไรซ์ รีเลย์ (POLARIZED RELAY)สนามแม่เหล็กจะเป็นตัวลดกระแสเองขดลวด ที่จะทำให้หน้าสัมผัสทำงานแต่มีความแรงเพียงพอที่จะสามารถทำให้ขดขวดเกิดการหยุดทำงานได้ (DEEMERGIZED) รีเลย์ที่เป็นไอซีซึ่งออกแบบโดยบริษัท AROMAT โดยการใช้ไอซี,ตัวเก็บประจุและหรีดชนิดค้างในแพคเกจเดียวกัน ไอซีจะใช้ตัวเก็บประจุผลิตพัลส์ป้อนให้กับรีเลย์ การค้างจะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณควบคุมเป็นลอจิก "1" และเป็นการริเซตเมื่อสัญญาณขาดควบคุมเป็นลอจิก "0" ขดลวดจะสูญเสียกำลังงานก็ตอนที่มีพัลส์ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยที่ใช้ถึงต่ำมาก รีเลย์ที่ใช้หน่วงเวลานั้นจะทำให้เกิดการหน่วงอย่างแท้จริง หรือให้ออกมาก่อน (DROPOUT) หรือทั้ง 2 อย่างแสดงดังรูปที่ 2.10

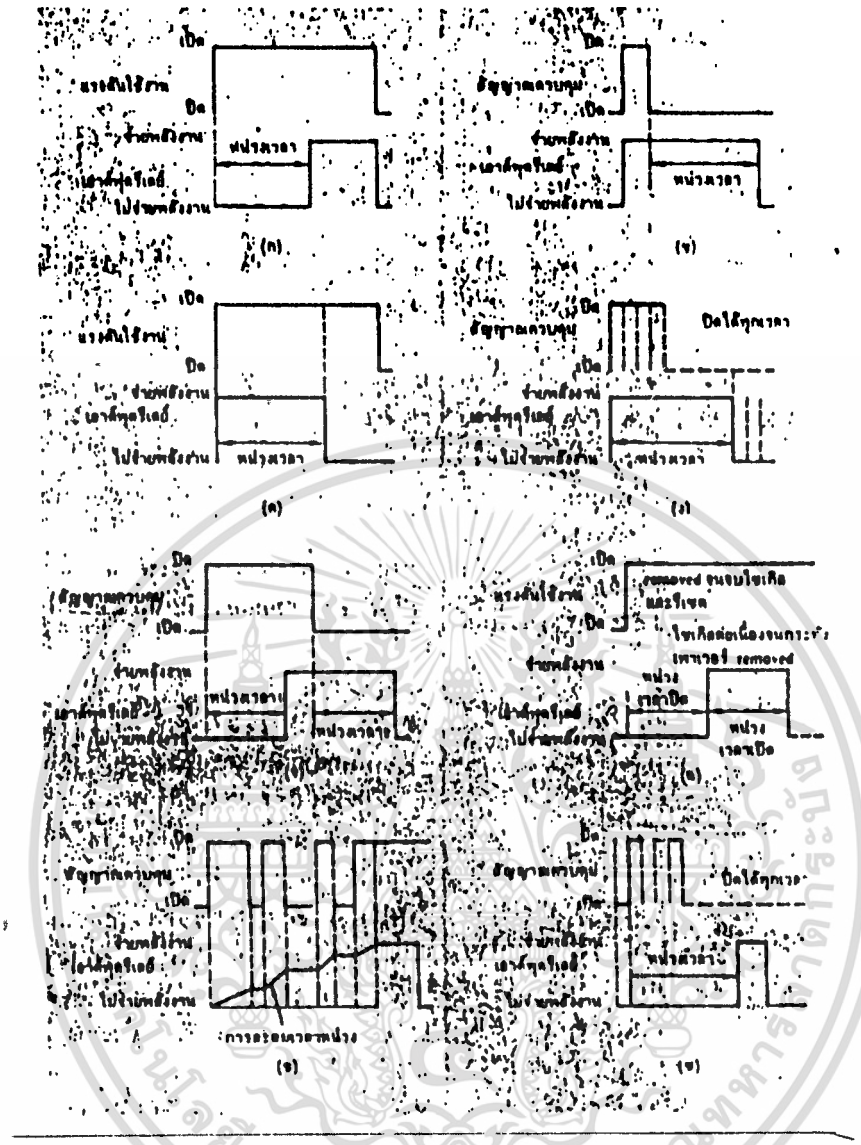
ในรูปที่ 2.10 (ก) เป็นรีเลย์ชนิดหน่วยเวลาเปิด (ON-DELAY RELAY) เป็นตัวหน่วงเวลาที่จะให้แรงดันใช้งานผ่านตัวรีเลย์ไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง รีเลย์ชนิดหน่วงเวลาปิด (OFF-DELAY RELAY) แสดงดังรูปที่ 2.10 (ข)ซึ่งต้องการกำลังงานที่ต่อเนื่องเช่นเดียวกับสัญญาณควบคุม จะเกิดการทำงานทันทีหลังจากขาดควบคุมเป็นลอจิก "1" และเริ่มต้นหน่วงเวลาปิดหลังจากสัญญาณที่ขาดควบคุมเป็นลอจิก "0" รีเลย์ชนิดหน่วงเวลาภายในช่วงแสดงดังรูปที่ 2.10 (ค) รีเลย์จะทำงานทันทีทันใดเมื่อป้อนแรงดันใช้งานให้ และหยุดการทำงานก่อนที่จะถึงจุดปลายของแรงดันใช้งานนั้นรีเลย์ชนิดมีช่วงเวลาการค้าง (LATCHING-INTERVAL) ดังรูปที่ 2.10 (ง)สัญญาณควบคุมสามารถที่จะทำให้รีเลย์เปิดวงจรในเวลาใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรีเลย์ชนิดหน่วยเวลาเปิดและหน่วงเวลาปิด (ON-DELAY/OFF DELAY RELAY) ในรูปที่2.10 (จ) มีตัวหน่วงเวลา 2 ตัวที่มีอิสระต่อกันแต่ละตัวอ้างอิงกับขอบขาขึ้น และขาบขาลงของ สัญญาณควบคุมชนิดที่เป็น การซ้ำไซเกิล (REPEAT CYCLE) แสดงดังรูปที่ 2.10 (ฉ) ซึ่งมีตัวหน่วงเวลา 2 ตัว ตัวหน่วงเวลาตัวที่ 2 จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของตัวแรก รีเลย์ชนิดหน่วงเวลาเปิดตามรูปที่ 2.10 (ช) นั่นเราสามารถพิมที่ภายใต้พัลส์ของสัญญาณควบคุม โดยอาศัยการร่วมพื้นที่ (INTEGRATION) ซึ่งในกรณีพื้นที่ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมช่วงเวลาของสัญญาณควบคุมและเปรียบเทียบค่าที่ถูกสะสมไว้นี้กับค่าอ้างอิงเป็นตัวกำหนดว่าเมื่อไรที่จะให้รีเลย์มีเอาต์พุต จ่ายพลังงานออกไปช่วงเวลาของพัลส์ที่ออกที่เอาต์พุตจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลาการเปิดวงจรของรีเลย์สุดท้าย ในรูปที่ 2.10 (ซ) เป็นรีเลยชนิดหน่วงเวลาเปิดการค้าง (LATCHING ON-DELAY RELAY) สัญญาณพัลส์ที่ควบคุมรีเลย์สามารถทำให้รีเลย์เปิดวรจรที่เวลาใดก็ได้

ในอดีตที่ผ่านมาการหน่วงเวลานั้นเป็นแบบเชิงของกลไกลแต่ในปัจจุบันใช้อิเลคทรอนิคส์เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของรีเลย์ที่ใช้หน่วงเวลาแบบต่าง ๆ

(ก) หน่วงเวลาเปิด

(ข) หน่วงเวลาปิด

(ค) หน่วงเวลาภายใน

(ง) หน่วงเวลาการค้าง

(จ) หน่วงเวลาเปิดและปิด

(ฉ) ชั้นไซเกิล

(ช) หน่วงเวลาเปิดแบบสะสมได้

(ซ) หน่วงเวลาเปิดการค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

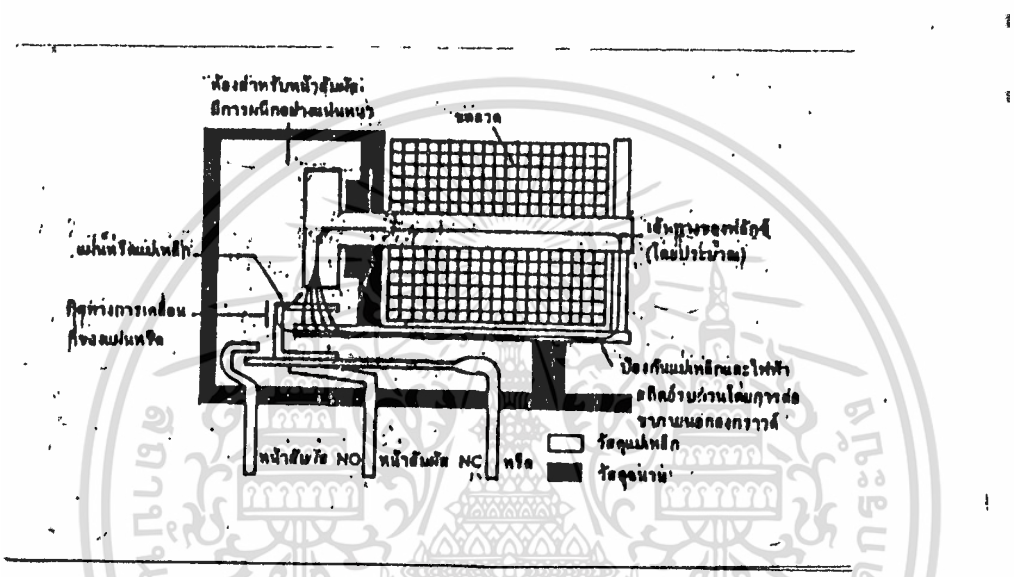
มาช่วยโดยใช้วงจรรวมรวมสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ สำหรับรีเลย์ชนิดที่ใช้ตัวหน่วงเวลาทางด้านกลไกที่สามารถหน่วงเวลาได้น้อยมากแค่เศษของวินาทีนั้น ใช้หลักการของมวลสารที่มีความเฉื่อย (INERTIAL MASS) แต่ถ้าต้องการให้ได้เวลานานหลายวินาทีจนถึงชั่วโมง นิยมใช้มอเตอร์เป็นตัวขับกลไกแทนมีอีกชนิดคือชนิดที่ใช้กลไกของความร้อน (THERMAL MECHANISMS) จะมีราคาถูกแต่ไม่มีความเที่ยงตรง

การตั้งเวลาของรีเลย์นับวันแต่จะมีความก้าวหน้าซึ่งปัจจุบันนี้ใช้ในไมโครโปรเซสเซอร์, ฐานเวลาที่ได้มาจากผลึกควอตซ์ ซึ่งจะให้ความเที่ยงตรงสูงรวมทั้งค่าที่เราจะตั้งเพื่อใช้งานด้วยธัมวีลส์วิทช์ (THUMB-WHEEL SWITCH) รีเลย์ที่ใช้เหล่านั้นสามารถค้าง (INTERVAL LATCHING) ของแต่ละเวลาที่อินพุตเป็นลอจิก "๑" ซึ่งจะมีโหมดในการใช้งานหลายโหมดและหลายหน้าที่

รีเลย์ชนิดสุดท้ายที่จะกล่าวถึงคือ หรีดรีเลย์ชนิดที่ภาวะเริ่มแรกต่ำ (LOW-OFFSET REED RELAYS) มีความผิดพลาดน้อยมากเมื่อทำการสวิทช์ซึ่งสัญญาณที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาดมิลลิโวลต์และไมโครโวลต์ ซึ่งเราต้องการความถูกต้องสูงที่สุดในระบบการเข้าครอบครองข้อมูล (DATA ACQUISITION SYSTEMS) ซึ่งจะต้องทำการสวิทช์เอาสัญญาณที่ต่ำๆ จากทรานสดิวเซอร์ (TRANSDUCER) เช่น สัญญาณจากเทอร์โมคับเปิลและจากสเตรนเกจ (STRAIN GAUGE) ในรูปที่ 2.11 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทเทอร์โมเซ็น (THERMOSEN) หน้าสัมผัสอยู่ด้านนอกของลวดแม่เหล็ก เพื่อตัดปัญหาของหน้าสัมผัสที่แต่เดิมจะต้องมีส่วนผสมของแท่งแม่เหล็กและเพื่อให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ตัวนี้ มีความเป็นตัวนำสูง จึงต้องใช้เงินทำหน้าที่สัมผัสและเคลือบด้วยทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาใหญ่ในการสวิทช์ซิ่งและการต่อของสัญญาณกระแสตรง ที่มีระดับสัญญาณต่ำคือแรงดันเทอร์โมคับเปิบ ที่เราไม่ต้องการซึ้ง เกิดจากลักษณะที่เป็นเทอร์โมคับเปิลคือ หน้าสัมผัส 2 อันที่ทำจากโลหะไม่เหมือนกันทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าซึ่งแปรเปลี่ยนค่าไปตามอุณภูมิโดยทั่วไปแล้วตัวนำด้านในด้ายเงิน และขาต่อทำด้วย




รูปที่ 2.11 หรีดรีเลย์แบบมีแรงดันความร้อนต่ำของเทอร์โมเซ็นตัวนำทำจากเงินทั้ง

หมดรวมทั้งขาต่อภายนอกด้วย หน้าสัมผัสทำจากเงินชุบทองคำเงินผสม (SILVER ALLOR)สำหรับขอต่อด้านนอกนั้นทำด้วยทองแดงและติดตั้งทำให้อยู่ใกล้กันมากที่สุดเพื่อให้มีอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากเทอร์โมคับเปิบมีค่าเท่ากันสองดูภายในบ้านจะเห็นว่า การแบ่งแยกทางฟิสิกส์ของหน้าสัมผัสกับส่วนของขดลวดนั้นทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเส้นทางการนำกระแสมีค่าน้อยมาก (คือกลุ่มของหน้าสัมผัส) จากข้อกำหนดของโรงงานนั้นจะมีออฟเซตเทอร์มอล (OFFSETTHERMAL) คือแรงดันที่เกิดจากความร้อนน้อยกว่า 1 ไมโครโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทราบถึงรายละเอียดของตัวกลางที่สามารถเอาอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ไปควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังได้นั้นคือ รีเลย์ อย่างถึงแก่นแล้วต่อมาดูในของวงจรที่ใช้เป็นวงจรควบคุมในส่วนของการควบคุมแบบ FLOATLESS RELAYบ้างโดยจะขอกล่าวถึง อุปกรณ์ทุกตัวที่มีใช้อยู่ในวงจรเพื่อแสดงภาพพจน์และสามารถเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของแต่ละหน้าที่ของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ ที่มีใช้อยู่ในวงจรโดยจะทำให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นเมื่อไปดูการคำนวณและการสร้าง ในส่วนของวงจรในบทที่ 3 ต่อไป และจะขอเริ่มต้นก่อนที่ทรานซิสเตอร์,ตัวต้านทาน,คาปาซิเตอร์,ไดโอดและ ARRESTER ตามลำดับ ดังในหัวข้อ 2.4 (วงจร)

2.4 <u>วงจร</u> วงจรในที่นี้หมายถึงวงจรอิเลคตรอ์นิคส์ที่ใช้ในชุดควบคุมระดับน้ำแบบ FLOATLESS RELAY และวงจรก็ประกอบด้วยอุปกรณ์ อิเลคทรอนิคส์มากมายท่นำมาใช้ และอุปกรณ์หลักที่เป็น เสมือนหัวใจของวงจรการทำงาน คือ ทรานซิสเตอร์ ทรานซิอสเตอร์ที่ใช้ในวงจรนี้เป็นชนิด ไบโพลาร์ (BIPOLAK)

2.4.1 <u>BIPOLAR TRANSISTORS</u>

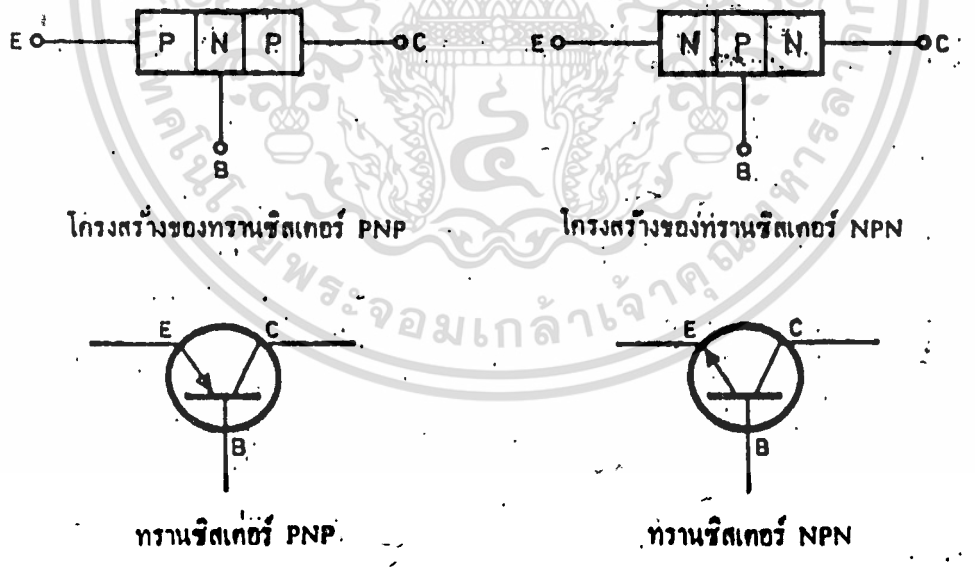
ทรานซิสเตอร์ จัดเป็นอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งลักษณะการใช้งานของทรานซิสเตอร์นั้น อาจจะใช้เป็น วงจรสวิชท์ซึ่งวงจรขยายแบบต่าง ๆ หรือถ้าอาจแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งานในวงจร ภาคต่าง ๆ เช่น SMALL SIQNAL LARQE SIGNEL, NIGH FRENGUENCY เป็นต้น

ปกติแล้ว ทรานซิสเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามโครงสร้างคือ BIPOLAK และ UNIPOLAK แต่เรื่องที่เรียนต่อไปนี้ คือ ทรานซิสเตอร์แลล BIPOLAR BIPOLAR TRANSISTOR นั้นส่วนใหญ่จะทำจากสารซึ่งตัวนำชนิด SILICON หรือ GERMANIUM ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะทำงานโดยฟรีอิเลทตรอน ซึ่งมีโพลารีตี้ลบร่วมกับโฮนซึ่งมีโพลารีตี้บวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2,4.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ถูกสร้างขึ้นโดยการนำเอาสารแบบ N-TYPE และ P-TYPE มาเชื่อมต่อกัน เช่น ถ้าเอาสาร N อยู่ตรงกลางซึ่งมีลักษณะบางประกบหัวท้ายสาร N ด้วยสาร P ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เรียกว่า แบบ P-N-P หรือในทางกันข้ามถ้าเราประกอบสาร N ทั้งสองด้านโดยมีสาร P อยู่ตรงกลางก็ เรียกว่า แบบ N-P-N สารที่อยู่กลาง เรียน เบส (BASE) ขั้วที่ประกบอยู่ เรียกว่า อิมิเตอร์ (EMITTER) และคอลเลคเตอร์ (COLLECTOR) ซึ่งสารที่ประกบอยู่นั้นร มีความเข้มข้นของการ COPE สารไม่เท่ากัน เช่น ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์แบบ P-N-P ก็มีการ DOPE ให้มีความเข้มข้นของ ACCAPTOR มากกว่า เพื่อให้เกิดความแตกต่างของ อิมิเตอร์ กับ คอลเลคเตอร์



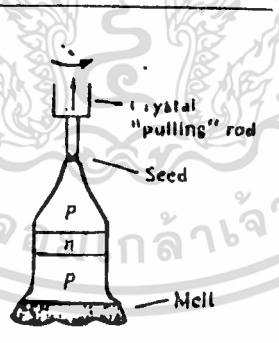

2.12 โครงสร้างของทราซิสเตอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผลิตทรานซิสเตอร์ หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีวิธีผลิตจพื้นฐานอยู่ 4 วิธี คือ.-

2.4.2.1 GROWN TYPE

หลังจากที่เตรียม INTRINSIC SEMI CONDUCTOR ซึ่งมีวาเลนซ์อิเลคตรอน เท่ากับ 4 แล้ว เติมสาร IMPURITY เป็นวาเลนซ์อิเลคตรอน 3 และ 5 เราจะได้ EXTRINSIC SEMI CONDUCTOR เป็นสาร P และสาร N ตามลำดับวิธีการ คือ ให้ความร้อนกับสารซิลิกอน หรือ เยอรมันเนียม จนสารนั้นละลาย และดึงเอาผลึกเดี่ยวขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่หลอมละลาย แล้วจึงเติมสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ลงไป คือ เติมอะตอมของสาร P หรือสาร N ตามที่ต้องการ

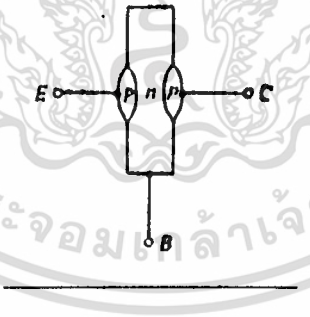



รูป 2.13 โครงสร้าง GROWN TYPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ALLOY TYPE

หรือเรียกว่าโครงสร้างแบบหลอมละลาย ดูรูป ส่วนกลางซึ่งเป็นแผ่นบางๆ นำหน้าที่เป็นเบสนั้นเป็นสารชนิด N แล้วเอา เม็ดของธาตุอินเดียม ติดเข้ากับสาร N ทั้งสองด้านนำเอาโครงสร้างนั้นไปเผาไฟให้มีอุณหภูมิสูงในช่วงสั้นๆ ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมละลายของอินเดียม แต่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของสารเยอรมันเนียม เม็ดอินเดียมก็จะหลอมละลายเข้าไปในสารเยอรมันเนียม ในขณะที่เย็นตัวลง สารเยอรมันเนียมจะเรียงตัว เป็นผลึกใหม่ โดยมีอะตอมของอินเดียมปนเข้าไป เพื่อเปลี่ยนสาร N เป็นสาร P ซึ่งในการทำนั้นจะทำให้ทางคอลเลคเตอร์มีขนาดใหญ่กว่าอิมิเตอร์ เพราะกระแสไฟฟ้าทางคอลเลคเตอร์มากกว่า

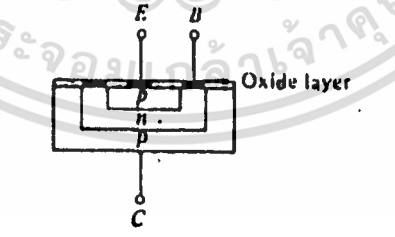



รูป 2.14 โครงสร้าง ALLOY TYPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 DIFFUSION TYPE

วิธีการนี้นอกจากใช้ทำทรานซิสเตอร์ แล้วยังนิยมใช้ทำ IC ด้วยทำโดยการนำเอสารกึ่งตัวนำชนิด N หรือ P ไว้ที่บรรยากาศของแก๊ส เพื่อใช้ผสมกับ IMPURITYให้เกิดเป็นสาร P และ N จากรูปเป็นการนำเอาสาร P ไว้ที่บรรยากาศของ แก๊สแล้วผสมกับ IMPURITYเป็นสาร N เพื่อทำหน้าที่เป็นอิมิเตอร์ และคอลเลคเตอร์ พื้นที่ของรอยต่อ BASE-COLLECTOR นั้นอยู่กับช่องของการแพร่สาร (DIFFUSTION MASK) ชั้นของอิเตอร์นั้น จะแพร่สาร IMPURITYA ลงบนชั้นของ BASE อีกทีหนึ่ง แล้วใช้ ซิลิกอนไดออกไซด์ก็ปิดทับ เพื่อป้องกันปัญหาผิวหน้าของสารทำให้กระแสรั่วไหลน้อยลง และลดสัญญานรบกวน




รูป 2.15 โครงสร้างแบบ DIFFUSION PLANAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

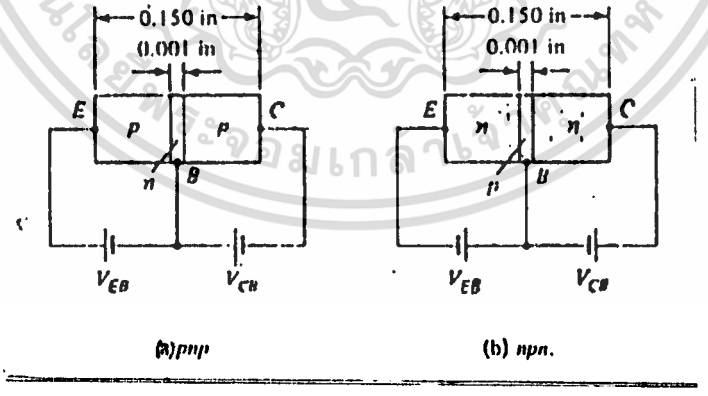
2.4.2.4 EPITAXIAL TYPE

วิธีการนี้โดยการทำให้สาร เยอรมันเนียม หรือซิลิกอนให้มีความบริสุทธิ์สูงโดยการทำเป็นชั้นบาง ๆ และเป็นผลึกเดียวของสารซึ่งอยู่บนชั้นของสาร แบบเดียวกันทำหน้าที่เป็นคอลเลคเตอร์ ส่วนเบสกับอิมิเตอร์ก็สร้างขึ้นแบบชั้นนี้ โดยการแพร่สารเข้าไป วิธีการต่อไป ก็โดยการนำเอากรรมวิธีข้างต้นรวมเข้าด้วยกัน ก็จะได้กรรมวิธีผลิตเพิ่มขึ้นอีก เช่น DIFFUSED ALLOY,GROW DIFFUSED, ฯลฯ

2.4.3 การให้ BIAS แก่ทรานซิสเตอร์

ทาง INPUT นั้นต้องต่อในทิศทางนำกระแส (FORWARD)

ทาง OUTPUT ต่อมาในทิศทางกั้นกระแส (REVERSE)



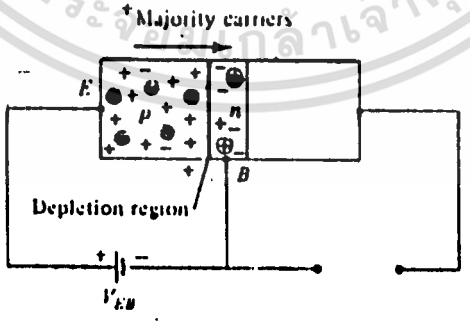

รูป 2.16 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ PNP และ NPN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์นั้นกระแสทาง INPUT จะควบคุมกระแสทาง OUTPUT ดังนั้น เมื่อมีสัญญานทาง INPUT ก็จะทำให้เกิดสัญญานปรากฏทาง OUTPUT ด้วย แต่สัญญานทาง OUTPUT อาจมีขนาดโตกว่าทาง INPUT ถ้าเราต้องการให้ทรานซิสเตอร์นั้นขยายสัญญาน สาเหตุที่เราให้ FORWARD แก่ทาง OUTPUT เพราะกระแสจะเพิ่ม หรือลดตามสัญญานที่เข้ามา ส่วนทางด้าน OUTPUT จะถูกควบคุมด้วยกระแส INPUT เราจึงต้องต่อแบบ REVERSE BIAS เพราะกระแสที่เกิดจากกระแสรั่วไหล จึงไม่มีผล ต่อกระแส OUT PUT

## 2.4.4 การไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์

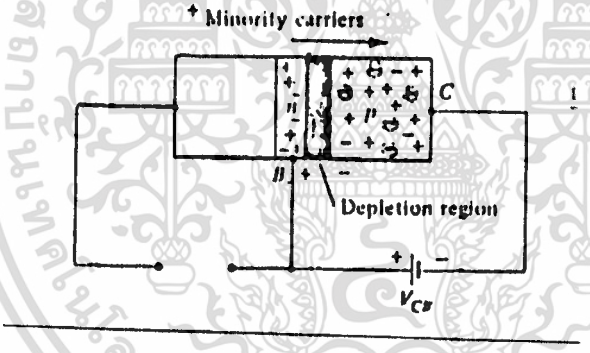
การไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์จะอธิบายในลักษณะ HOLD FLOW โดย ทรานซิสเตอร์เป็นแบบ PNP




รูป 2.17 การไหลของกระแสเมื่อต่อ FORWARD ทาง INPUTอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตตารี่ VEB จะเป็นตัว FORWARD ให้แก่รอยต่อ PN ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียว FORWARD BIAS ให้ตัวไดรอด ก็จะเกิดการรวมตัว (RECOMBINATIONCARRIERS) ในสาร $P^+$ กับสาร $N^-$ นั้น คือ เกิดการไหลของพาหะข้างมากจากEMITTER ไปยัง BASE มีลักษณะเล็กและบางกว่าสารที่ DORP จึงไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเหลือพาหะที่เกิดจากการรวมตัวในสาร N อีก




รูป 2.18 การไหลของกระแสเมื่อต่อแบบREVERSE ทางOUTPUTเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น วงจรนี้จะมีอัตราการขยายกระแส เรียกว่า ALPHA ( ) คือ

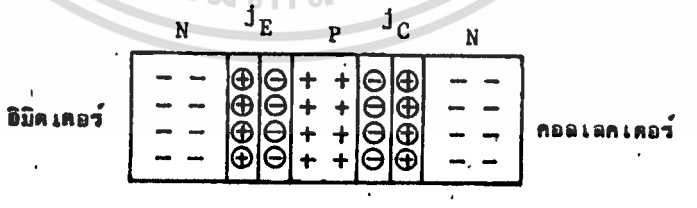
$$\alpha = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|_{V_{CB} = \text{CONSTANT}}$$

ซึ่งค่านี้จะอยู่ระหว่าง 0.9 - 0.998 หรืออัราการขยายกระแสใกล้เคียง 1 หรือเราจะหาค่อริดยประมาณ

$$\alpha \cong \frac{I_C}{I_E}$$

2.4.6 วงจร COMMON-BASE

ซึ่งวงจรที่ใช้เบสเป็นจุดร่วมของภาค INPUT และ OUTPUT สัญญาณ INPUT เข้ามาทาง อิมิเตอร์ สัญญาณา OUTPUT ให้จ เก COLLECTOR




รูป 2.3.2 ทิศทางของแสงของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PN

2.5 อัตราการขยายกระแส

อัตราการขยายกระแสวงจร COMMON BASE สัญญลักษณ์ คือ : แอลฟา คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส OUTPUT และกระแส INPUT คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

ในทางปฏิบัติเราอาจใช้ค่าโดยประมาณ คือ

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$I_C$ = กระแสคอลเลคเตอร์

$I_E$ = กระแสอิมิเตอร์

โดยทั่วไปอัตราการขยายกระแส = 0.9 - 0.998 หรือน้อยกว่า 1 เสมอ

2.6 <u>อัตราส่วนความต้านทาน</u>

อัตราส่วนความต้านทาน OUTPUT ต่อ INPUT มีค่าโดยประมาณ = 100 ซึ่งความต้องต้านทาง INPUT มีค่าน้อยเพราะต่อในลักษณะ FORWORD มีค่อประมาณ 100Ω ส่วนทางด้าน OUTPUT ต่อในลักษณะ REVERSE ค่าความต้านทานประมาณ 10,000 Ω

$$A_r = R_o = \frac{10,000}{R_i} = 100$$

$$R_i = 100$$

อัตราการขยายแรงดัน ($A_v$)

คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดัน OUTPUT ต่อแรงดัน INPUT

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o R_o}{I_i R_i} = Ai \quad Ar$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 <u>อัตราการขยายกำลัง</u>(Ap)

คือ อัตราส่วนของกำลังที่ OUTPUT ต่อ INPUT

$$A_p = P_o = V_o I_o = A_v A_i$$
$$V_i I_i$$

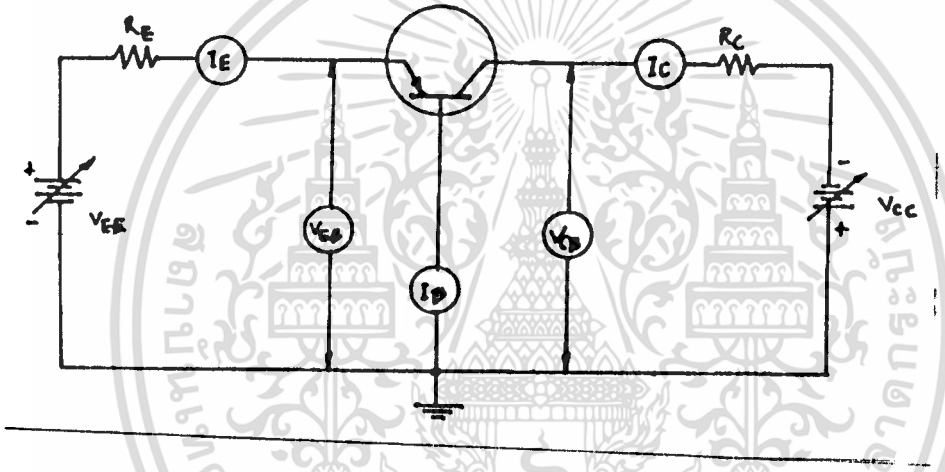
2.8 <u>วงจรขยายทรานซิสเตอร์</u>

ในวงจรขยายทรานซิสเตอร์ก็ต่อวงจรเข้าที่ INPUT ของทรานซิสเตอร์ OUTPUT นั้นได้จากความต้านทานโหลด เมื่อสัญญาณ INPUT ยังไม่มีหรือเท่ากับศูนย์กระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์ เป็นกระแสไบแอส เท่านั้น และเมื่อสัญญาณ INPUT เป็นบวก อิมิเตอร์และเบสจะถูก FORWORD มากขึ้นกระแสที่ไหลไปยังคอลเลคเตอร์ก็สูงขึ้น จะทำให้กระแสผ่านตัวต้านทานโหลดมากด้วย แรงดันที่โหลดก็มากด้วยแต่เมื่ออิมิเตอร์และเบสได้รับสัญญาณแลบที่ INPUT กระแส FORWORD ก็จะน้อยลงด้วยกระแสผ่านไปยังคอลเลคเตอร์ และโหลดก็จะลดด้านแรงดันที่ค่าต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 กราฟคุณสมบัติของวงจร COMMON-BASE

ในการหากราฟคุณสงบัติของทรานซิสเตอร์โดยการต่อวงจร ดังรูป

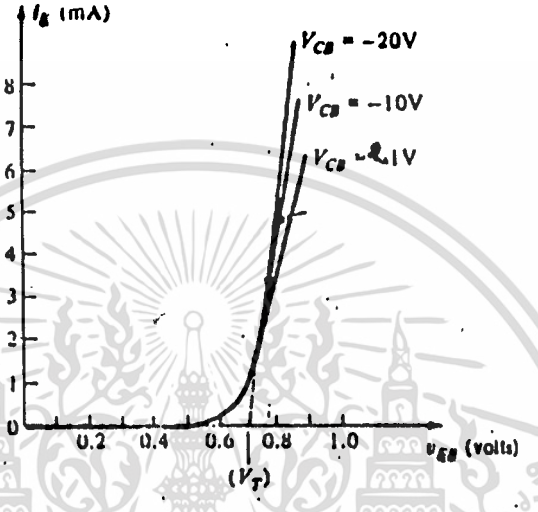



รูป 2.20 กราฟคุณสมบัติของวงจร COMMON-BASE

### กราฟคุณสมบัติทาง INPUT

เพื่อหาความหสัมพันธ์ระหว่าง $V_{EB}$ และ $I_E$ โดยการปรับแรงดัน $V_{CB}$ ให้คงที่ที่ค่าต่าง ๆ แล้วจึงปรับ $V_{EB}$ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{EB}$ และ $I_E$ ซึ่งแรงดัน $V_{CB}$ จะไม่มีผลต่อความสัมพันธ์และ $V_{EB}$ และ $I_E$ เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

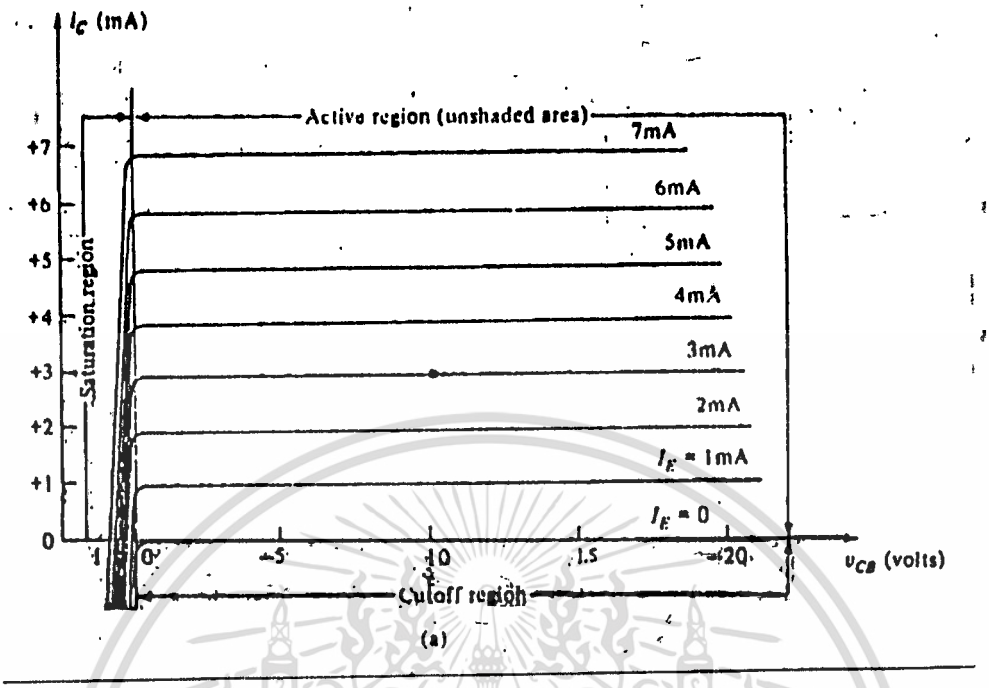



รูป 2.21 คุณสมบัติทาง INPUT

<u>กราฟคุณสัมบัติทาง OUTPUT</u>

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง และ โดยการปรับ กระแสอิมิเตอร์ให้คงที่ที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่ากระแสคอบเบคเตอร์จะไม่ขึ้นกับแรงดัน แต่ขึ้นกับกระแสอิมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.22 กราฟทาง OUTPUT

<u>กราฟคุณสัมบัติทาง OUTPUT</u> จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. <u>CUT OFF REGION</u> เป็นบริเวณที่ กระ และเท่ากับศูนย์

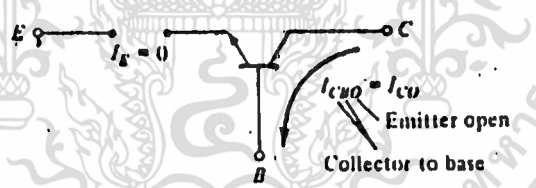
2. <u>SATURATION REGION</u> เป็นช่วงที่แรงดัน มีค่าน้อย ช่วงนี้กระแส จะขึ้นกับ หรือช่วงอิ่มตัวของ ทรานซิสเตอร์ จะใช้ในวงจรขยายไม่ได้เพราะ OUTPUT จะเพี้ยน (DISTORTION)

3. <u>ACTIVE REGION</u> เป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ดีที่สุดกราฟบริเวณนี้จะเป็นเส้นตรง สัญญาณ CUTPUT จะมีการเพี้ยนน้อยที่สุด ดังนั้น ในการออกแบบต้องให้จุดทำงานอยู่ในบริเวณนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กระแสย้อนกลับอิ่มตัว</u> (REVERSE SATURATION CURRENT).

ในวงจร COMMON BASE ถ้าอิมิเตอร์เป็นวงจรเปิด ก็จะไม่มีกระแสอิมิเตอร์ไหล แต่ยังมีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลไปยังเบส เรียกว่า กระแสย้อนกลับอิ่มตัว ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะรองคล้ายกับ REVERSE BIAS ในตัว DIODE ใช้แทนว่า $I_{CBU}$ หมายถึงกระแสคอลเลคเตอร์ไปเบส โดยอิมิเตอร์เปิดอยู่

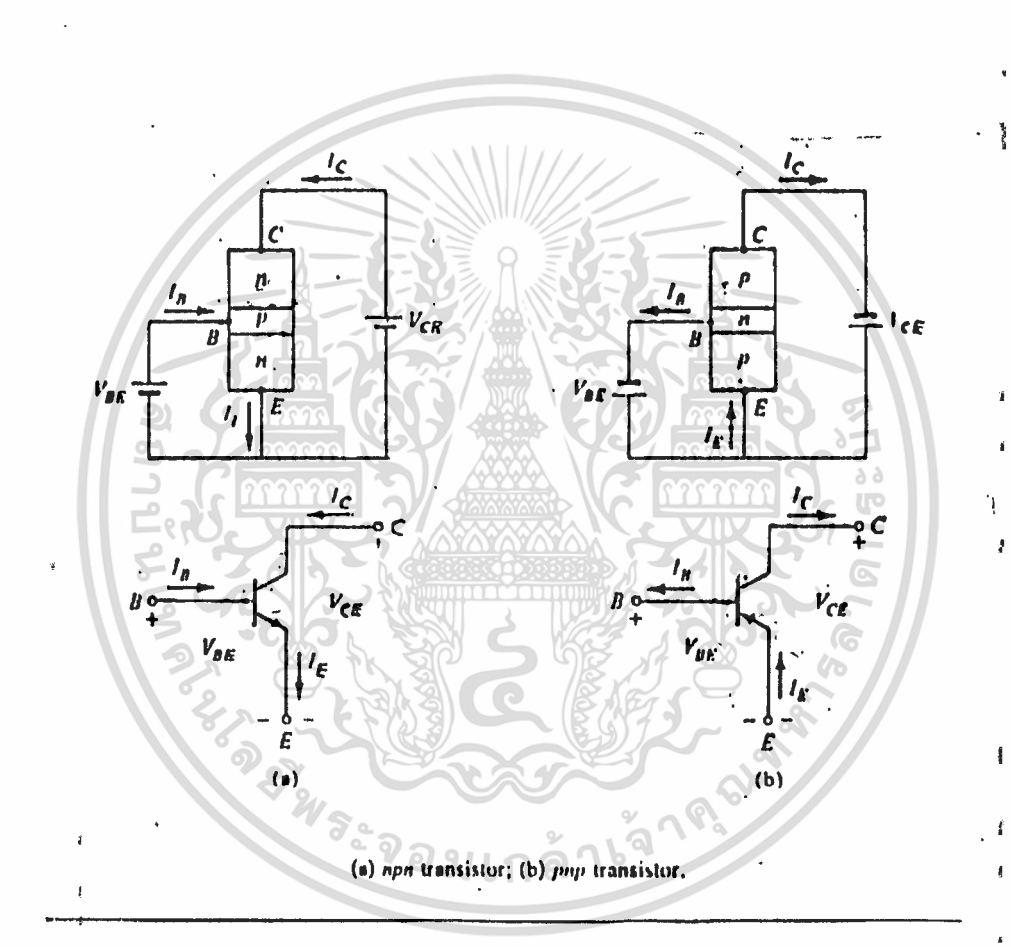



รูป 2.23 กระแสย้อนกลับอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 วงจร COMMON - EMITTER

โดยการป้อน INPUT เข้าที่เบส และเอา OUTPUT ออกที่ COLLECTOR แล้วใช้อิมิเตอร์เป็นจุดร่วม ดังรูป




(a) *npn* transistor; (b) *pnp* transistor.

รูป 2.37 แสดงทิศทางการไหลของกระแสวงจร COMMON EMITTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรนี้เป็นวงจรที่นิยมใช้มากที่สุดซึ่งวงจร COMMON EMITTER จะให้ความต้านทานทาง INPUT สูงประมาณ 700-2000 Ω ความต้านทานทาง OUTPUT ($R_O$) ประมาณ 500,000 เนื่องจากกระแส INPUT เข้าที่เบส กระแสเบสจึงเป็นตัวควบคุม การไหลของกระแสเลคเตอร์ อัตราการขยายกระแสคือ เบต้า ($\beta$)หรือ $A_i$ คือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส OUTPUT ต่อ INPUT

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta$$

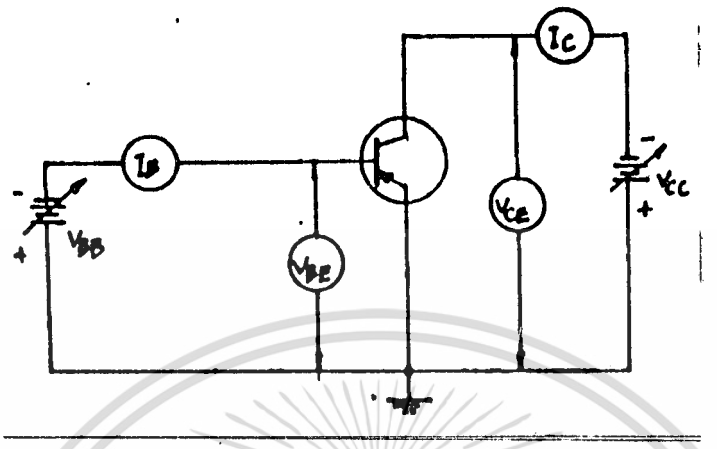
ในทางปฏิบัติ อาจใช้ค่า

$$\beta = \frac{I_C}{IB}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการขยายกระแสค่อนข้างสูง เพราะ การเปลี่ยนแปลงกระแสเบส หรือกระแส INPUT มีเพียงเล็กน้อยแต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส OUTPUT มากและวงจรนี้ยังเป็นวงจรที่ขยายแรงดันด้วย เพราะ อัตราส่วนของความต้านทาน OUTPUT ต่อ INPUT RO/RI ก็มีค่ามากและอัตราการขยายกำลังก็มีมากกว่า วงจร COMMON BASE ด้วย

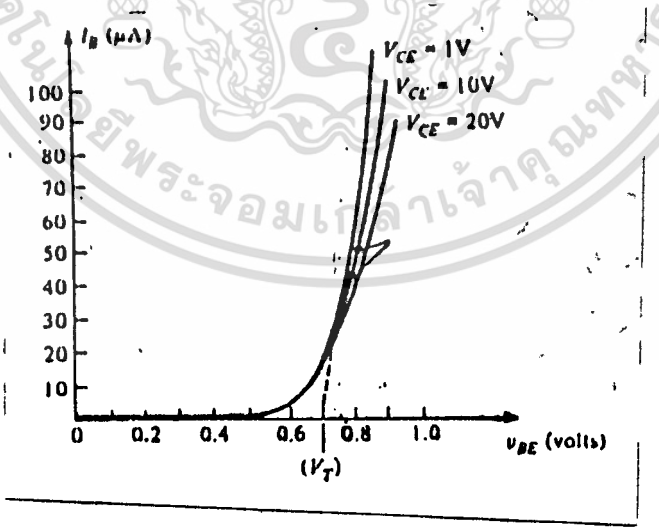
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กราฟคุณสมบัติของวงจร COMMON EMITTER



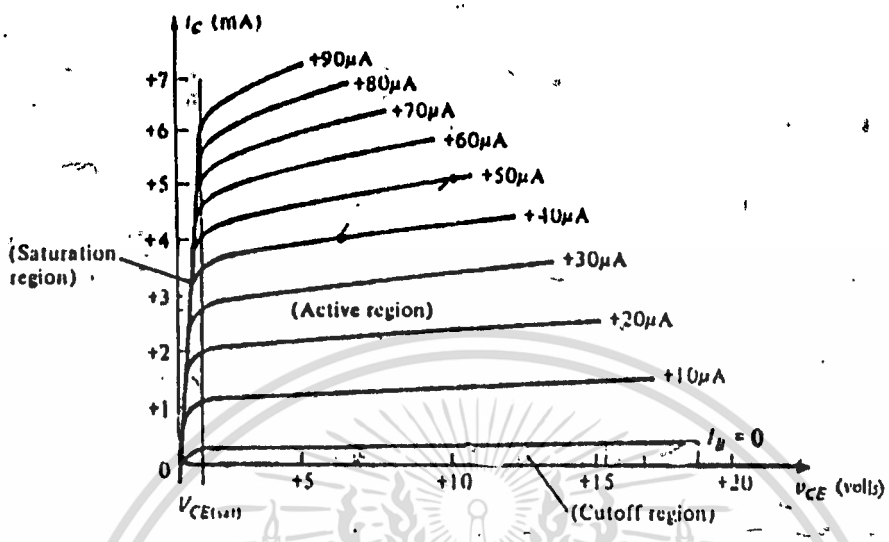

รูป 2.25 กราฟคุณสมบัติของวงจร COMMON EMITTER

จากรูปเป็นวงจรการหากราฟคุณสมบัติทางด้าน INPUT และ OUTPUT ของวงจร COMMON EMITTER




รูป 2.26 กราฟคุณสมบัติทาง INPUT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.27 กราฟคุณสมบัติทาง OUTPUT

พิจารณากราฟคุณสมบัติทาง OUTPUT จะเห็นว่าขนาดของกระแสเบสเป็นไมโครแอมป์ เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์เป็นมิลลิแอมป์ กระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่ามากกว่ากระแสเบสมาก นั่นคือ อัตราการขยายกระแสย่อมมากด้วย

บริเวณของกราฟแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1 CUT OFF REGION เป็นบริเวณใต้เส้นกราฟ IB - 0 บริเวณนี้กระแสคอลเลคเตอร์เกือบเท่าศูนย์ โดยมีค่าเท่ากับกระแสย้อนกลับอิ่มตัว

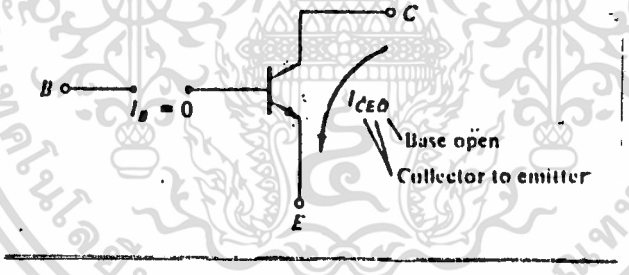
2 SATURATION REGION เป็นบริเวณที่แรงดัน VCE มีค่าน้อย กระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มตาม VCE จะถึงจุดที่กระแสคอลเลคเตอร์อิ่มตัวแรงดันที่ทำให้ กระแสคอลเลคเตอร์อิ่มตัว เรียกว่า แรงดันอิ่มตัว ($VCE_{sat}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ACTIVE REGION เป็นบริเวณที่กระแสคอลเลคเตอร์แบ่งตามแรงดัน VCE อย่างลิเนียร์ (LINEAR) หรือเกือบลิเนียร์ เป็นบริเวณที่ใช้หาอัตราการขยายกระแส แรงดัน และขยายกำลัง หรือบริเวณที่ใช้งานในวงจร

กระแสย้อนกลับที่อิ่มตัว

ในวงจร COMMON EMITTER ถ้าเปิดวงจรที่เบสก็จะไม่มีกระแสเบสไหลแต่จะมีกระแสไหลจาก คอลเลคเตอร์ ไปยังอิมิเตอร์ เรียกว่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว เป็นกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะรอง (MINORITY CARRIERS) เขียนแทนด้วย $I_{CEO}$




รูป 2.28 กระแสย้อนกลับที่อิ่มตัว

ความสัมพันธ์ของ $\alpha$ และ $\beta$

จาก $I_E = I_B + I_C$ _____ (1)

จาก $I_C = \alpha I_E$ และ $I_C = \beta I_B$ _____ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนที่ในสมการที่ (1) ด้วย (2)

$$\frac{I_c}{\alpha} = \frac{I_c}{\beta} + I_c$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} + 1 \qquad \text{(3)}$$

$$1 = \frac{1+\beta}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \qquad \text{(4)}$$

จากสมการที่ (3)

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\alpha} - 1$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \qquad \text{(5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{CEO}$ และ $I_{CBO}$ (COMMON BASE)

จาก $I_c = \alpha I_E + I_{CBO}$ (COMMON BASE)

และ $I_E = I_C + I_B$

$$I_C = \alpha(I_C + I_E) + I_{CBO}$$

$$I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO}$$

$$I_C(1-\alpha) = \alpha I_B + I_{CBO}$$

$$\boxed{I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}} \quad \text{——— (6)}$$

และค่า $I_B = 0$

$$I_C = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \Bigg|_{I_B = 0}$$

และจาก

$$I_C = -\beta I_B + I_{CEO} \text{ (COMMON EMITTER)} \text{ ——— (7)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (6) $I_C = \beta 1_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$ _____(8)

(7) = (8)

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

แทนค่า $\alpha$ ด้วย $\frac{\beta}{\beta + 1}$

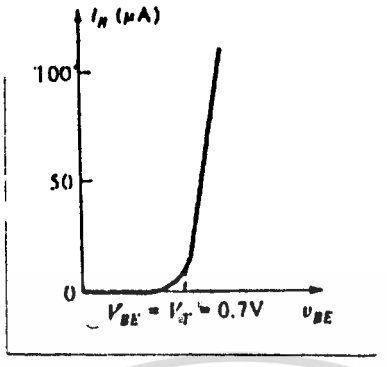
$$I_{CEO} = I_{CBO} = I_{CBO}$$
$$1 - \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \frac{\beta+1 - \beta}{\beta+1}$$

$$\boxed{I_{CEO} = (\beta+1)\, I_{CBO}} \quad \text{_____(9)}$$

จะเห็นได้ว่า $1_{CEO}$ มีค่ามากกว่า $I_{CBO}$ มาก เนื่องจาก $I_{CBO}$ เป็นการเคลื่อนที่ของ MINORITY CORRERS และจำนวนของ MONORITY CARRIERS ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

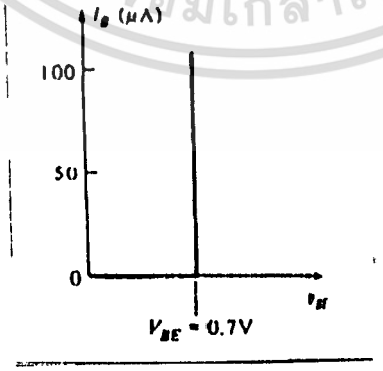
เมื่อพิจารณากราฟคุณสมบัติทาง INPUT ของวงจร COMMON EMITTER และ COMMON BASE จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.29 กราฟรูปคุณสมบัติทาง INPUT

จะเห็นว่ากราฟคุณสมบัติทาง INPUT จะมีลักษณะคล้ายกับกราฟคุณสมบัติของไดโอดซึ่งความต้านทานของไดโอดสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานอื่นในวงจร ก็อาจไม่คิดความต้านทานของไดโอดได้ ดังนั้นอาจประมาณกราฟคุณสมบัติด้าน INPUT ของทรานซิสเตอร์ แรงดันที่เบส กับอิมิเตอร์ก็ขึ้นอยู่กับชนิด ของสารกึ่งตัวนำถ้าเป็นซิลิกอน $V_{BE}$ = 0.7 V. ถ้าเป็นเยอรมันเนียม $V_{BE}$ = 0.3 v. ซึ่งการประมาณค่านี้จะใช้ได้กับวงจรทั้ง 3 ลักษณะ

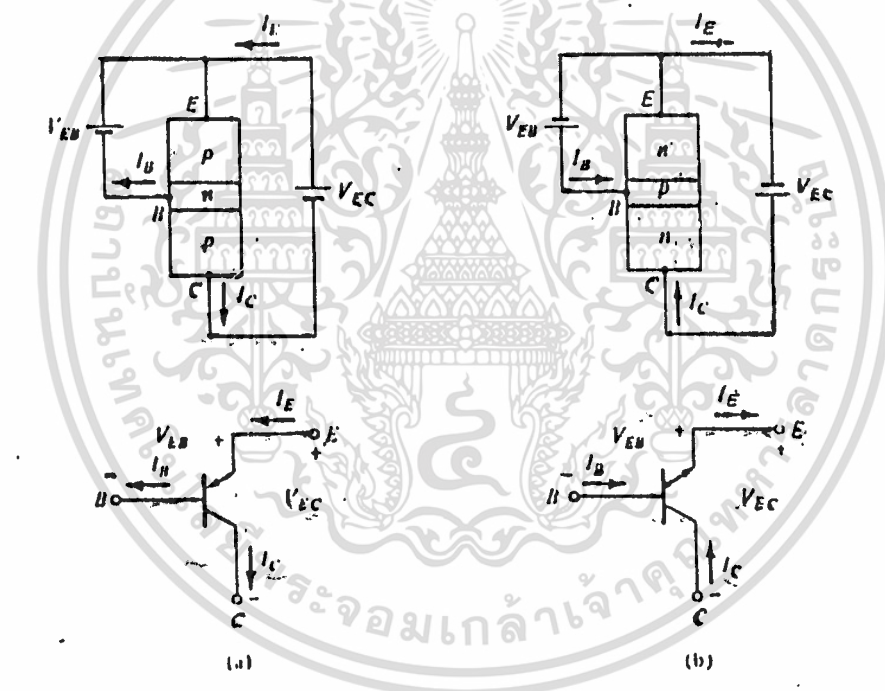



รูป 2.30 กราฟคุณสมบัติทาง INPUT โดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 วงจร COMMON COLLECTOR

วงจรนี้ให้ความต้านทานทาง INPUT สูงประมาณ 100,000 และความต้านทานทาง OUTPUT ต่ำ ประมาณ 200 Ω ดังนั้น จึงใช้เป็นวงจรปรับความต้านทาน (IMPEDANCE MATCHING)




รูป 2.31 ทิศทางกระแสของ PNP และ NPN COMMON COLLECTOR

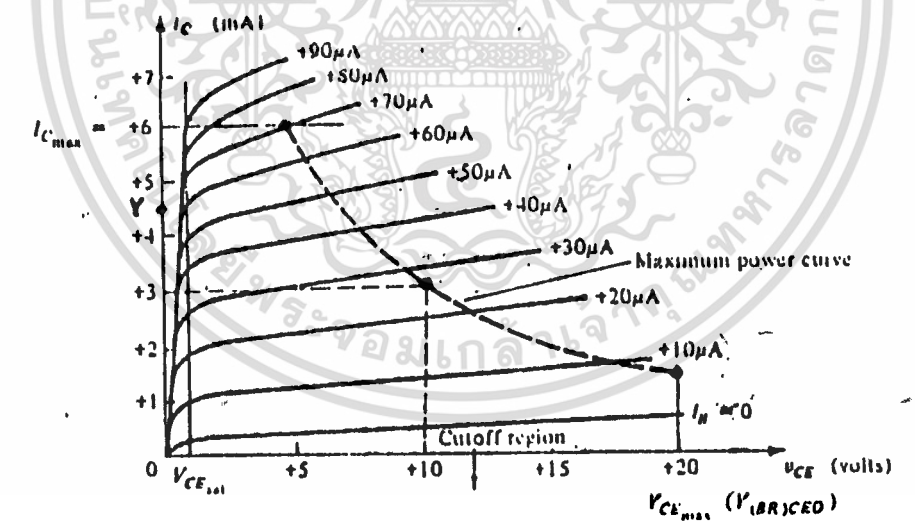
วงจร COMMON COLLECTOR จะมีลักษณะคล้ายกับวงจร COMMON EMITTER จุดป้อนสัญญาณ INPUT ของวงจร COMMON COLLECTOR เข้ามาที่เบสและ OUTPUT ออกที่ EMITTER และจะใช้ คอลเลคเตอร์ เกิดจุดร่วมของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ช่วงทำงานที่ปลอดภัย</u> จุดทำงานที่ปลอดภัย ของทรานซิสเตอร์ ควรจะอยู่ในพื้นที่หนึ่งในระนาบ ($I_C$ - $V_{CE}$) ซึ่งใช้เขียนลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ (ดูรูป 2.45 ) พื้นที่นี้เรียกว่าช่วงทำงานที่ปลอดภัย และถูกกำหนดโดยค่าจำกัดของกำลังสูญเสีย (power disipatation) กระแสสูงสุดแรงดันสูงสุด และโดยขอบเขตการเป็นเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์กำลังจะสูญเสียในท์รานซิสเตอร์ คือ

$$P_C = V_{CE} \times I_C$$

ซึ่งกราฟของเส้นกำลังสูญเสีย จะเป็นกราฟเส้นไฮเพอร์โบล่า ไฮเพอร์โบล่าที่ตรงกับกำลังสูญเสียสูงสุด จะเป็นเขตแดนด้านหนึ่งของส่วนทำงานที่ปลอดภัย .




รูป 2.32 ช่วงการทำงานที่ปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าแรงดันที่สูงเกินกว่าค่าจากัดแรงดันพัง $BV_{CEO}$ (BREAKDOWN VOLTAGE) เป็นค่าที่ทำให้ทรานซิสเตอร์พัง เนื่อง จากมีกระแสในตัวทรานซิสเตอร์เพิ่งสูงขึ้นมากจนจะทำความเสียหายให้แก่ทรานซิสเตอร์ได้ เส้นตรง $V_{CE} = VB_{CEO}$ ถ้าเป็นเขตแดนอีกด้านหนึ่งของช่วงการทำงานที่ปลอดภัย เขตแดนด้านอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับการเป็นเชิงเส้นของตัวทรานซิสเตอร์ จากรูป 2.45 สังเกตได้ว่าค่าของอัตราขยาย ($I_C/I_B$) จะลดลงมาก เมื่อค่าการแส $I_C$ สูงขึ้น (ช่วงห่างของเส้นกราฟ $I_B$ ในกราฟลักษณะสมบัติลดลง) และเมื่อ $V_{CB}$ มีค่าต่ำ การไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัว นอกจากนี้ในเส้น เมื่อ $I_B = 0$ ทรานซิสเตอร์ก็จะอยู่ในสภาวะคัทออฟอีกเช่นกัน คือ กระแส $I_C$ จะมีค่าน้อยจนเกือบมีค่าเป็นศูนย์

<u>สภาพเส้นโหลด</u> (WAD LINE) ในการคำนวณหาจุดทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับตัวส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญของวงจรซึ่งเราสามารถที่จะนำค่าเหล่านี้นั้นมาพิจารณา และเลือกได้หลายกรณี เช่น เราสามารถเลือกแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง เลือกค่าตัวต้านทานเพื่อให้จุดทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ และสมการที่ใช้ในการเส้นโหลดหาได้จากสมการทางด้าน OUTPUTของทรานซิสเตอร์ แล้วแทนค่า ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาจากวงจรโดยเขียนเป็นเส้นสมการทางด้าน คอลเลคเตอร์ โดยอาศัยกฎของเคียร์ชอฟจะได้ สมการคอลเลคเตอร์ เพื่อสมการทางด้านเอาท์พุต ดังนี้

$$I_C R_L + V_{CE} = V_{CC}$$

แล้วแทนค่า $V_{ce} = 0$ ก็จะได้ $I_C = \frac{Vcc}{RL}$ ดังในจุด Y ในรูปที่

ซึ่งแสดงเส้นสมการโหลด และแทนค่า $I_C = 0$ ก็จะได้ $V_{CC} = V_{CE}$ ดังที่ $V_{CE} = 15$ โวลต์ เส้นที่ลากจากจุด Y มายังจุดที่ 15 โวลต์ คือเส้นโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกจุดทำงาน ในการกำหนดจุดทำงานจุดทำงานบางจุดจะให้ผลดีกว่าจุดอื่นๆ การจุเลือกจุดทำงานที่ใดในกราฟลักษณะสมบัติขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของวงจร โดยทั่วไปเราจะต้องกำหนดช่วงทำงานที่ปลอดภัยหรือขอบเขตต่าง ๆ ดูเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงปลอดภัย การเลือกจุดทำงานภายในพื้นที่นี้ปัญหามีอยู่ว่า ควรเลือกจุดทำงานที่ไหนแน่ควรจะควบคุมไม่ให้มันเคลื่อนที่ไปแค่ไหน อย่างไร ในการนี้จะต้องคำนึงถึงสิ่งที่สำคัญส่วน 3 ประการคือ

1. จะต้องเลือกและควบคุมจุดทำงานเพื่อว่า เมื่อมีสัญญานแล้วจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ที่เลื่อนตามสัญญานนั้น ยังอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือสัญญานออกจะไม่ถูกขลิบ (CLIP) เพราะทรานซิสเตอร์อิ่มตัว หรือคัทออฟ

2. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระแสคอลเลคเตอร์ $I_C$ จะเพิ่มขึ้น ในการควบคุมจะต้องระวังไม่ให้จุดทำงานเลื่อนขึ้นไป เหนือเส้นไวเพอร์โบลาของกำลังสูญเสียสูงสุด ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้

3. จำนวนตัวพารามิเตอร์ของวงจรทรานซิสเตอร์ ขึ้นอยู่กับจุดทำงาน ในบางกรณีอาจต้องการควบคุมจุดทำงาน เพื่อไม่ให้จำนวนตัวพารามิเตอร์ ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปมากนัก หรืออาจจะต้องการเลือกจุดทำงานเพื่อให้ได้ค่าของ จำนวนพารามิเตอร์ตามต้องการได้ เมื่อจะพิจารณาตัวประกอบทั้งสองข้อนี้ ก็ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาสองข้อของทรานซิสเตอร์ คือ

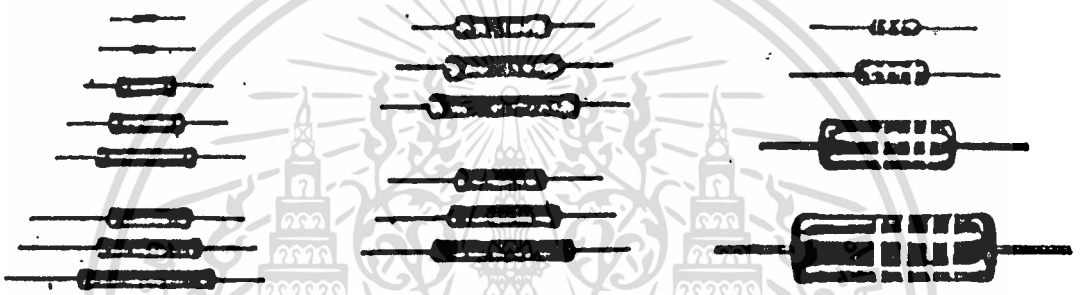
ก. ลักษณะสมบัติ และค่าพารามิเตอร์ของมิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไปได้มาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

ข. ลักษณะสมบัติ และค่าพารามิเตอร์บางตัวเช่น ของทรานซิสเตอร์จะต่างกันออกไปมากจากตัวหนึ่ง ไปยังอีกตัวหนึ่ง แม้ว่าจะเป็นทรานซิสเตอร์เบอร์เดียวกัน

2.12 ตัวต้านทาน (Risistor) ตัวต้านทานเป็น สิ่งประดิษฐ์ทางอิเลคทรอนิคส์ ที่มีใช้กันมาก ตัวต้านทานที่ใช้อาจมีรูปร่างลักษณะการใช้งานแตกต่างกันออกไป โดยแบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่</u> (Fixed Resistor) ตัวต้านทานทางชนิดค่าคงที่เป็นตัวต้านทานที่รู้จักกันดีโดยทั่วไป ตัวต้านทานที่พบได้ง่ายในวงจรมักจะเป็นตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ตัวอย่างของตัวต้านทานแบบนี้แสดงให้เป็นดังรูป

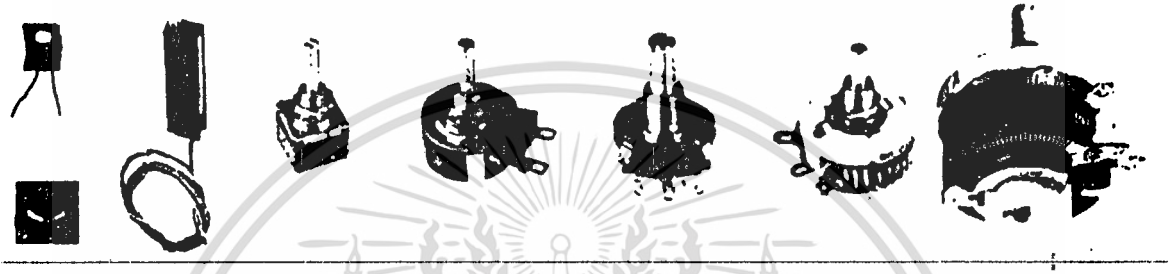


รูป 2.33 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบบต่าง ๆ

ตัวต้านทานที่มีค่าคงที่เหล่านี้ บางชนิดเป็นตัวต้านทาน ที่ทำมาจากผงถ่านเคลือบด้วยพลาสติก หรือ เซรามิคแป้งสีดำหรือน้ำตาล ตัวต้านทานบางแห่งทำด้วยสารจำพวกโลหะออกไซด์ ตัวต้านทานชนิดนี้โดยทั่วไปจะมีค่าผิดพลาดน้อย (tolerovnce) หรือมีค่าความถูกต้องเชื่อถือได้ตามที่บอกค่าไว้ที่ตัวมันได้สูง ตัวต้านทานที่มีค่าคงที่อีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า ชนิดลวดพัน (win wound) ตัวต้านทานชนิดนี้ทำมาจากลวดความต้านทานพันรอบแกนฉนวน ซึ่งทำด้วยสารจำพวกเซรามิค ตัวต้านทานชนิดนี้มีลักษณะสมบัติพิเศษคือ สามารถทนต่อการไหลของกระแสผ่านตัวมันได้สูงกว่าตัวต้านทานแบบอื่น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวต้านทานชนิดเลือกค่าได้</u> (Tapped Resistor) ตัวต้านทานบางชนิดอาจมีการเลือกค่าใดค่าหนึ่งได้ โดยปกติตัวต้านทางชนิดนี้จะมีสายขั้วแยกออกมาเป็นปุ่มหรือขั้ว การเลือกค่าตัวต้านทานทำโดยวิธีแยกสาย หรือโผล่สายออกมาภายนอกที่เรียกว่า แท็บ (Tap) การแท็บสายอาจทำได้มากกว่าหนึ่ง ดังในรูป

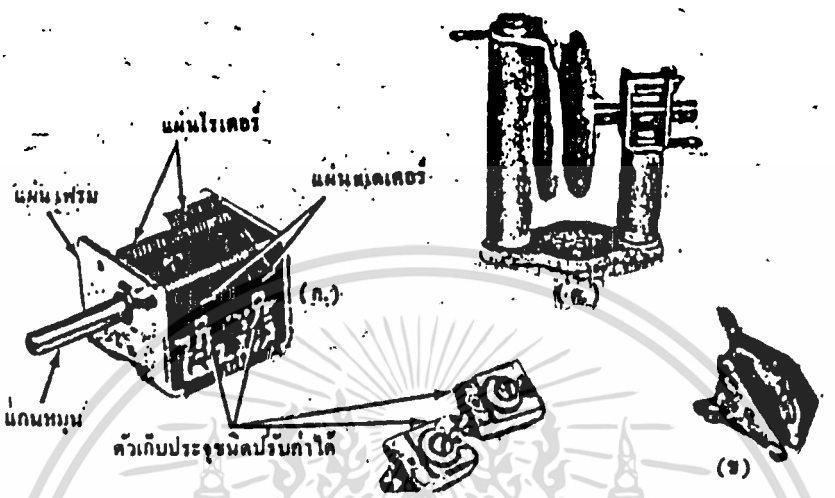


รูป 2.34 ตัวต้านทานชนิดเลือกค่าได้

เพื่อหลีกเลี่ยงเกี่ยวกับผลของสิ่งแวดล้อมที่มีตัวต้านทาน เช่น ความชื้นของอากาศ ฝุ่นละออง จึงใช้เซรามิค หรือ พลาสติค หล่อปิดตัวต้านทานทึบที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งเซรามิคจะมีขั้วยื่นออกมาภายนอก เพื่อต่อเข้ากับวงจร

<u>ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้</u> (Vainable resistor)ในวงจรไฟฟ้าหรืออิเลคทรอนิคทั่วไป ตัวต้านทานบางตัวมีผลต่อการควบคุมการทำงานของวงจรโดยการใช้คุณสมบัติในการเป็นตัวต้านทาน ตัวต้านทานชนิดนี้จะมีหน้าคอนแทคสำหรับใช้การหมุนเลื่อนหน้าคอนแทค การปรับค่าตัวทาน เพื่อเป็นการสะดวกต่อการปรับค่าความต้านทาน จึงมักจะมีแกนยื่นออกมาหรือ มีส่วนที่จะทำให้หมุนปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 2.35 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

<u>ตัวต้านทานชนิดพิเศษ</u> (Special Resistor) ในเครื่องมืออิเลคทรอนิคส์บางชนิดจำเป็น จะต้องใช้ตัวแทนที่ทำหน้าที่พิเศษอย่างอื่นอีกนอกเหนือจากการแสดงเป็นตัวต้านทาน เช่น ตัวต้านทานที่ทำหน้าที่จำกัดกระแส หรือ ทำหน้าที่เป็นฟิวส์ ตัวต้านที่เปลี่ยนระบบอุณหภูมิ ตัวต้านทานไวต่อแสง (Light refeasing resistor) ตัวต้านทานที่ขึ้นกับแรงดัน

<u>การเลือกตัวต้านทานใช้งาน</u> ในการเลือกตัวต้านทานเพื่อใช้งานมีหลักใหญ่ 3 ข้อที่ต้องคำนึงถึงคือ ชนิดของตัวต้านทาน ค่าความต้านทานรวมถึงช่วงความผิดพลาด และ กำลังงานที่ทนได้ ชนิดของตัวต้านทานขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับงาน ราคา ตลอดจนลักษณะงานที่จะนำไปใช้ เช่น ตัวต้านทานที่ใช้จะเป็นชนิดลวดพัน ชนิดถ่าน หรือชนิดโลหะออกไซด์ เป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือตัวต้านทานที่มีค่าคงที่ ค่าความต้านทานและช่วงฝอนผัน ที่จะมีค่าผิดพลาดขึ้น อยู่กับการทำงานของวงจรหรือการออกแบบวงจร ซึ่งต้องคำนึงถึง เมื่อตัวต้านทาน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวต้านทาน ดังนั้นตัวต้านทานที่ใช้งานจะต้องสามารถ ระบายความร้อน การคำนวณหากำลังงานสูญเสียสามารถคำนวณหาได้ เช่น ค่าตัวต้านทาน 1 หรือ เมื่อต่อในวงจรแล้วมีแรงดันตกคร่อม 10 โวลท์ ดังนี้ ค่า กำลังงานสูญเสียที่ตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับ $\frac{V^2}{R} = \frac{10^2}{1000}$ หรือ 0.1 วัตต์

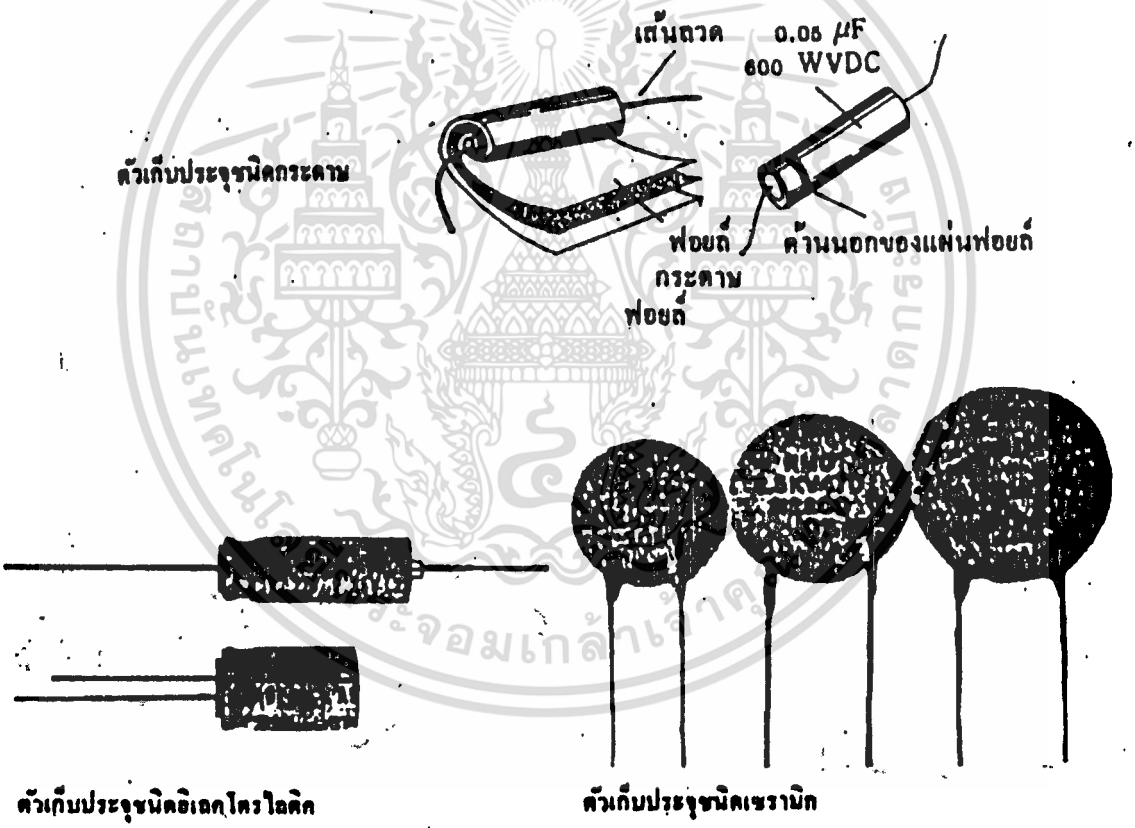
ดังนั้นจึงเลือกตัวต้านทานที่ทนกำลังงานได้ 1/4 วัตต์ พอเพียง

2.13 <u>คาปาซิเตอร์</u> (Capacitor) หรือตัวเก็บประจุซึ่งเป็นอุปกรณ์ ทางอิเลคทรอนิคส์ที่ทำหน้าที่เก็บสะสม หรือถายประจุไฟฟ้าให้กับวงจรหรืออุปกรณ์อื่น ตัวเก็บบรรจุจึงมีคุณสมบัติพิเศษทางด้านไฟฟ้าหน้ามือตัวเก็บประจุจะต่อต้านการเปลี่ยน แปลงของแรงดัน นั้นหมายความว่าตัวแรงดันนั้นให้กับตัวเก็บ ประจุเกิดการ เปลี่ยนแปลงในทางเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงนี้ดังนั้นแรงดันที่ ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดไม่ได้ แต่จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลง เมื่อแรง ดันที่ตัวเก็บประจุคงที่แล้ว กระแสไฟจะไม่สามารถไหลเข้าไปสะสมในตัวเก็บประจุ ได้อีก ดังนั้น กระแสไฟตรงจึงไหลเข้าในตัวเก็บประจุได้ในช่วงการสะสมประจุเท่านั้น แต่เมื่อประจุมีเต็มที่แล้ว กระแสนั้นก็จะไหลต่อไปอีกไม่ได้ จึงจะเห็นว่าตัวเก็บประจุ ไม่ยอมให้กระแสไฟตรงไหลผ่าน ส่วนในกระแสสลับนั้นแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา ตัวเก็บประจุจึงพยายามเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่คร่อม ตัวเก็บประจุด้วย ตลอดเวลา จึงเห็นเสมือนว่ากระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุได้

<u>ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่</u> (Fixed Capacitor) ตัวเก็บประจุ ชนิดค่าคงที่เป็นชนิดที่ใช้กันมาก ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะได้รับการผลิตให้มีค่าคงที่ และ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุได้อีกเลยนอกจากจะนำตัวเก็บประจุหลาย ๆ ตัวมาต่อกันในลักษณะขนานกัน อนุกรมหรือผสม ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ มีด้วยกัน หลายแบบหลายขนาด เช่น แบบกระดาษ (Paper capcitor) แบบไมก้า (Mica

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

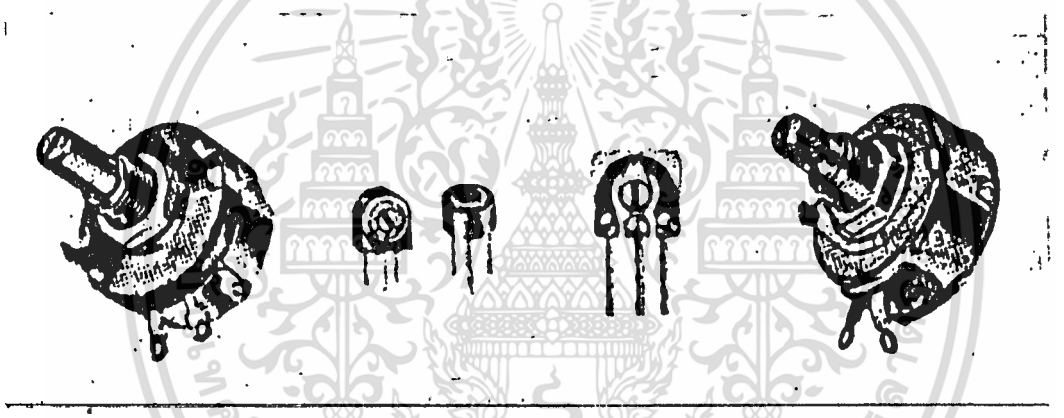
capacitor) แบบเซเรมิค (Ceramic capcitor) และแบบอิเลคโตรไลติค (ELECTROLYTIC CAPCITOR) แต่ชนิดนี้ในการนำไปใช้งาน จะต้องระมัดระวังการต่อให้ถูกขั้วด้วยมิฉะนั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ คาปาซิเตอร์ได้ การเรียกชื่อแต่ละแบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเรียกตามวัสดุ ที่ใช้ทำเป็นฉนวนกั้นและหุ้มแผ่นตัวนำนั้น




2.36 คาปาซิเตอร์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนค่าได้ (Vaniable Capacitor) ตัวเก็บประจุพวกนี้ก็เหมือนกับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้นั่นเอง โดยทั่วไปตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้มักใช้วงจรจูนนิ่ง หรือวงจรปรับแต่งสัญญาณทางอิเลคทรอนิคส์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ที่ใช้กันมากเป็นแผ่นโลหะประกอบบนแกนเดียวกัน เมื่อหมุนแกนแผ่นโลหะจะเลื่อนเข้าหากันทำให้ค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่ง คือตัวเก็บประจุชนิดนี้เป็นตัวเก็บประจุชนิดใช้อากาศ เป็นสารไดอิเลคตริก

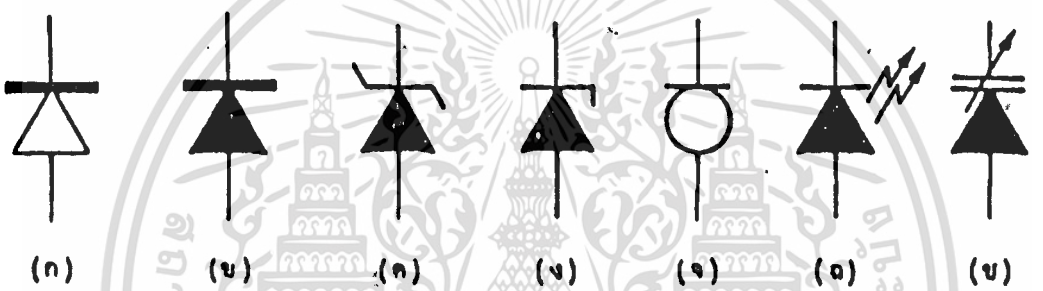


รูป 2.37 ตัวอย่างตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้

2.14 ไดโอด (Diode) ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเลคทรอนิกส์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด N มาแล้วแพร่อนุภาคอะตอมของสารบางชนิดเข้าไปในเนื้อสารเกิดเป็นสาว P ขึ้นบางส่วน แล้วจึงต่อขั้วออกใช้งาน ไดโอดชนิดนี้มีบทบาทในวงจรอิเลคทรอนิกส์ และมีใช้แพร่หลาย โดยส่วนใหญ่ใช้ในวงจรแปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรง (Rectifier) และเนื่องจากไดโอดนำกระแสได้เพียงทางเดียวดังนั้นในการวางตัวไดโอดในวงจรจำเป็นจะต้องตรวจสอบขั้วไดโอดให้ถูกต้องก่อนต่อใช้ในวงจรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดมีด้วยกันมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการใช้งาน เช่นไดโอดเรคติไฟเออร์ (ไดโอดธรรมดาทั่วไป) ซีเนอร์ไดโอด ทันเนลไดโอดไดโอดเปล่งแสง (LED) วาแรคเตอร์ไดโอด เป็นต้น




รูป 2.38 สัญญลักษณ์ที่ใช้แทนไดโอด

สัญญลักษณ์ที่เขียนแทนไดโอดดังแสดงข้างบน ทิศทางของลูกศรจะเป็นการแสดงทิศทางการไหล ของกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด จากรูปที่แสดง รูป ก. และ ข. เป็นไดโอดเรคติไฟเออร์ รูป ค. และ ง. เป็นซีเนอร์ไดโอด รูป จ. เป็นทันแนลไดโอด รูป ฉ. เป็นไดโอดเปล่งแสง รูป ช. แทนวาแรคเตอร์ไดโอด

<u>ไดโอดเปล่งแสง</u> (Light-Emitting Diode) เรียกย่อๆว่า LED คือไดโอดที่สามารเปล่งแสงออกมาได้ แสงที่เล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียว และเฟสต่อเนื่องกัน

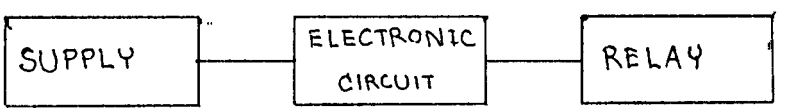
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amester คือ อุปกรณ์ที่ป้องกันอันตรายจากการ Surge ภายในระบบและนอกระบบ ภายในระบบอาจเกิดการสวิตชิ่งในระบบ ถ้าจากภายนอกก็อาจเกิดเจากฟ้าผ่า (Lightning) ในที่นี้ใช้สัญญลักษณ์ ดังในรูป

รูป 2.39 สัญญลักษณ์ของ Amester

2.2.2.6 ทฤษฎีของวงจรอิเลคทรอนิคส์ที่นำมาใช้ในวงจร

ในวงจรที่ได้ออกแบบมาเป็นการนำเอาหลักการวงจรอิเลคทรอนิคส์ในส่วนของที่ทำหน้าที่ในการขยายกระแส และทำหน้าที่เสมือนสวิทช์เพื่อนำเอาสัญญาณที่ได้ไปควบคุมตัวกลางในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังนั้นคือรีเลย์ โดยเอาสัญญาณที่ได้จากวงจรอิเลคทรอนิคส์ทำหน้าที่ควบคุมการ ON-OFF ของรีเลย์ โดยจะแบ่งอธิบายย่อออกเป็นส่วนๆ จาก BLOCK DIAGRAM ในรูปที่ 2.40

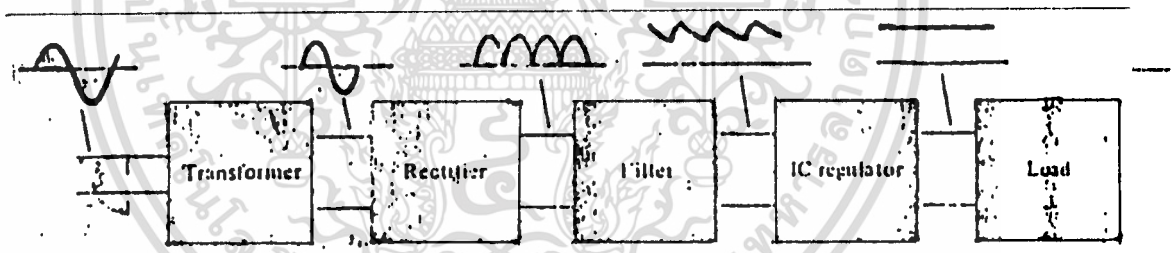



รูปที่ 2.40 BLOCK DIAGRAM ของความสัมพันธ์ในภาคต่าง ๆของ CONTROL UNIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUPPLY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้ามา เพื่อช่วยให้วงจรทำงานได้ พร้อมกับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดรีเลย์และส่วนที่เป็นตัวตรวจจับ (SENSE) สัญญาณการควบคุมระดับน้ำโดยผ่านวงจรทางแห่งอิเลคโทรดในส่วนของSUPPLY หรือเรียกว่าแหล่งจ่ายไฟตรง และแหล่งจ่ายไฟตรงนี้ก็ทำหน้าที่ เปลี่ยนพลังงานไฟสลับให้เป็นพลังงานตรงโดยมี BLOCK DIAGRAM ดังรูปที่ 2.40

โดยจาก BLOCK DIAGRAM จะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนของหม้อแปลง (TRANSFORMER), เรคติไฟเออร์,และฟิลเตอร์ (FILTER) ส่วนที่เป็นหัวใจในการแปลงไฟกระแสสลับแรงดันต่ำที่ได้มาจากหม้อแปลง ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงคือส่วนของ เรคติไฟเออร์

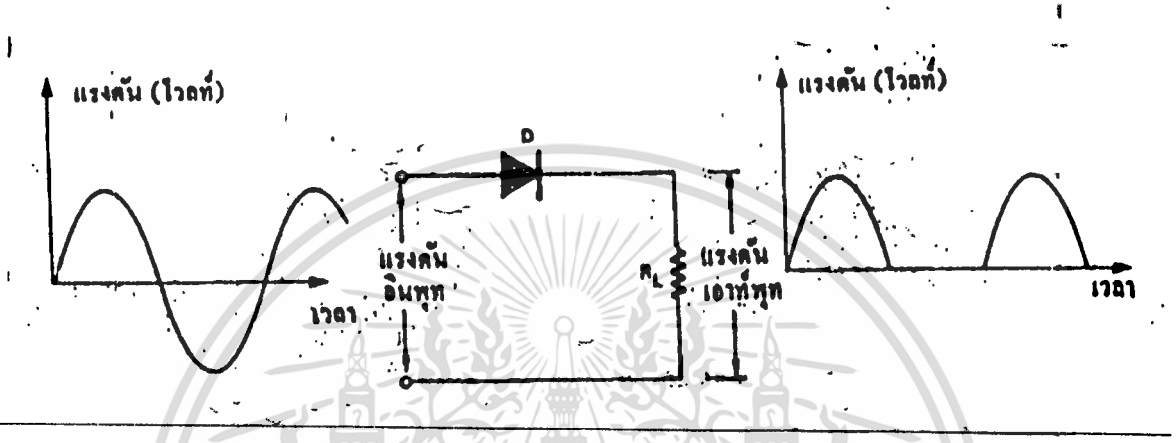



รูปที่ 2.41 BLOCK DIAGRAM ของส่วน POWER SUPPLY

<u>เรคติไฟเออร์</u>คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับ ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง หรือมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศ ทางใดทิศทางหนึ่งแก่ความต้านทานโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.1 วงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์ (HALF WAVE RECTIFIER)




รูปที่ 2.42 วงจรฮาร์ฟเวฟเรคติไฟเออร์

หลักการทำงานของวงจรคือ ในระหว่างครึ่งลบของสัญญาณ ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลในวงจร แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R_L$ จึงมีค่าเป็นศูนย์และเมื่อแรงดันครึ่งบวกเข้ามาไดโอด จะถูกไบแอสตรงทำให้แรงดันไหลในวงจร เกิดแรงดันคร่อมตัวต้านทานโหลดตามลักษณะ สัญญาณอินพุทดังนั้นสัญญาณเอาท์พุทที่โหลดจึงมีค่าเป็นสัญญาณรูปครึ่งไซเคิลที่เรียกว่าฮาล์ฟเวฟ (HALF WAVE)

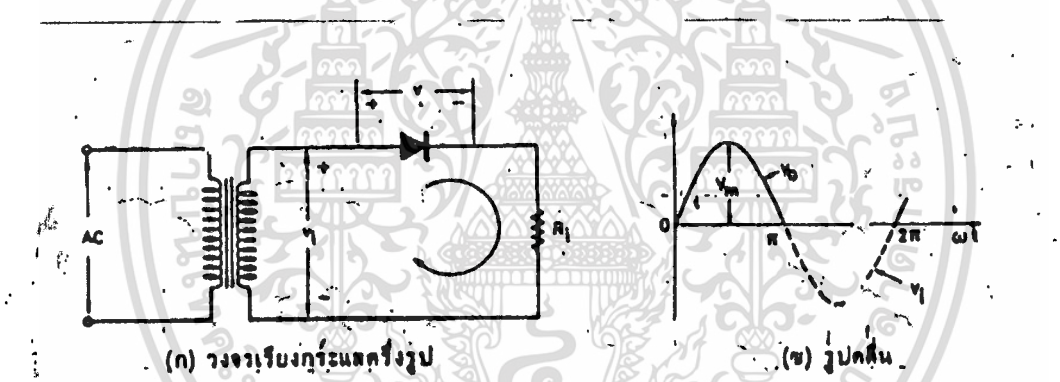
ค่าแรงดันไฟตรงที่วัดไฟจะมีค่าเฉลี่ยของสัญญาณทั้งหมดซึ่งวงจรฮาล์เวฟเรค-ติไฟเออร์จะให้ค่าสี่ของแรงดันเพียง 0.138 เท่าของแรงดันไฟสูงสุดเท่านั้น

หรือ $V_{DC} = 0.318 \ V_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรซาล์เวฟ จะดึงกำลังงานจ่ายไปยังโหลดได้แต่เพียงครึ่งไซเคิล ที่เป็นบวก. ดังนั้นวงจรจึงมีข้อจำกัดในเรื่อง ของการจ่ายกระแสไปยังโหลดด้วยเหตุผลนี้ วงจรซาล์ฟเวฟเรคติไฟเดออร์ จึงใช้เป็นวงจรที่จ่ายกระแสให้โหลด ที่มีจำนวนไม่มากเกินไป

ข้อเสียอีกประการหนึ่ง ของวงจรซาล์เฟเรคติไฟเออร์คือเนื่องจากวงจรจ่ายกระแสเป็นห้วงๆ ทีละครึ่งไซเคิล ดังนั้นหม้อแปลงที่จ่ายไฟสลับจะมีค่ากระแสไฟเป็นช่วงๆ ด้วย จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงต่ำลง เนื่องจากเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กของหม้อแปลงได้ง่าย




รูปที่ 2.43 วงจรเรียงกระแสครึ่งรูปคลื่น (HALF-WAVE RECTIFIER)

การคำนวนปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญของวงจรเรียงกระแสครึ่งรูปจะทำได้ดังนี้

ให้ Rf = forward resister ของ ไดโอด

Vi = Vm Sin wt

i = im Sin wt

= {Vm/Rf+RI} Sin wt เมื่อ o<wt=<π

และ i = o เมื่อ π)<wt=<2π

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าตรงขาออก

$$idc = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\pi} I_m \sin wt \, dwt$$

$$= \frac{Im}{\pi}$$

$$Irms = \frac{Vm}{\pi} \left[ \int I^2 m \sin^2 wt \, dwt \right]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= Im/2$

รงดันไฟตรงขาออก

$Vdc = Idc*RI$

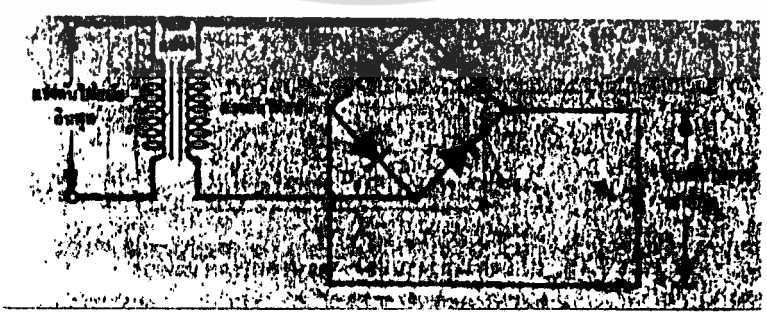
กาลังไฟฟ้า $Pi = I^2rms\ (Rf+RI)$

วงจรฮาล์เวฟจะมีค่าแรงดันไบแอสกลับตกคร่อมไดโอดสูงสุดเท่ากับแรงดันสูงสุดของไฟสลับ การเลือกไดโอดต้องเลือกให้ทนแรงดันสูงสุดในสภาวะที่ไดโอดไม่นากระแสได้เพื่อไม่ให้ไดโอดเกิดการเสียหาย และเอาท์พุทของวงจรมีการกระเพื่อ(RIPPLE) สูงมากคือคือบางส่วนของสัญญาณเอาท์พุทจ่ายไฟในลักษณะที่เป็นพลส์

2.15.2 <u>วงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์</u> (FULL WAVE RECTIFIER)

วงจรเรคติไฟเออร์แบบนี้จาเป็นต้องใช้ไดโอดอย่างน้อย 2 ตัวต่ออยู่ในวงจร เพื่อว่าจะให้ไดโอดเกิดการนากระแสในแต่ละครึ่งไซเคิลของไฟกระสสลับ ไดโอดทั้งสองจึงทาหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสให้กับความต้านทานรหลดตัวละครึ่งไซเคิล แต่ต้องจ่ายให้ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นวงจรสามารถจ่ายกระแสไฟตรงได้เรียบ และสามารถจ่ายกระแสได้สูงกว่า แบบวงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์

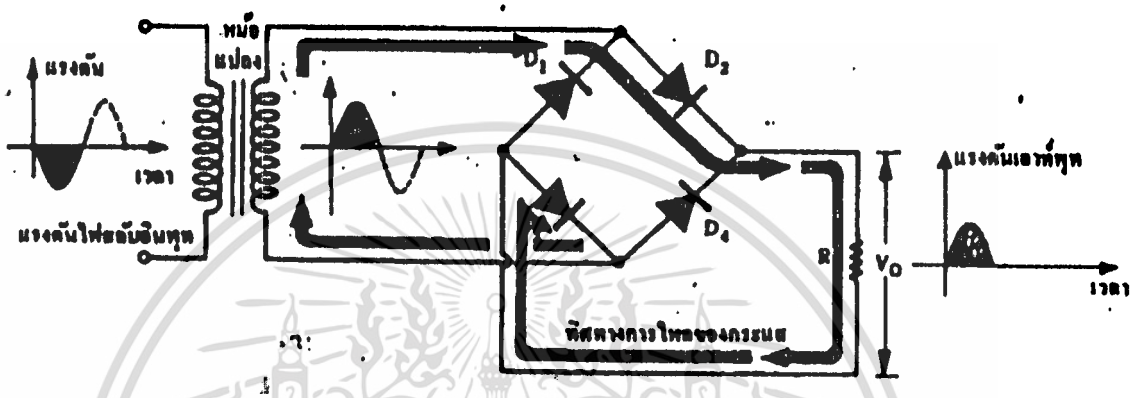
2.15.3 <u>วงจรฟูลเวฟแบบบริดจ์เรคติไฟเออร์</u> (BRIDGE RECTIFIER)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.44 <u>วงจรฟูลเวฟแบบบริดจ์เรคติไฟเออร์</u>

แรงดันไฟสลับจะต่อเข้าที่สองมุมของวงจรอิเลคทรอนิคส์และเอาท์พุทจะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือดังวงจรในรูป




รูปที่ 2.45 แสดงการทำงานของวงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์

จากรูปที่ 2.45 จะเห็นได้ว่าการนำกระแสของไดโอดจะเกิดสลับกันทีละสองตัวคือ $D_2$ กับ $D_4$ และ $D_1$ กับ $D_3$ แรงดันไฟตรงที่โหลดสามารถหาได้จาก

$$Vdc = Vp*0.637$$

$$= \approx 2*0.637\ Vrms$$

เมื่อกำหนดหม้อแปลงให้วงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์แล้ว วงจรสามารถทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าได้เป็นสองเท่าของวงจรฟูลเวฟแบบมีแท็ปกึ่งกลางของขดทุติยภูมิ ทั้งนี้เพราะแรงดันที่คร่อมหม้อแปลงทั้งหมดไม่มีการแบ่งครึ่งแต่จะป้อนเข้าไปยังทุกวงจรบริดจ์ได้โดยตรงจึงทำให้ $V_r$ ของวงจรบริดจ์มีค่าเป็นสองเท่าของวงจรหม้อแปลงที่มีแท็ปกึ่งกลาง

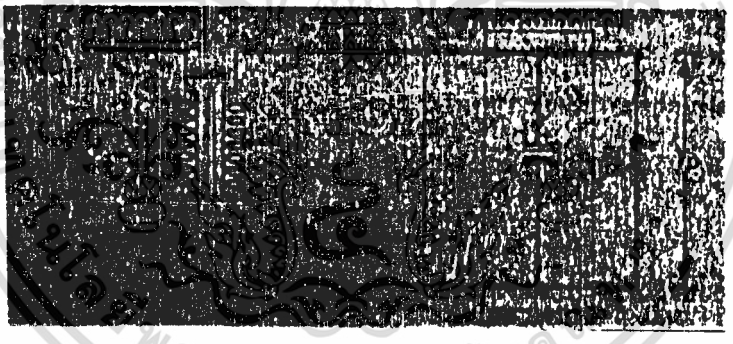
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.44 เมื่อพิจารณาขณะที่ไดโอด $D_2$ และ D4 นำกระแสไดโอด $D_1$ $_1D_3$ จะไม่นำกระแสขณะที่ $D_2$ $_1D_1$ ไม่นำกระแสนั้นแรงดันที่คร่อมไดโอด $D_2$ $_1D_4$จะมีค่ามากที่สุดได้เพียง $V_r$ เท่านั้นซึ่งมีค่าน้อยกว่าวงจรพูลเวฟแบบหม้อแปลงมีแท็ปกึ่งกลาง ซึ่งแบบ FULL WAVE แบบบริดจ์นี้ทนแรงดันสูงสุดเพียง $V_r/2$เท่านั้น

2.15.4 <u>วงจรกรองแรงดันหรือฟิลเตอร์</u> (FILTER)

ค่ากระเพื่อมของแรงดันไฟตรงเอาท์พุตที่กระเพื่อมไปจาก ค่าแรงดันไฟเฉลี่ยหรือแรงดันไฟตรงเราเรียกว่า ริปเปิล (RIPPLE) ซึ่งอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ตลอดจนวงจรส่วนใหญ่ต้องการไฟตรงที่ราบเรียบเลี้ยงวงจร ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จากวงจรเรคติไฟเออร์จะต้องผ่านวงจรฟิลเตอร์นี้ก่อน

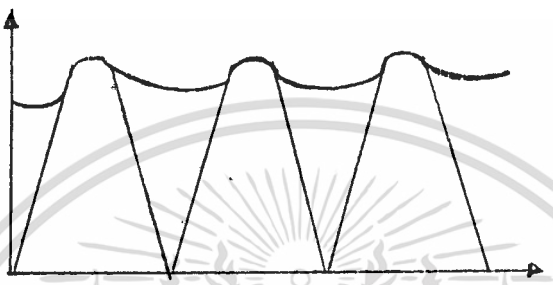
2.16 <u>การกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ</u> (CAPACITOR FILTER)



รูปที่ 2.46 วงจรกรองกระแสด้วยตัวเก็บประจุ

วงจรกรองแรงดันแบบนี้ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุต่อเชื่อมคร่อมเอาท์พุทตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในตัวมัน ในขณะที่แรงดันเอาท์พุทเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงสุดด้วย เมื่อแรงดันเอาท์พุทลดลงมาเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ช่วยจ่ายประจุให้โหลดทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งแรงดันเอาท์พุทของเรคติไฟเออร์มีค่ามากกว่าก็ประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุอีกครั้งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

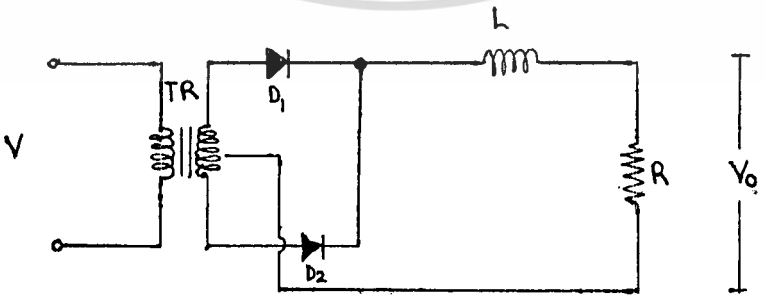
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.47 ใช้คาปาซิเตอร์เป็นตัวกรองแรงดันของวงจรฟูลเวฟ

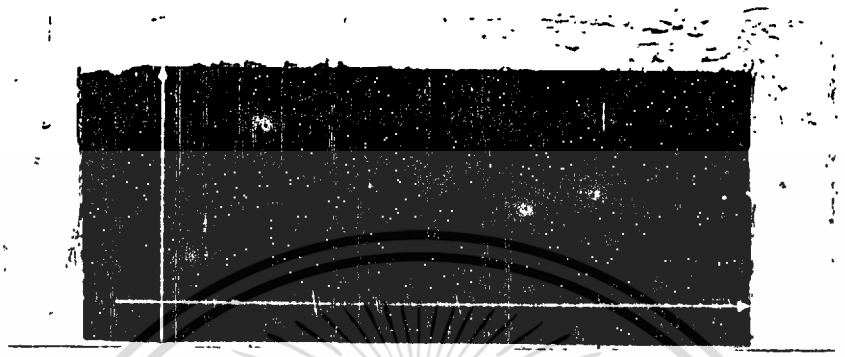
2.16.1 <u>การกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ</u> (INDUCTANCER FILTER)

ตัวเหนี่ยวนำนี้สามารถเก็บหรือคายพลังงานทางไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ ซึ่งการเก็บพลังงานไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า ฟลัก (FLUX)




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

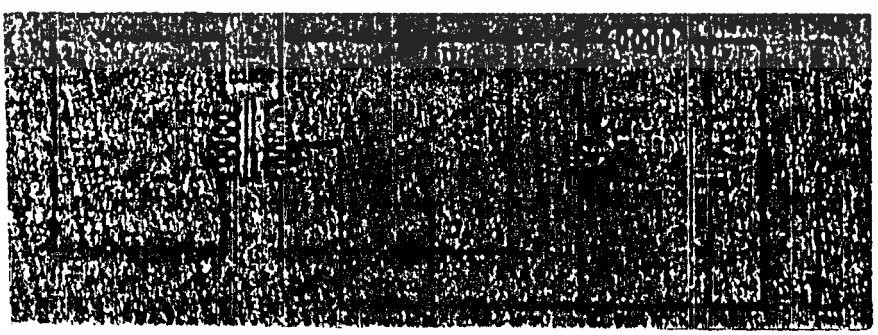
รูปที่ 2.48 วงจรกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.49 สัญญะสัญญาณของการกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ

<u>วงจรกรองแรงดันแบบพาย</u> (π)

เป็นวงจรที่ให้ผลของริปเปิลลดลงมากในวงจรแบบนี้ตัวเก็บประจุ C1 ทำหน้าที่ในการ FILTER ตัวเก็บประจุนี้จะเป็นตัวทำให้มีค่าแรงดันเอาท์พุท มีค่าแรงดันสูงสุดแล้วคายประจุลดลง ในขณะที่แรงดันเอาท์พุทจากเรคติไฟเออร์ลดลงตัวเก็บประจุ C2 ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ C1 ตัวเหนี่ยวนำ L1 ทำให้การกรองแรงดันทั้งหมดดีขึ้น โดยปรับแรงดันไม่ให้ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองแตกต่างกันมากนัก

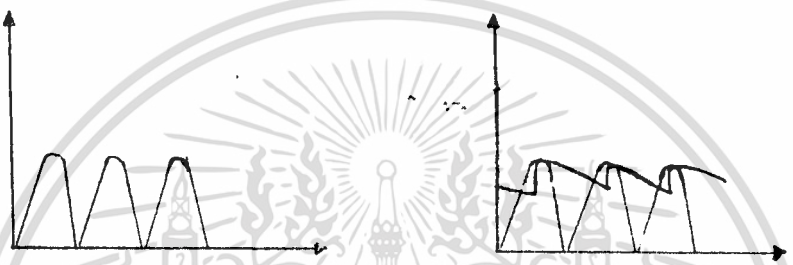


รูปที่ 2.50 วงจรกรองแรงดันแบบพาย

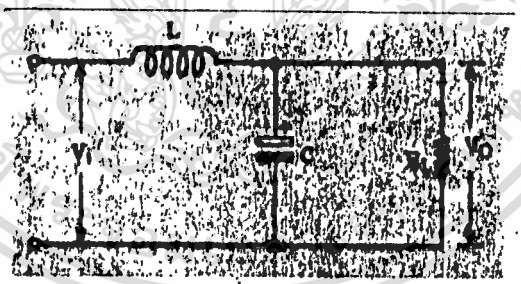
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.3 <u>วงจรกรองแรงดันแบบรูปตัวแอล</u> (L-SECTION FILTER)

ตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่ ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสและตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน เมื่อรวมทั้งสองนี้เข้าด้วยกันจะทำให้ค่าของริปเปิลลดลงมาก วงจรนี้มีข้อดี คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแรงดันคร่อมที่เอาท์พุทจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 2.51 ลักษณะสัญญาณแรงดันเมื่อมีการกรองแรงดันแบบแอล

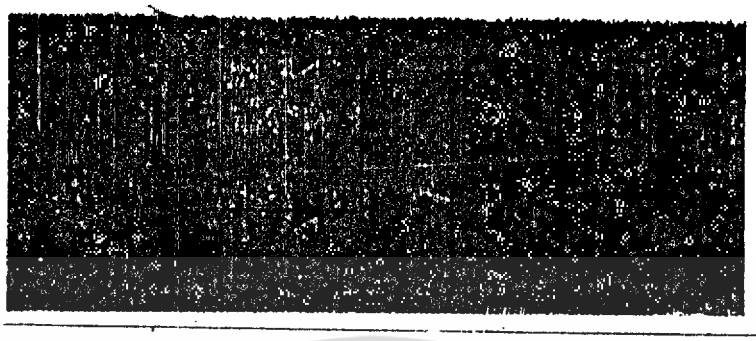



รูปที่ 2.52 วงจรกรองแรงดันแบบ L

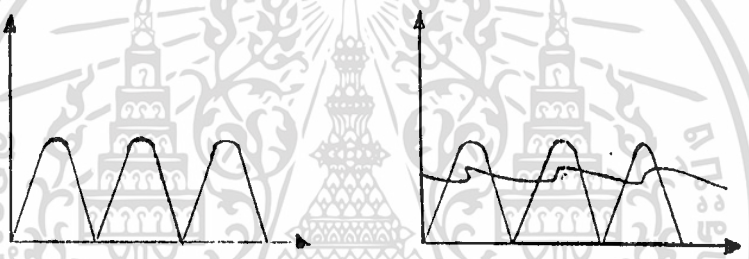
2.16.4 <u>วงจรกรองแรงดันแบบ RC</u>

วงจรแบบนี้เป็นที่นิยมโดยทั่วไป ตัวต้านทานจะทำหน้าที่เพิ่มค่าคงตัวเวลาของการคายประจุบนตัวเก็บประจุ C1 และเวลาประจุของตัวเก็บประจุ C2 แต่การกรองแรงดันแบบนี้ไม่ให้ผลดีเมื่อต้องจ่ายกระแสไปยังโหลดมีค่ามากๆ เพราะกระแสจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียสูงในตัวต้านทาน นอกจากนี้ยังเป็นผลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าสูงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.53 วงจรกรองแรงดันแบบ ๆ] ที่ใช้ R แทน L



รูปที่ 2.54 แสดงลักษณะสัญญาณเอาท์พุทและผลของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# หลักการสื่อสารด้วยวิทยุ

อิเลคทรอนิคส์เจริญรุ่งเรืองขึ้นมาได้มากทำให้การสื่อสารด้วยระบบต่าง ๆ พลอยเจริญก้าวหน้าตามขึ้นไปอีก จนปัจจุบันเราสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ทั่วโลกโดยผ่านทางดาวเทียม อย่างไรก็ดีการสื่อสารที่ใช้ก็ยังมีด้วยกันหลายระบบ แต่ละระบบก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป และจะใช้ประโยชน์กันเฉพาะอย่างในบทนี้เราจะได้กล่าวถึงหลักการสื่อสารวิทยุด้วยระบบต่าง ๆ และจะได้กล่าวในรายละเอียดของวงจรเครื่องส่งเสริมรับในบทต่อไป

รูปที่ 3.1 การสื่อสารระหว่างประเทศผ่านดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

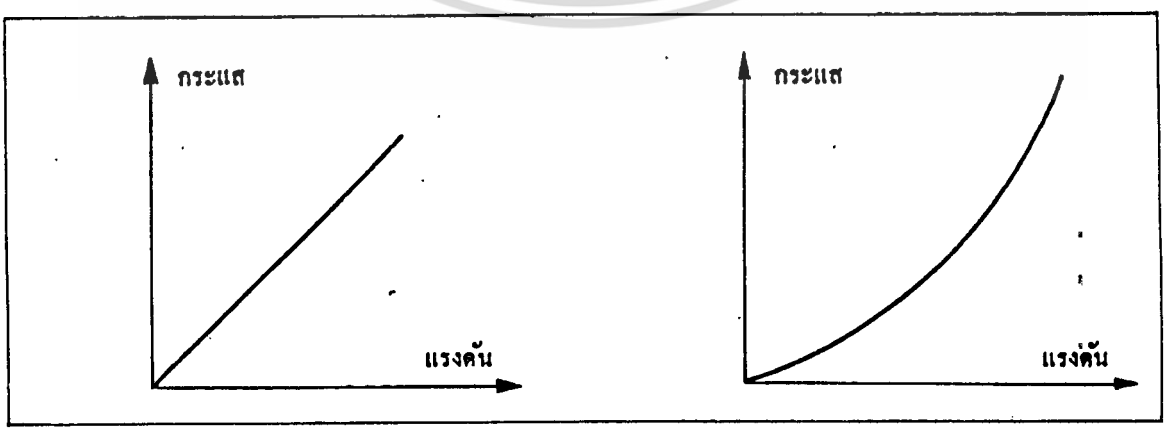
## 3.1 การรวมความถี่ (mixing frequency)

ในปัจจุบันเราพบว่า สัญญาณทางอิเลคทรอนิคส์สามารถใช้งานการส่งข้อมูลหรือข่าวสารได้อย่างกว้างขวาง และสัญญาณนี้ยังใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ อีกหลายอย่าง

ในการศึกษาวงจรอิเลคทรอนิคส์จะพบว่า ความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันสามารถรวมกันได้หลายแบบเพื่อให้เกิดสัญญาณใหม่ ผลของสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของการรวมนั้นเป็นแบบเชิงเส้น (linear) หรือไม่เชิงเส้น (nonlinear)

ในวงจรอิเลคทรอนิคส์นั้นสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นเชิงเส้นได้แก่พวกตัวต้านทาน ทั้งนี้เพราะเมื่อเราให้แรงดันกับสิ่งประดิษฐ์ กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนที่แน่นอน เช่นจำนวนกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนแรงดันจาก 2 โวลท์ ไปเป็น 4 โวลท์ จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแรงดันจาก 102 โวลท์ เป็น 104 โวลท์ ส่วนค่าของตัวต้านทานจะต้องมีค่าคงที่ตลอดทุกค่าแรงดัน

ส่วนสิ่งประดิษฐ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ค่าความต้านทานหรืออิมพิแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปหรือเป็นตัวแปรของค่ากระแสและแรงดัน เช่นเมื่อเพิ่มแรงดันจาก 2 ไปเป็น 4 โวลท์ จะทำให้กระแสเปลี่ยนแปลงไป 1 แอมแปร์ แต่ถ้าเพิ่มแรงดันจากเดิมไปอีก 2 โวลท์ที่ที่ช่วงแรงดันต่างกัน เช่นจาก 100 โวลท์ เป็นไป 102 โวลท์ กระแสจะเปลี่ยนแปลงไป 2 แอมแปร์ เป็นต้น

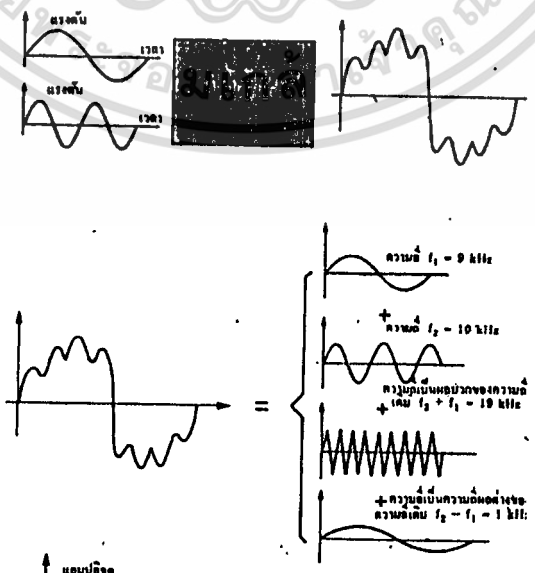



รูปที่ 3.2 สิ่งประดิษฐ์เชิงเส้น สิ่งประดิษฐ์ไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้าสองสัญญาณให้กับวงจรที่มีสิ่งประดิษฐ์เชิงเส้น สัญญาณทั้งสองจะเกิดการรวมกันเป็นสัญญาณรูปใหม่ ซึ่งสัญญาณใหม่ที่เกิดขึ้นจะไม่เหมือนสัญญาณสองสัญญาณเดิม และจะมีความถี่พื้นฐานของทั้งสองสัญญาณอยู่ในสัญญาณใหม่ดังตัวอย่างเช่นนำสัญญาณความถี่ 100 Hz รวมกับสัญญาณความถี่ 200 เฮริทซ์ได้สัญญาณรูปใหม่เกิดขึ้น แต่ถ้าเอาสัญญาณที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ก็จะพบว่าประกอบด้วยสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่ 100 IIz และ 200 Hz นั้น

เมื่อมีสัญญาณสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันมารวมกันอย่างไม่เชิงเส้น ผลที่ได้รับจะได้ความถี่ผสมของสัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่แตกต่างไปจากการรวมสัญญาณแบบเชิงเส้น นั่นคือการรวมสัญญาณแบบเชิงเส้นจะได้สัญญาณที่มีความถี่เหมือนกับความถี่ของสัญญาณเดิม แต่การรวมสัญญาณกแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะได้สัญญาณใหม่ที่มีความถี่ย่อยเพิ่มมากขึ้นอีกโดยจะมีความถี่ย่อยที่เหมือนกันความถี่เดิม และความถี่เป็นผลบวกหนึ่งความถี่ความถี่ที่เป็นผลลบอีกหนึ่งความถี่เป็นความถี่ย่อยทั้งหมดสี่ความถี่ เช่นสัญญาณที่มีความถี่ 9 กิโลเฮิรทซ์ รวมกับสัญญาณที่มีความถี่ 10 กิโลเฮิรทซ์ รวมกันแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะได้สัญญาณใหม่ที่มีความถี่ย่อย 9, 10, 19 และ 1 กิโลเฮิรทซ์

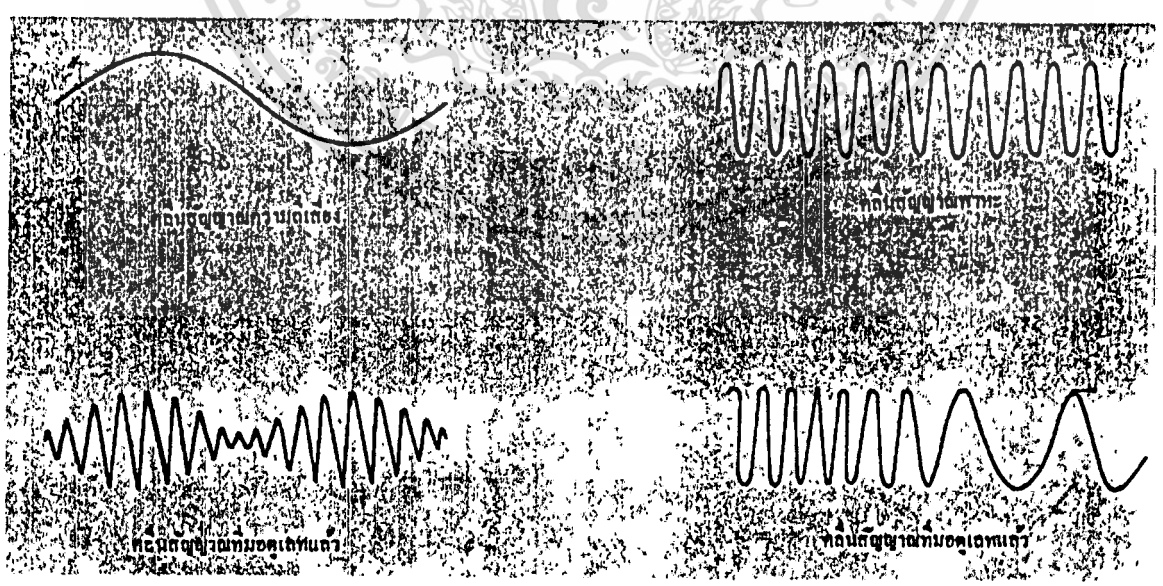



รูป การผสมสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเสบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การมอดูเลทสัญญาณ

เราคงอยากจะทราบว่าสัญญาณความถี่ที่กล่าวมาแล้วนี้จะสามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ในการนำข่าวสารหรือข้อมูลได้อย่างไร วิธีเบื้องต้นได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นเกี่ยวกับการส่งสัญญาณแบบโทรเลขโดยใช้รหัสของมอร์ส ถึงแม้ว่าการส่งสัญญาณแบบนี้ยังมีที่ใช้อยู่บ้าง แต่ก็นับได้ว่าเป็นวิธีที่มีข้อยุ่งยากในการถอดแบลรหัสและไม่สะดวกต่อการใช้งาน เช่นไม่สามารถส่งออกในรูปของสัญญาณเสียงได้ แต่ในปัจจุบันเราคงจะได้ยินได้ฟังเสียงจากวิทยุ โทรทัศน์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการส่งข่าวสารข้อมูลด้วยผลสัพธ์ให้เป็นเสียงนั้น ไม่ใช่วิธีที่ยุ่งยาก เลยวิธีที่จะทำการส่งสัญญาณเสียงหรือดนตรีออกไปให้ได้ไกล ๆ ก็ต้องอาศัยสัญญาณหรือคลื่นไฟฟ้าเป็นตัวพาหะนำสัญญาณเสียงนั้น วิธีการใช้อาศัยหลักการผสมคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกับคลื่นไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณเสียงแล้วส่งสัญญาณออกไปดังที่เราเรียกว่า **การมอดูเลท** ( modulation)




รูป สัญญาณและผลของการมอดูเลทสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติคลื่นเสียงมีความถี่ต่ำ ดังนั้นการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรงย่อมไม่ได้ผล ทั้งนี้เพราะคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำไม่สามารถเดินทางไกล ๆ ได้ การมอดูเลทจึงมีความจำเป็นโดยการนำคลื่นสัญญาณแม่เหล็กความถี่สูง หรือที่เรียกว่าคลื่นพาหะเป็นตัวนำสัญญาณคลื่นความถี่เสียง เพื่อที่จะได้สามารถส่งคลื่นสัญญาณออกไปได้ในระยะทางไกล ๆ คลื่นสัญญาณพาหะที่ใช้จึงเรียกว่า **คลื่น**

3.3 **สัญญาณความถี่วิทยุ**

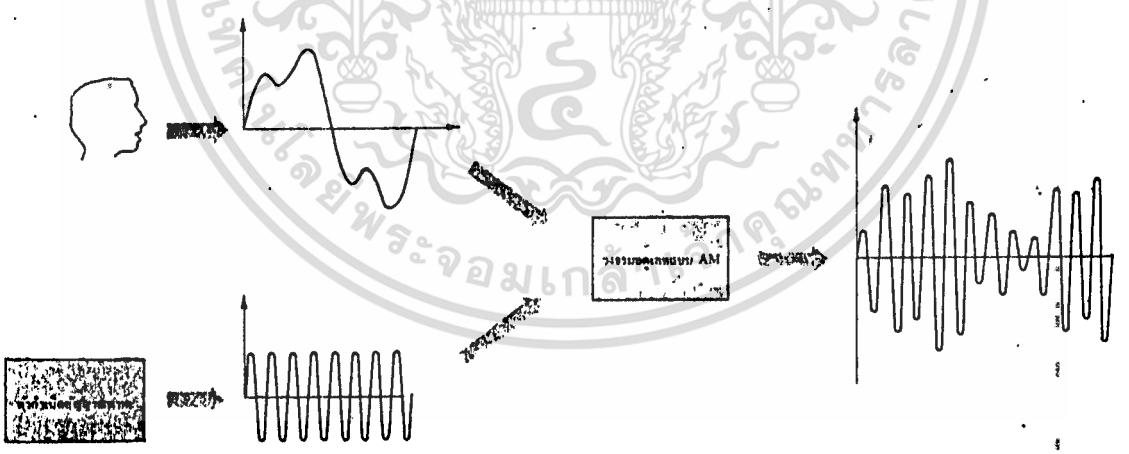
วิธีการมอดูเลทที่พบมากและนิยมใช้กันมากมีสองแบบคือ แบบแรกเป็นการรวมคลื่นสัญญาณความถี่เสียงกับสัญญาณพาหะแล้วเป็นผลทำให้เกิดสัญญาณใหม่ที่มีความถี่เท่าความถี่พาหะ แต่แอมปลิจูดของสัญญาณใหม่นี้จะเปลี่ยนแปลงไปกับแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียง การมอดูเลทแบบนี้เรียกว่า **การมอดูเลททางแอมปลิจูด** (amplitude modulation) อีกแบบหนึ่งเป็นการมอดูเลทโดยการรวมสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกันเกิดสัญญาณใหม่ที่มีความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปกับค่าแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียง การมอดูเลทเช่นนี้เรียกว่า **การมอดูเลททางความถี่** (FM-frequency modulatiou)

เสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนและเสียงเป็นสื่อทำความเข้าใจทางภาษาดังนั้นสัญญาณอิเลคทรอนิคส์ที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณเสียงจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการสื่อสาร เราอาจสงสัยว่าการเปลี่ยนสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นเสียงนั้นทำได้อย่างไร ไมโครโฟนเป็นสิ่งหนึ่งที่ได้พบเห็นและรู้จักและจากหลักการจากหลักการง่าย ๆ เราคงพอจะทราบแล้วว่า เสียงทำให้แผ่นไดอะแฟรมสั่นสะเทือนมีผลต่อการเปลี่ยนค่าทางไฟฟ้าสัญญาณไฟฟ้าออกมาและในทำนองเดียวกันลำโพงก็เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การมอดูเลททางแอมปลิจูด (Amplitude Modulation-AM)

ในการมอดูเลทแบบ AM นั้นเริ่มต้นเมื่อมีคนพูดหรือโพนโทรศัพท์จะเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในย่านความถี่เสียง สัญญาณความถี่เสียงนี้จะรวมกับสัญญาณความถี่พาหะในวงจร AM มอดูเลชั่นได้สัญญาณ AM เมื่อสังเกตที่ขอบด้านบนและด้านล่างของสัญญาณ AM จะพบว่าที่ขอบทั้งสองด้านนี้มีลักษณะสมมาตรกันและเหมือนกับสัญญาณความถี่เสียง แต่เมื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณความถี่เสียงขึ้นทั้งทางด้านจุดสูงสุดและต่ำสุด สัญญาณ AM จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตาม โดยส่วนต่ำสุดของขอบบนและส่วนสูงสุดของขอบล่างจะบีบเข้าหากัน ส่วนสูงของขอบบนและส่วนต่ำสุดของขอบล่างจะยิ่งออกห่างจากกัน แต่ถ้าเพิ่มสัญญาณเสียงมากขึ้นส่วนที่บีบเข้าหากันจะชิดกัน และถ้าเพิ่มมากกว่านี้ส่วนนี้จะกลายเป็นแถบเส้นตรงตามแนวแกน

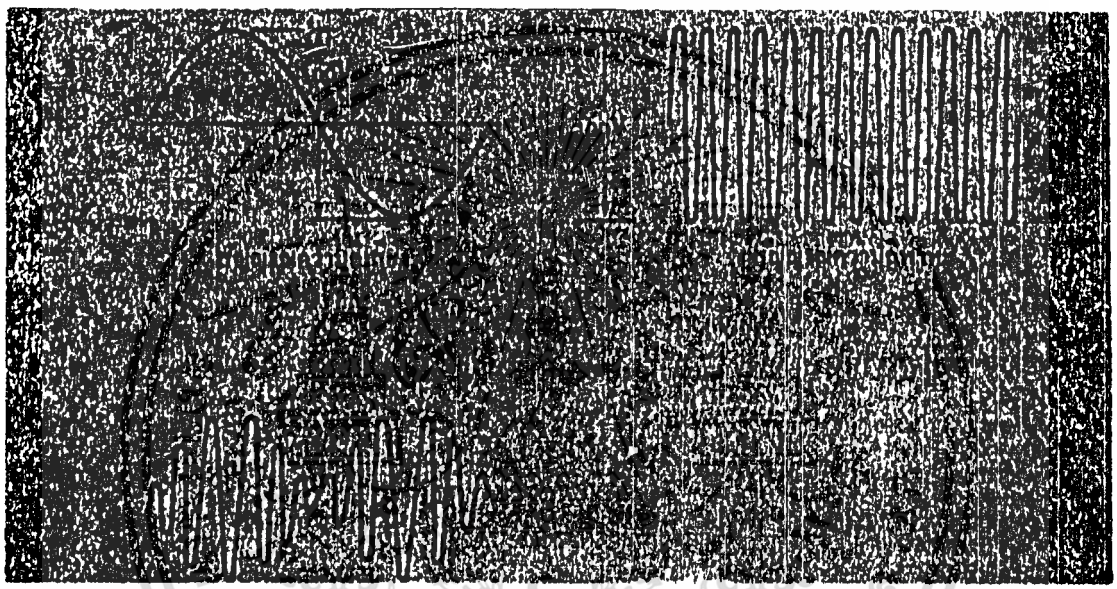


**รูปที่** การมอดูเลทสัญญาณทางแอมปลิจูด

ความสัมพันธ์ของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียงกับแอมปลิจูดของสัญญาณพาหะในขณะที่ยังไม่ได้มอดูเลทจะเป็นตัวบอกให้ทราบว่า ลักษณะของสัญญาณ AM ที่ได้จะมีรูปร่างลักษณะอย่างไร ค่าความสัมพันธ์นี้เรียกว่า **เปอร์เซ็นต์มอดูเลชั่น**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์เซนต์มอดูเลชั่น ก็คือค่าอัตราส่วนของสัญญาณความถี่เสียง กับ แอมปลิจูดของสัญญาณความถี่พาหะ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซนต์ ถ้าค่าทั้งสองนี้มีค่าเท่ากันก็กำหนดให้เป็น 100 % ในกรณีของเปอร์เซนต์



มอดูเลชั่นเป็น 100 % สัญญาณความถี่เสียงจะมีค่าทำให้สัญญาณ AM ทั้งทางด้านขอบบนและด้านล่างมาชนกันที่แกนกึ่งกลางพอดี หรือผลต่างของค่าต่ำสุดของขอบบนกับค่าสูงสุดทางด้านขอบล่างมีค่าเป็นศูนย์

ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียง มีค่าน้อยกว่าแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่พาหะ ค่าเปอร์เซนต์มอดูเลชั่นก็จะมีค่าน้อยกว่า 100 % ดังตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณความถี่เสียงมีแอมปลิจูดเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณพาหะ ค่าเปอร์เซนต์มอดูเลชั่นก็จะมีค่า 50 %

การหาค่าเปอร์เซนต์มอดูเลชั่นอาจหาได้โดยตรงจากสัญญาณ AM โดยการคำนวนหาตามสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซนต์มอดูเลชั่น} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times 100$$

เมื่อ $E_{max}$ คือค่าความสูงที่วัดจากระยะสูงสุดของขอบบนลงมา ถึงระยะต่ำสุดของขอบล่างของสัญญาณ AM

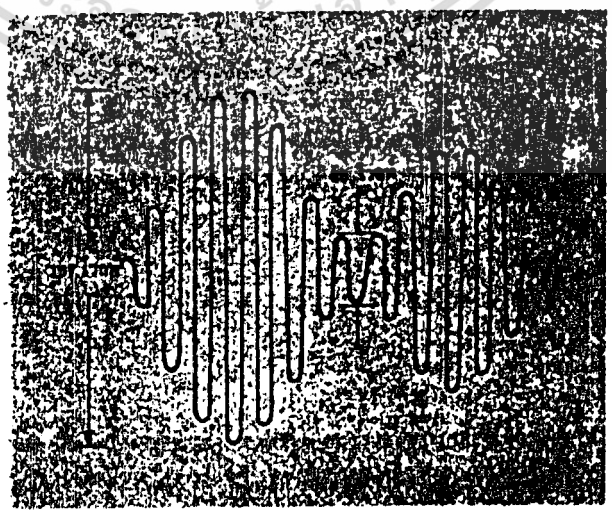
$E_{min}$ คือค่าความสูงที่วัดจากระยะต่ำสุดของขอบบนลงมา ถึงระยะสูงสุดของขอบล่างของสัญญาณ AM

ดังตัวอย่างการหาค่าเปอร์เซนต์การมอดูเลทจากรูปสัญญาณ AM จากรูปวัดหาค่า $E_{max}$ ได้ 167 รวลท์ และวัดค่า $E_{min}$ ได้ 33 รวลท์ ดังนั้น ค่าเปอร์เซนต์การมอดูเลทมีค่าเป็น

$$\text{เปอร์เซนต์การมอดูเลท} = \frac{167-33}{167+33} * 100$$

$$= 0.67 * 100$$

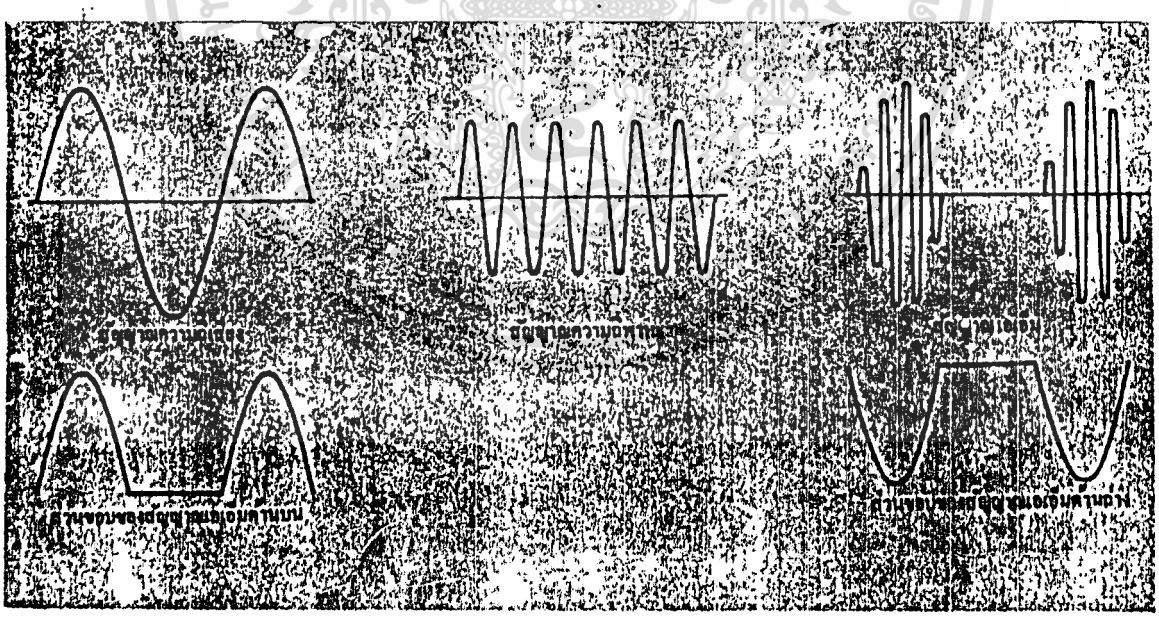
$$= 67\ \%$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการหาค่าดังกล่าวนี้สามารถหาค่าเปอร์เซนต์การมอดูเลทที่มีค่าไม่เกิน 100% เท่านั้น ถ้าเปอร์เซนต์มอดูเลทเกิดกว่า 100 เปอร์เซนต์ ซึ่งเรียกว่า **การมอดูเลทมากไป หรือ โอเวอร์มอดูเลท** (overmodulate) ไม่สามารถหาค่าเปอร์เซนต์การมอดูเลทได้ด้วยวิธีนี้ โดยปกติการมอดูเลทที่เกินกว่า 100% เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เพราะจะทำให้เกิดการเพี้ยนของสัญญาณที่จะใช้ในการสื่อสาร

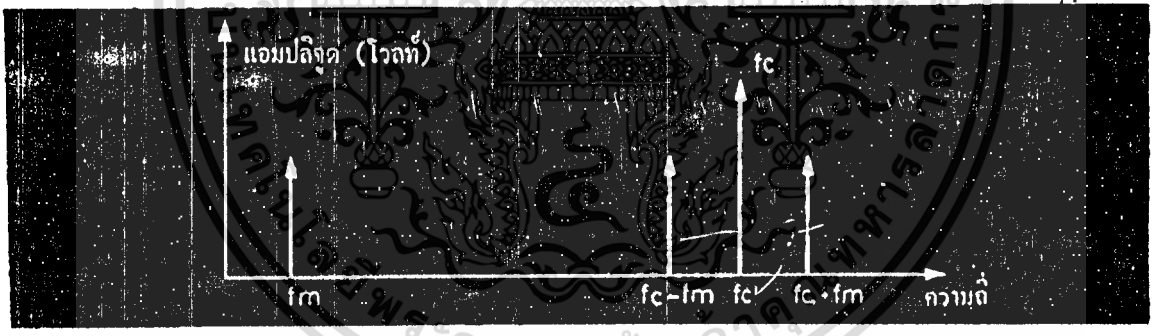
การเพี้ยนย่อมจะต้องเกิดขึ้นจากการโอเวอร์มอดูเลท ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 18.10 ถ้าแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียงมีค่ามากกว่าแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่พาหะส่วนที่สูงที่สุดทางด้านบนของสัญญาณ AM จะมีค่ามากกว่าสองเท่าของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่พาหะ แต่ส่วนที่สุดทางขอบบนจะลดลงมาถึงจุดกึ่งกลางของสัญญาณ AM แล้วจะลดลงอีกไม่ได้แล้ว จึงปรากฏออกมาในลักษณะที่เห็นดังรูปซึ่งส่วนนี้จะเป็นผลทำให้ขอบของสัญญาณ AM เกิดการเพี้ยนไปจากสัญญาณความถี่เสียง



รูป สัญญาณ AM เมื่อเกิดโอเวอร์มอดูเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

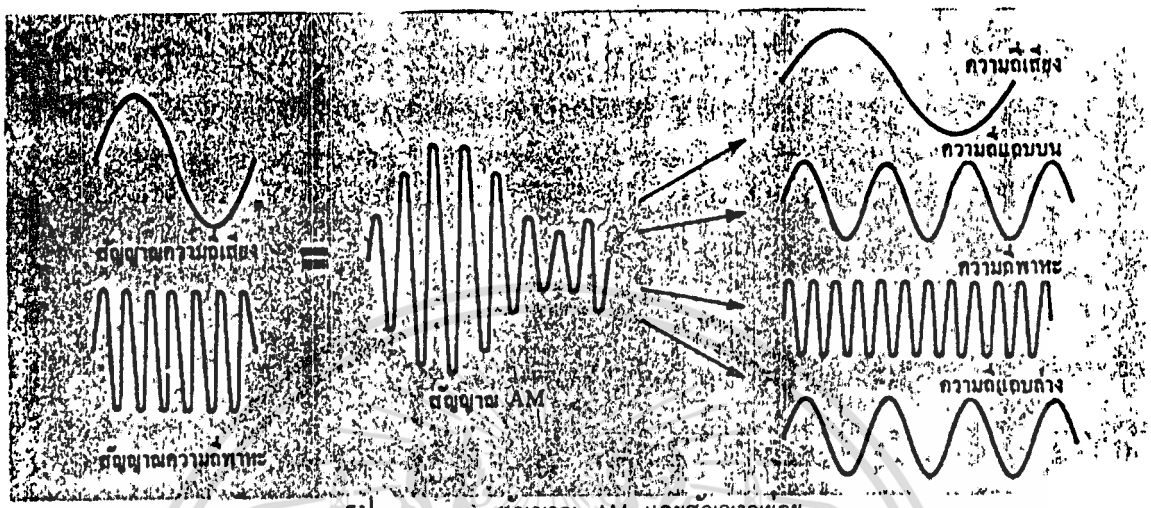
เราคงให้ความสนใจในสัญญาณ AM ในการที่จะนำมาใช้เป็นสัญญาณส่งออกอากาศเพื่อการสื่อสาร ในบทนี้เราได้ทราบถึงว่าสัญญาณใด ๆ ก็ดีย่อมต้องมีส่วนย่อยของสัญญาณรูปซายน์หลาย ๆ สัญญาณรวมอยู่ นักคณิตศาสตร์ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณ AM แล้วปรากฏว่า ถ้าให้สัญญาณความถี่เสียงเป็นสัญญาณความถี่รูปซายน์และสัญญาณพาหะก็เป็นรูปซายน์ด้วย สัญญาณ AM ที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลทด้วยคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดส่วนย่อยของสัญญาณหลายส่วนบนอยู่ นักคณิตศาสตร์ได้พิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วปรากฏว่าจะประกอบด้วย ความถี่เท่ากับสัญญาณเสียงหนึ่งสัญญาณ ความถี่เท่ากับสัญญาณพาหะหนึ่งสัญญาณ ความถี่เท่ากับผลบวกและผลต่างของความถี่ของสัญญาณพาหะกับสัญญาณความถี่เสียงอีกอย่างละหนึ่งสัญญาณ และถ้าสมมุติว่าให้ $f_m$ เป็นความถี่สัญญาณเสียง $f_c$ เป็นความถี่สัญญาณพาหะ เราเขียนสเปคตรัมของสัญญาณ AM ได้ดังนี้




รูป สเปคตรัมของสัญญาณ AM

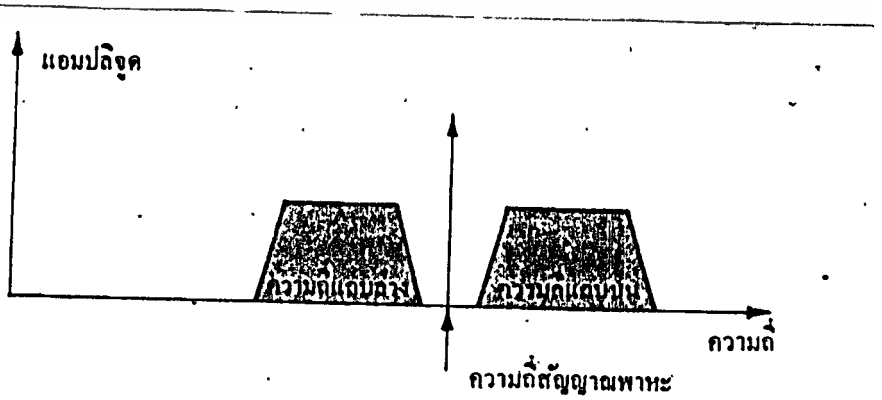
โดยปกติความถี่สัญญาณเสียงจะมีค่าต่ำกว่าความถี่สัญญาณพาหะมาก ดังนั้นความถี่ผลบวกและผลต่าง ระหว่างสัญญาณความถี่พาหะกับความถี่สัญญาณเสียง จึงปรากฏบนสเปคตรัมของสัญญาณใกล้กับความถี่พาหะมาก และถ้าสัญญาณความถี่เสียงมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 20 เฮิรทซ์ ถึง 20,000 เฮิรทซ์ จึงทำให้ความถี่ที่ปรากฏข้างความถี่พาหะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ความถี่ทั้งสองนี้จึงมีผู้ให้ชื่อไว้ว่าเป็น **ความถี่ไซด์แบนด์** หรือ **ความถี่แถบข้าง** ส่วนของความถี่ที่เป็นผลบวก ($f_c$ - $f_m$) ก็เรียกว่า **ความถี่แถบล่าง** (Lower sideband) หรือ LSB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป สัญญาณ AM และสัญญาณย่อย

เพื่อให้เข้าใจในเรื่องความถี่ย่อยของสัญญาณ AM ดีขึ้น จึงขอยกตัวอย่าง โดยสมมุติว่า เมื่อนำเอาความถี่ของสัญญาณความถี่เสียงที่เป็นคลื่นรูปซายน์ความถี่ 1 กิโลเฮิรทซ์มามอดูเลทแบบ AM กับสัญญาณพาหะ 100 กิโลเฮิรทซ์ ผลของสัญญาณที่มอดูเลทเมื่อนำมาแยกความถี่ดูจะพบว่า สัญญาณ AM ประกอบด้วยสัญญาณที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรทซ์ 99 กิโลเฮิรทซ์และ101 กิโลเฮิรทซ์ ความถี่ 99 และ 101 กิโลเฮิรทซ์ เรียกว่าความถี่แถบข้าง ถ้าสมมติว่าสัญญาณความถี่เสียงจะเปลี่ยนแปลงจาก 20 เฮิรทซ์ ถึง 20000 เฮิรทซ์ ความถี่แถบข้างสามารถเขียนเสปคตรัมได้ดังนี้




รูป แสดงสเปคตรัมแถบความถี่ในสัญญาณ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การดีมอดูเลทสัญญาณ AM

การดีมอดูเลทสัญญาณ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **การดีเทคชั่น** (detection) คือวิธีการแยกเอาสัญญาณเสียงหรือสัญญาณข้อมูลข่าวสารกลับคืนมาจากสัญญาณ AM ตามที่ทราบแล้วว่าสัญญาณ AM จะยังมีสัญญาณความถี่เสียงประกอบอยู่ และถ้าพิจารณาดูที่รูปของสัญญาณ AM เราจะเห็นว่าส่วนเปลี่ยนแปลงทางด้านแอมปลิจูดหรือที่ขอบของสัญญาณนั้นจะเหมือนกับรูปร่างลักษณะสัญญาณเสียงมาก

**การดีเทคชั่น** ก็คือการนำเอาสัญญาณ AM ผ่านวงจรที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณเสียงหรือสัญญาณข่าวสารออก วิธีการดีเทคชั่นที่ใช้กันทั่วไปคือการตัดสัญญาณเพียงครึ่งใดครึ่งหนึ่งแล้วนำมาผ่านวงจรกรองความถี่

**รูป การดีเทคสัญญาณ**

เอาความถี่พาหะหรือความถี่ที่สูงมากออกซึ่งก็ปรากฏเป็นสัญญาณที่เหมือนกับสัญญาณที่ขอบของสัญญาณ AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของการมอดูเลทและการดีเทคแบบสัญญาณ AM คือสัญญาณ AM ถูกรบกวนได้ง่ายจากสิ่งต่าง ๆ เช่น ฟ้าร้อง ฟ้าผ่าในเวลาเกิดพายุฝน คลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่คล้ายคลึงกันจะถูกสอดแทรกได้โดยง่าย แม้แต่จากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสิ่งเหล่านี้จะเกิดขึ้นแบบเดียวกับการมอดูเลท และจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณ AM และผ่านการดีเทคสัญญาณไปพร้อมกับคลื่น AM หลังจากที่ผ่านการดีเทคไปแล้วก็จะเกิดปรากฏออกมาในรูปเสียงหรือคลื่นที่ผิดรูปไป ซึ่งถ้ามีความแรงพอมันจะคลอบคลุมสัญญาณข่าวสารที่ต้องการเสียหมด ทำให้สัญญาณที่ต้องการจากการดีเทคไม่เกิดขึ้น วิธีที่จะกำจัดการรบกวนหรือการสอดแทรก คือหาวิธีอื่นแทนวิธีการมอดูเลททางวิธีที่มีคุณสมบัติป้องกันการสอดแทรกได้ดีวิธีหนึ่ง คือ **การมอดูเลททางความถี่**

## 3.6 การมอดูเลททางความถี่

ในการมอดูเลททางความถี่ (FM) แอมปลิจูดของคลื่นพาหะจะไม่มีผลหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นพาหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยความถี่จะเกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ที่เอามาผสมความถี่ของความถี่ของคลื่นพาหะขณะที่ยังไม่มีการผสม เรียกว่า **ความถี่กึ่งกลาง** (center frequency)

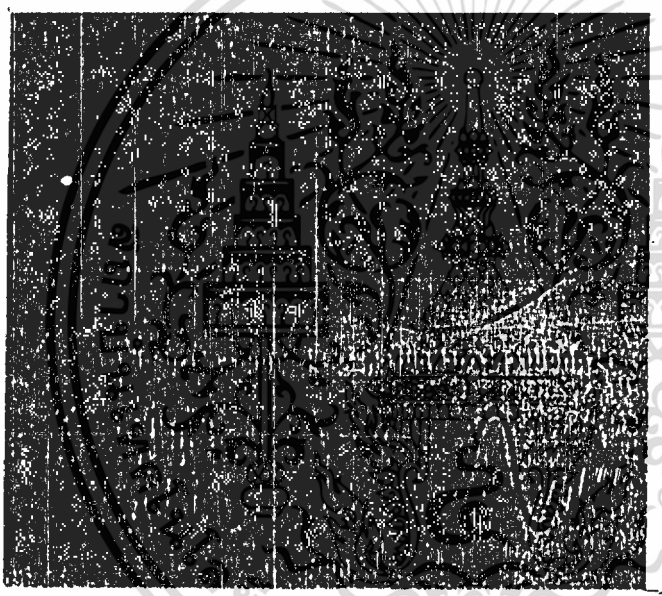
เมื่อแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียงมีขนาดเพิ่มขึ้น ทางบวกจะทำให้ความถี่ของคลื่นพาหะเพิ่มขึ้นและถ้าสัญญาณความถี่เสียงลดลง ความถี่ของคลื่นพาหะก็จะลดลงจดกระทั่งสัญญาณความถี่เสียงลดลงถึงศูนย์ ความถี่ของคลื่นพาหะก็จะเป็นความถี่กึ่งกลาง

ในทำนองเดียวกัน เมื่อสัญญาณที่ต้องการผสมเป็นลบ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะก็จะลดลงถึงจุดต่ำสุด ความถี่คลื่นพาหะจะเป็นความถี่กึ่งกลางอีกครั้งก็ต่อเมื่อสัญญาณความถี่เสียงผ่านครึ่งไซเคิลบวกไปถึงศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงเห็นแล้วว่าความถี่ของคลื่น FM จะเปลี่ยนแปลงไปโดยจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความถี่กึ่งกลางขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่เสียง

ความถี่ของคลื่นสัญญาณ FM ที่แตกต่างจากความถี่กึ่งกลางมากที่สุดเรียกว่า **ความถี่บ่ายแบนสูงสุด**



สัญญาณ FM

ของคลื่นพาหะ (maximum frequency deviation of carrier) โดยจะประกอบด้วยความถี่ที่บ่ายเบนไปจากความถี่กึ่งกลางลงไปทางน้อยกว่า หรือไปในทางบ่ายเบนจากความถี่กึ่งกลางในทางมากกว่า

ตัวอย่างเช่นคลื่นสัญญาณเสียงที่ต้องการจะมอดูเลทกับคลื่นพาหะที่มีความถี่ 100 MHz เมื่อมอดูเลทแล้วจะทำให้เกิดคลื่นสัญญาณ FM มีความถี่ทางต่ำสุดเท่ากับ 99.99 MHz และมีความถี่ทางสูงสุดเท่ากับ 100.01 MHz ดังนั้นความบ่ายเบนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

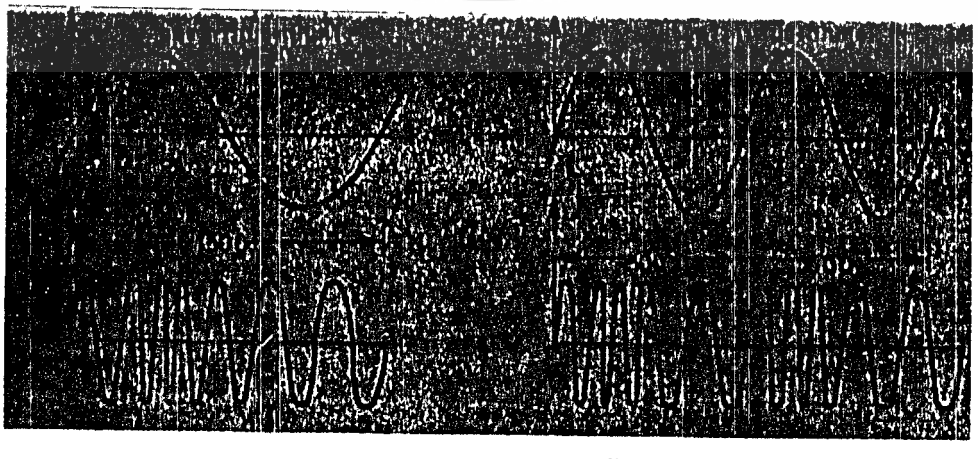
สุดในกรณีนี้จะเท่ากับ 50 KHz

จะเห็นได้ว่าความถี่เบี่ยงเบนจะเป็นตัวบอกแอมปลิจูดของสัญญาณที่เรานำมามอดดูเลทคือถ้ามีแอมปลิจูดมากจะทำให้ค่าความถี่เบี่ยงเบนมีค่ามากด้วย

นอกจากนี้สิ่งที่ควรจะทำความเข้าใจอีกประการหนึ่งคือ ค่าอัตราการเบี่ยงเบนความถี่ ค่าอัตราการเบี่ยงเบนทางความถี่ (rate of frequency deviation) เป็นตัวบอกให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ครบหนึ่งรอบเร็วเพียงใด ทั้งนี้เพราะเมื่อสัญญาณความถี่เสียงเปลี่ยนแอมปลิจูดไปครบ 1 รอบ สัญญาณ FM ก็จะเปลี่ยนตามไปครบ 1 รอบด้วย ถ้าค่าอัตราการเบี่ยงเบนสูงก็แสดงว่าความถี่ของสัญญาณเสียงสูง ดังนั้นค่าอัตราการเบี่ยงเบนจึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณความถี่เสียง

เสียงที่เกิดจากคลื่น FM นั้นจะมีความดังหรือค่อยแปรผันตามค่าความถี่ของสัญญาณ FM ส่วนระดับเสียงสูงต่ำนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราสของการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM ซึ่งอัตราการเบี่ยงเบนทางความถี่ของคลื่น FM จะแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของสัญญาณความถี่เสียงนั่นเอง

ในการสร้างคลื่น FM นั้นผลจะทำให้เกิดความถี่หลาย ๆ ความถี่เช่นเดียวกับเรื่องของสัญญาณ AM แต่ความแตกต่างระหว่างความถี่แถบข้างของระบบ AM และ FM คือในระบบ AM จะมีความถี่แถบข้างเกิดขึ้น



เพียงสองความถี่เท่านั้นความถี่หนึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของความถี่พาห์กับความถี่สัญญาณเสียง และอีกความถี่หนึ่งจะมีค่าเท่ากับผลต่างของความถี่ทั้งสอง ส่วนในระบบ

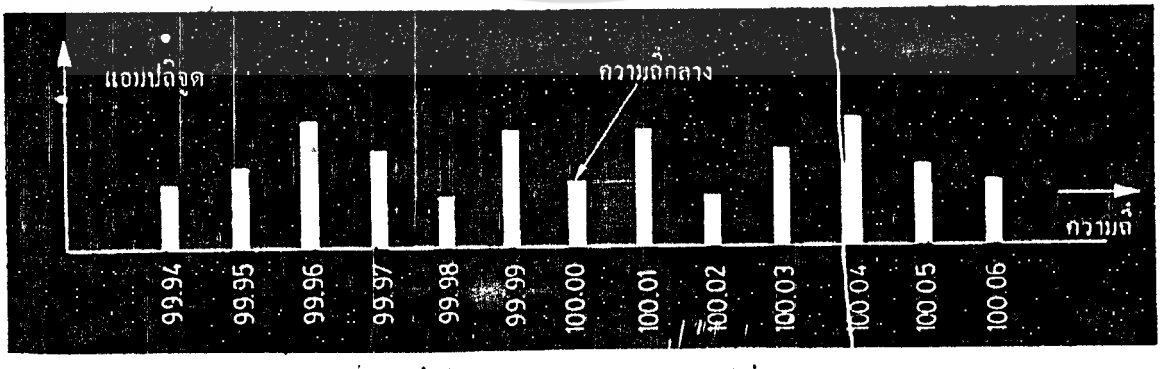
เอกสารนี้เป็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ใช้เอกสารนี้เพื่อการค้า

FM ความถี่แถบข้างจะเกิดขึ้นมากมายนอกเหนือไปจากที่มีในระบบ AM

เช่นตัวอย่าง ถ้านำเอาสัญญาณพาหะมีความถี่ 1 MIIz ไปมอดูเลทกับสัญญษณเสียงที่มีความถี่ 10 kHz จะได้ความถี่แถบข้างมีค่าเท่ากับ 1010 kHz และ 990 kHz นอกจากนี้ยังมีความถี่ 1020 และ 980 kHz และ 980 kHz และความถี่อื่น ๆ อีกมากที่ถูกสร้างขึ้นมา

จำนวนความถี่ที่อยู่ในแถบข้างบนนี้จะขึ้นอยู่กับ ค่าแอมปลิจูดและความถี่ของสัญญาณความถี่เสียง ถ้าค่าแอมปลิจูดใหญ่มาก จำนวนของความถี่ในแถบข้างก็จะปรากฏมีมากด้วย

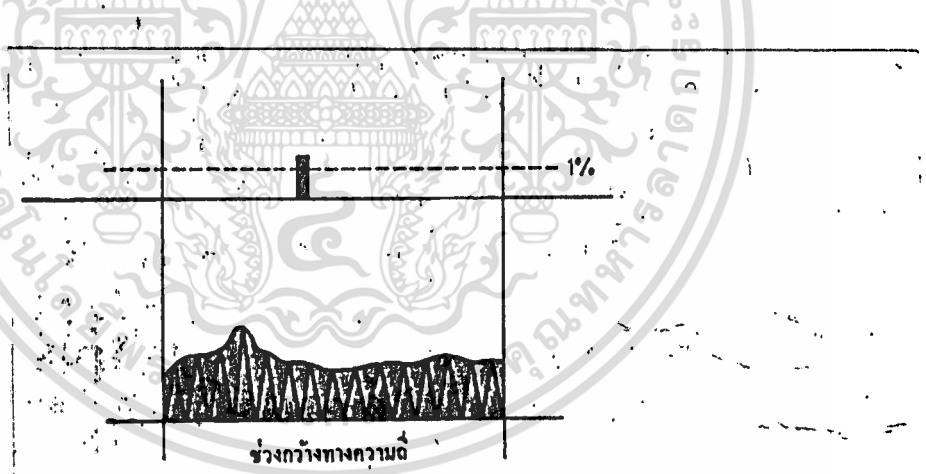
ใน FM มีส่วนที่แตกต่างจากของ AM คือ แถบความถี่ด้านข้างของ AM ค่าแอมปลิจูดของความถี่เหล่านี้อยู่พลังงานจะถูกบรรจุอยู่ในนั้น และจะเป็นอิสระต่อสัญญาณพาหะ ส่วนใน FM แถบความถี่ข้างทำให้เกิดกำลังงานจากพาหะ ซึ่งหมายความว่าส่วนของคลื่นพาหะมีกำลังน้อยกว่า หรือแอมปลิจูดเล็กกว่าเมื่อก่อนจะมอดูเลท จำนวนของกำลังงานที่เอาไปจากพาหะไปไว้ในแถบความถี่ข้างนั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณความถี่เสียงและการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ ดังนั้นถ้าพาหะมีกำลังงานเท่ากับศูนย์แถบความถี่ก็จะมีค่ากำลังงานเท่ากับศูนย์ด้วยเช่นกัน หรือสรุปได้ว่าพลังงานที่อยู่ในบริเวณแถบข้างนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของพลังงานที่ความถี่คลื่นพาหะ




เมื่อสัญญาณความถี่เสียง 10 kHz มอดูเลททางความถี่ กับสัญญาณ 100 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างบนเราคงพอเห็นแล้วว่า แถบความถี่แถบข้างของคลื่น FM แตกต่างจาก AM และแอมปลิจูดของความถี่เหล่านี้จะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอยู่อย่างต่อเนื่องด้วย แต่อย่างไรก็ดีเพื่อหาช่วงกว้างของแถบความถี่นี้ จำเป็นจะต้องกำหนดว่าจุดความถี่ใดจึงจะเป็นจุดที่ยังบอกเขตของความถี่ FM ทั้งนี้เพราะความถี่ที่เกิดขึ้นที่แถบด้านข้างจะมีจำนวนมากมายจนไม่สามารถกล่าวถึงได้หมด แต่ตามมาตรฐานสากลจะสนใจความถี่ของสัญญาณที่อยู่ในแถบด้านข้างที่มีค่ามากกว่า 1 เปอร์เซนต์ของสัญญาณความถี่เสียงความถี่ที่เราให้ความสนใจแถบความถี่ตัวสุดท้ายนี้ เรียกว่า **ความถี่แถบข้างปลายบนและความถี่แถบข้างปลายล่าง** (extreme Lower sideband frequency)



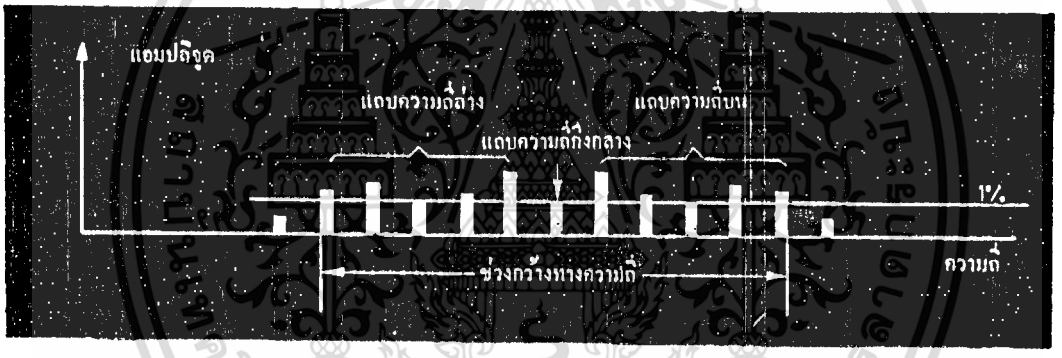

ดังนั้นค่าช่วงกว้างของคลื่น FM ก็คือช่วยของความถี่ระหว่างความถี่แถบข้างปลายบนและความถี่แถบข้างปลายล่าง ช่วงกว้างทางความถี่ของคลื่นสัญญาณ FM จึงมีค่ามากกว่าคลื่นสัญญาณ AM

ตัวอย่างเช่น ความถี่ของสัญญาณเสียง 1 kHz เมื่อมอดูเลทกับคลื่นพาหะที่ความถี่ 100 kHz จะให้ความถี่แถบข้างเป็น 99 kHz และ 101 kHz ดังนั้นช่วงกว้างของความถี่ (Band width) จะเท่ากับ 2 kHz แต่ถ้าคลื่น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kHz นี้ไปมอดูเลททางความถี่กับคลื่นสัญญาณพาหะ 100 kHz จะปรากฏความถี่แถบข้างจำนวนหลายความถี่ เช่น 99 kHz และ 101 kHz, 98 kHz และ 120 kHz ฯลฯ จะเห็นว่าช่วงกว้างของความถี่ (band width) ของคลื่น FM จะมีค่ามากกว่าช่วงกว้างทางความถี่ของคลื่น AM

เมื่อคลื่นสัญญาณ FM มีช่วงความถี่มาก ๆ เราเรียกคลื่นสัญญาณ FM นั้นว่าเป็นชนิดแถบกว้าง (wide band) และ FM ชนิดนี้ต้องการคลื่นพาหะที่มีความสูงมาก ๆ มิฉะนั้นจะเกิดการสอดแทรกกับสถานีใกล้เคียงได้




โดยปกติเราสามารถทำให้คลื่นสัญญาณ FM มีช่วงกว้างทางความถี่เหมือน AM ได้โดยการกำจัดค่าการเบี่ยงเบนสูงสุดของ FM ลง เราเรียกสัญญาณ FM ชนิดนี้ว่าสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ (narrow band FM) แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดการเพี้ยนได้มาก

ช่วงกว้างทางความถี่ของสัญญาณ FM สามารถนำไปดัดแปลงใช้ประโยชน์ได้คือ

1. เพื่อใช้หาความยาวของเสาอากาศ หรือ ขนาดของห้อง หรือ ความยาวของการสะท้อนของคลื่น

2. เพื่อใช้หาความกว้างของช่วงคลื่น เพื่อให้วงจรอิเลคทรอนิคส์ของเครื่องรับทำงานได้ตลอดช่วงความถี่ของสัญญาณ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

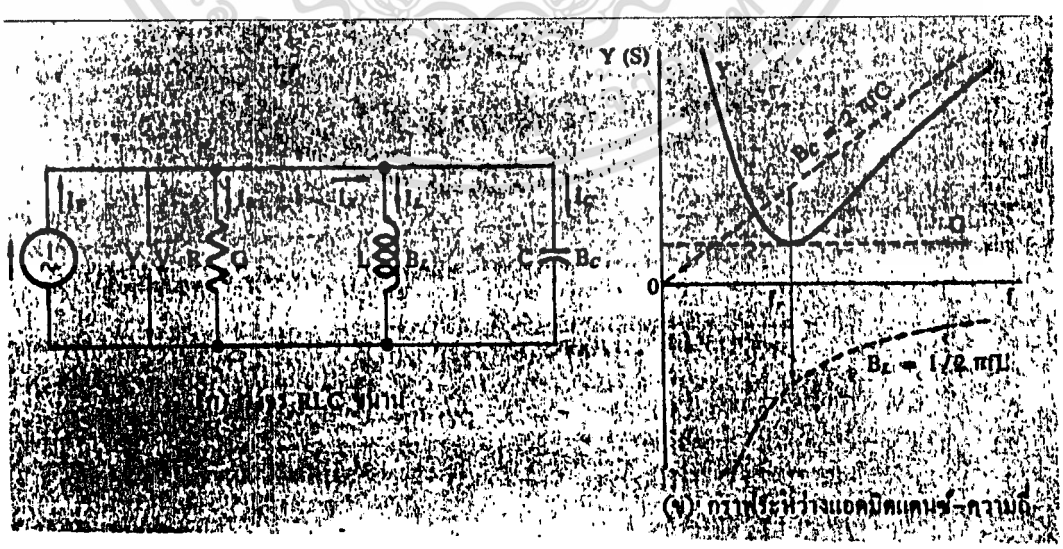
## วงจรรีโซแนนซ์

### บทนำ

วงจรไฟสลับที่เกิดสภาวรีโซแนนซ์หรือวงจรไฟสลับที่เรียกว่า วงจรรีโซแนนซ์นั้น หมายถึงวงจรที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ กระแสที่ไหลในวงจรจะอินเฟสกับแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจรหรือจะกล่าวในอีกทางหนึ่งก็คือ ในขณะที่เกิดรีโซแนนซ์นั้น ค่าอิมพีแดนซ์เทียบเท่าภายในวงจร จะเหลือแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวกันเท่านั้น เพราะค่าอินดัคตีพรีแอคแตนซ์และค่าคาปาซิตีพ รีแอคแตนซ์จะตะหักล้างกันหมดไป

อย่างไรก็ดี การพิจารณาและการคำนวณเกี่ยวกับวงจรรีโซแนนซ์ในบทนี้นั้น เราจะศึกษาในลักษณะขั้นพื้นฐานเท่านั้น ซึ่งจะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะ กล่าวคือ วงจรรีโซแนนซ์อนุกรมและวงจรรีโซแนนซ์ขนาน

### 4 วงจรรีโซแนนซ์




วงจร RLC อนุกรมดังในรูปที่ 4.14.1 (ก) จะพิจารณาเห็นได้ว่าวงจรจะไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะรีโซแนนซ์ได้ก็ต่อเมื่อ $X_L = X_C$ การทำให้ค่า $X_L = X_C$ สามารถกระทำได้ 3 วิธีด้วยกัน กล่าวคือ ปรับค่า L ในวงจร หรือปรับค่า C ในวงจร หรือปรับค่าความถี่ f ภายในวงจรอย่างใดอย่างหนึ่ง และในขณะที่เกิดรีโซแนนซ์นั้น ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะน้อยที่สุด นั่นคือ จะมีกระแสไหลในวงจรมากที่สุดนั่นเอง

จากวงจรในรูปที่ 4.1 (ก) จะได้

$$Z = R^2 + X^2_t = R^2 = (X_L - X_C)^2$$

เมื่อวงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์จะได้เพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือค่าอิมพีแดนซ์ Z ของวงจร จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน R ภายในวงจรเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่วนค่ารีแอคแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไป

ดังนั้น จะได้ $Z = R$ และ $Z_r = X_L - X_C = 0$

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$f^2_r = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

จะได้ $$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ในที่นี้ $f_r$ = ความถี่รีโซแนนซ์, Hz

L = อินดัคแตนซ์, H

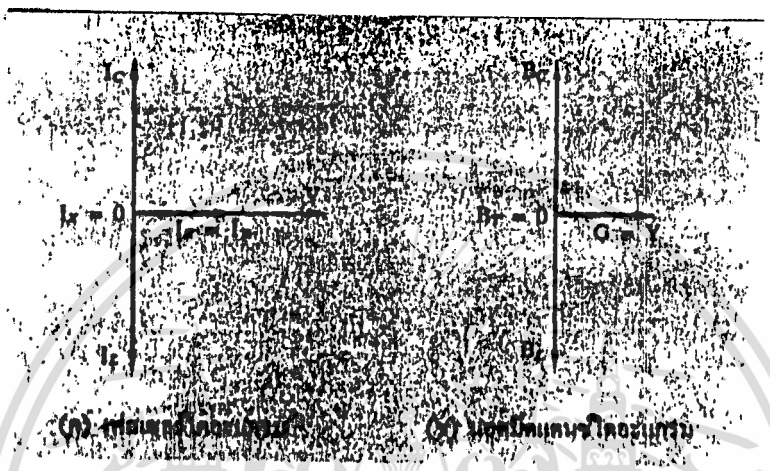
C = ค่าปาซิแตนซ์, F

นั่นคือ ในวงจรรีโซแนนซ์อนุกรมที่ประกอบด้วย RLC ต่ออนุกรมกัน จะได้ค่าความถี่รีโซแนนซ์เท่ากับ $1/2\pi\sqrt{LC}$

ส่วนในรูปที่ 4.1 (ข) แสดงให้เห็นถึงกราฟของความต้านทาน R} อินดัคตีฟรีแอคแตนซ์ $X_L$, คาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์ $X_C$ และอิมพีแดนซ์ Z ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนเทียบกับค่าของความถี่ f ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ณ ความถี่รีโซแนนซ์ $f_r$ จะได้ค่า $X_L = X_C$ และมีทิศทางตรง



ข้ามกันด้วย ดังนั้นค่า $X_L$ กับ $X_C$ จึงหักล้างกันหมดไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z ของวงจรมีค่าน้อยที่สุดคือมีค่าเท่ากับค่าของความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้น นั่นคือ ในขณะเกิดรีโซแนนซ์จะมีกระแสไหลในวงจรมากที่สุด

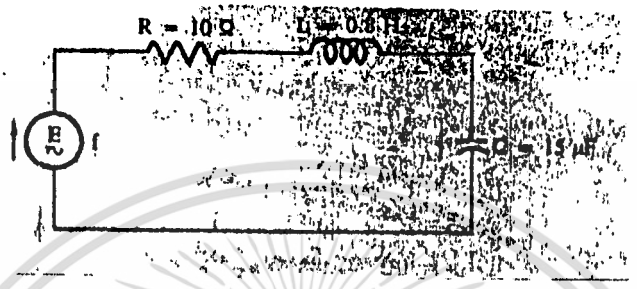
ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรม และอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของวงจรในขณะเกิดรีโซแนนซ์นั้น จะเขียนได้ดังในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RLC อนุกรมในรูปที่ 27-2 (ก)จะเห็นว่าในขณะที่วงจรเกิดรีโซแนนซ์นั้น จะได้ค่า $V_L = V_C$ และมีทิศทางตรงข้ามกันด้วย ดังนั้น ค่าของแรงดันที่ตกคร่อมค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรคือ $V_X$ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V_X = V_L - V_C$ เมื่อ $V_L$ มากกว่า $V_C$ และ $V_X = V_C - V_L$ เมื่อ $V_C$ มากกว่า $V_L$) และทำให้ได้แรงดัน $V_R = E$

ส่วนในรูปที่ 4.2 (ข) จะเห็นว่า เราไม่สามารถที่จะเขียนอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมให้อยู่ในรูปของสามเหลี่ยมได้ ทั้งนี้เพราะค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรหักล้างกันหมดไป ($X_r = X_L - X_C = 0$) จึงเหลือแต่ค่าความต้านทาน R เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงได้ $Z = R$

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

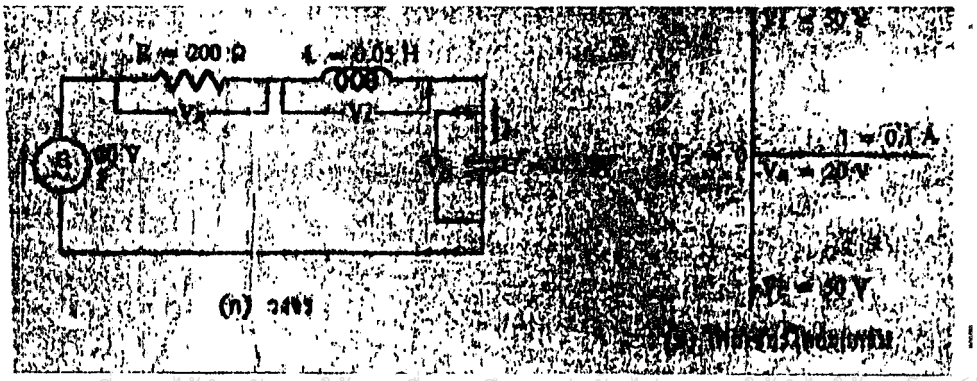
**ตัวอย่างที่ 4.1** วงจร RLC อนุกรมดังในรูปที่ 4.3 จงหาค่าความถี่รีโซแนนซ์




วิธีทำ $$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times3.14\sqrt{0.8\ H\times15\times10^{-6}H}}$$

$$= \frac{1}{2\times3.14\times10^{-3}\times3.464}\ HZ = 46\ HZ$$

**ตัวอย่างที่ 4.2** วงจร RLC อนุกรมดังในรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ จงหาค่า (ก)ความถี่ (ข) อินดัคตีฟและคาปาซิตีฟรีแอคแตนซ์ (ค)อิมพีแดนซ์ของวงจร (ง) กระแสที่ไหลในวงจร (จ) แรงดันตกคร่อมที่ R, L และ (ฉ) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีทำ** (ก) เมื่อวงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์จะได้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times 3.14\sqrt{0.05\ H\times 0.2\times 10^{-6}F}}$$

$$= \frac{1}{2\times 3.14\times 0.1\times 10^{-3}}HZ = 1592.357\ HZ$$

(ข) $X_L = 2\pi f_r L = 2\times 3.14\times 1592.375\ HZ\times 0.05H$

$= 500\,\Omega$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_r C} = \frac{1}{2\times 3.14\times 1592.357\ HZ\times 0.2\times 10^{-6}F}$$

$= 500\,\Omega$

(ค) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

$= \sqrt{(200\quad)^2 + (500\Omega - 500\Omega)^2} = 200$

(ง) $I = \frac{E}{Z} = \frac{20\ V}{200\,\Omega} = 0.1\ A$

(จ) แรงดันตกคร่อมที่ R, L และ C คือ $V_R$, $V_L$ และ $V_C$ ตามลำดับ

$V_R = IR = 0.1\ A*200\,\Omega = 20\ V$

$V_L = IX_L = 0.1\ A*500\,\Omega = 50\ V$

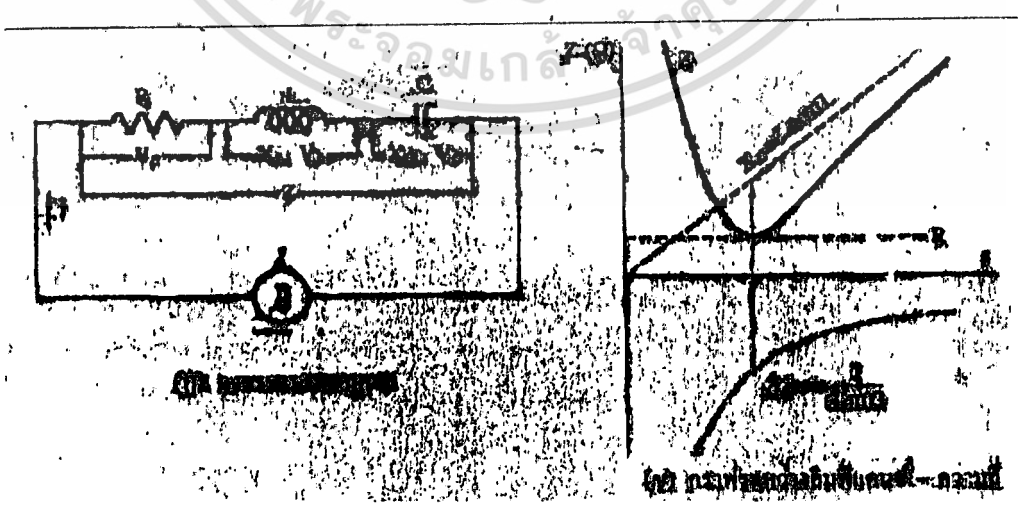
$V_C = IX_C = 0.1\ A*500\,\Omega = 50\ V$

(ฉ) เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่เขียนได้ แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 27-4 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1 วงจรรีโซแนนซ์ขนาน

วงจร RLC ขนานดังในรูปที่ 4.6 (ก) เมื่อจ่ายแหล่งกำเนิดกระแสที่มีค่าคงที่ให้กับวงจร จะพิจารณาเห็นได้ว่า วงจรจะเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ได้ก็ต่อเมื่ออินดัคตีฟ ซัซเซพแตนซ์มีค่าเท่ากับคาปาซิตีฟซัซเซพแตนซ์ หรือ $B_L = B_C$ นั่นคือ กระแส $I_L$ จะมีค่าเท่ากับกระแส $I_C$ แต่มีทิศทางตรงข้ามกันและในขณะเกิดรีโซแนนซ์นั้น ค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรจะน้อยที่สุด หรือค่าอิมพีแตนซ์ของวงจรจะมากที่สุดกล่าวคือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรจะมีค่าความนำ G ของวงจรเพียงอย่างเดียวเท่านั้นส่วนค่าซัซเซพแตนซ์ของวงจรจะหักล้างกันหมดไป จึงทำให้กระแสในวงจรไหลผ่านค่าความนำ G (หรือความต้านทาน R) เพียงตัวเดียวเท่านั้น นั่นคือ จะมีกระแสไหลผ่านความนำ G (หรือความต้านทาน R) มากที่สุดคือมีค่าเท่ากับค่าของกระแส $I_r$ ที่จ่ายให้แก่วงจรนั่นเอง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความนำ G (หรือความต้านทาน R) สูงสุดด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 27-6 (ก) จะได้

$$Y = G^2 + B^2_T = G^2 + (B_L - B_L - B_C)^2$$

เมื่อวงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ จะได้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรจะมีเท่ากับค่าความนำ G ภายในวงจรเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่วนค่าซัซเซพแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไป นั่นคือ

$$Y = G$$

และ $B_T = B_L - B_C = 0$

หรือ $B_L = B_C$

จะได้ $$\frac{1}{2\pi f_r L} = 2\pi f_r C$$

$$f^2_r = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

$$f^2_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ในที่นี้ $f_r$ = ความถี่รีโซแนนซ์, Hz

$L$ = อินดัคแตนซ์, H

$C$ = คาปาซิแตนซ์, F

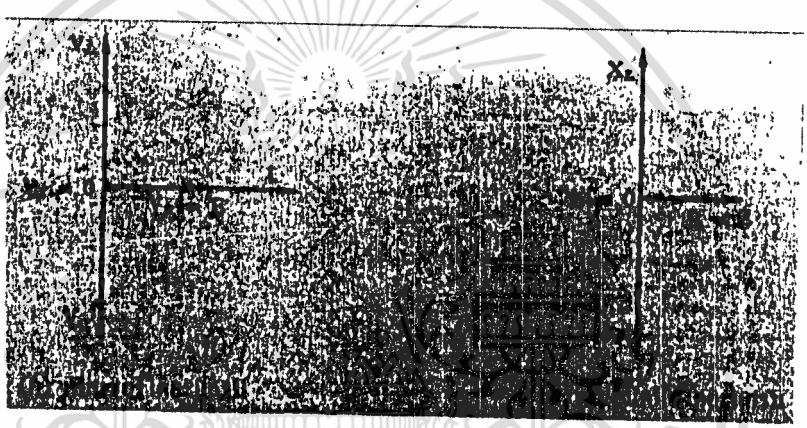
จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าความถี่รีโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนานจะมีค่าเท่ากับค่าความรีโซแนนซ์ของวงจร RLC อนุกรม คือมีค่าเท่ากับ $1/2\pi\sqrt{LC}$

ส่วนในรูปที่ 27-6 (ข) แสดงให้เห็นถึงกราฟของความนำ G, อินดัคตีพซัซเซพแตนซ์ $B_L$, คาปาซิตีพ ซัซเซพแตนซ์ $B_C$ และแอดมิตแตนซ์ Y ของวงจรเมื่อเขียนเทียบกับค่าความถี่ f ที่เปลี่ยนแปรไป ซึ่งจะเห็นว่า ณ ความถี่รีโซแตนซ์ $f_r$ จะได้ค่า $B_L = B_C$ และมีทิศทางตรงข้ามกันด้วย ดังนั้นค่า $B_L$ กับ $B_C$ จึงหักล้างกันหมดไป ทำให้ค่าแอดมิตแตนซ์ Y ของวงจรมีค่าน้อยที่สุด คือมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเท่ากับค่าของความนำ G เท่านั้น และในขณะเกิดรีโซแนนซ์จะไม่มีกระแสไหลผ่านค่าซัซเซพแตนซ์ของวงจรแต่จะไหลผ่านเฉพาะค่าความนำ G เท่านั้น นั่นคือในขณะเกิดรีโซแนนซ์จะมีกระแสไหลผ่านค่าความนำ G (หรือความต้านทาน R) มากที่สุด

ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรมและแอดมิตแตนซ์นไดอะแกรมของวงจร ในขณะเกิดรีโซแนนซ์นั้นจะเขียนได้ดังในรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RLC ขนานในรูปที่ 4.7 (ก) จะเห็นว่าในขณะที่วงจรเกิดรีโซแนนซ์นั้น จะได้ว่า $I_L = I_C$ และมีทิศทางตรงข้ามกันด้วย ดังนั้นค่าของกระแสที่ไหลผ่านค่าซัซเซพแตนซ์ของวงจร คือ $I_X$ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($I_X = I_L - I_C$ เมื่อ $I_L$ มากกว่า $I_C$ และ $I_X = I_C - I_L$ เมื่อ $I_C$ มากกว่า $I_C$) และทำให้ได้กระแส $I_R = I_r$

ส่วนแอดมิตแตนซ์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.7 (ข) จะเห็นว่า เราไม่สามารถที่จะเขียนแอดมิตแตรซ์ไดอะแกรมให้อยู่ในรูปของสามเหลี่ยมได้ ทั้งนี้ เพราะค่าซัซเซพแตนซ์ของวงวจรหักล้างกันหมดไป ($B_T = B_L - B_C = 0$) จึงเหลือแต่ค่าความนำ G เพียงอย่างเดียวกันเท่านั้น และจะได้ $Y = G$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างที่ 4.3** วงจร RLC ขนานดังในรูปที่ 4.8 เมื่อเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ จงหาค่า (ก) ความถี่ (ข) อินดัคตีพและคาปาซิตีพ ซัซเซพแตนซ์ (ค) แอ่ดมิตแตนซ์และอิมพีแตนซ์ของวงจร (ง) กระแส $I_r, I_C$, $I_C$ และ $I_X$ (จ) กำลังงานไฟฟ้าของวงจร (ฉ) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม

**วิธีทำ** (ก) $f_r = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \dfrac{1}{2\times 3.14\times\sqrt{0.02\ \text{H}\times 25\times 20^{-6}\ \text{F}}}$

$= \dfrac{1}{2\times 3.14\times 0.7071\times 10^{-3}}\ \text{Hz} = 225.195\ \text{Hz}$

(ข) $B_L = \dfrac{1}{2\pi f_r L} = \dfrac{1}{2\times 3.14\times 225.195\ \text{Hz}\times 0.02\ \text{H}}$

$= 35.36\ \text{mS}$

$B_C = 2\pi f_r C = 2\times 3.14\times 225.195\ \text{Hz}\times 25\times 10^{-6}\ \text{F}$

$= 35.36\ \text{mS}$

(ค) $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$

$= \sqrt{(1/20\ \Omega)^2 + (35.36\ \text{mS} - 35.36\ \text{mS})^2}$

$= \sqrt{(1/20\ \Omega)^2} = \sqrt{(0.05\ \text{S})^2} = 0.05\ \text{S}$

$Z = \dfrac{1}{0.05\ \text{S}} = 20\ \Omega$

(ง) เมื่อเกิดสภาวะรีโซแนนซ์จะได้

$I_R = I_T = 11\ \text{A}$

ดังนั้น $V = I_R R = 11\ \text{A}\times 20\ \Omega = 220\ \text{V}$

$I_L = VB_L = 220\ \text{V}\times 35.36\ \text{mS} = 7.78\ \text{A}$

$I_C = VB_C = 220\ \text{V}\times 35.36\ \text{mS} = 7.78\ \text{A}$

$I_X = I_L - I_C = 7.78\ \text{A} - 7.78\ \text{A} = 0\ \text{A}$

$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = \sqrt{(11\ \text{A})^2 + (0\ \text{A})^2} = 11\ \text{A}$

(จ) $P = I_R^2 R = (11\ \text{A})^2\times 20\ \Omega = 2420\ \text{W}$

(ฉ) เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่เขียนได้ แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 27-8 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 การหาค่า L หรือ C เพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ขนาน

จากสมการที่ (4.2) เมื่อกำหนดความถี่รีโซแนนซ์ $f_r$ มาให้ เราก็สามารถที่จะเขียนเป็นสูตรใหม่เพื่อหาค่า L และ C ที่ทำให้วงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ได้ ซึ่งจะหาได้ดังนี้คือ

$$\text{จาก} \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\text{หรือ} \quad \sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi f_r}$$

เมื่อยกกำลังสองสมการข้างบนทั้งสองข้าง จะได้

$$(\sqrt{LC})^2 = \left(\frac{1}{2\pi f_r}\right)^2$$

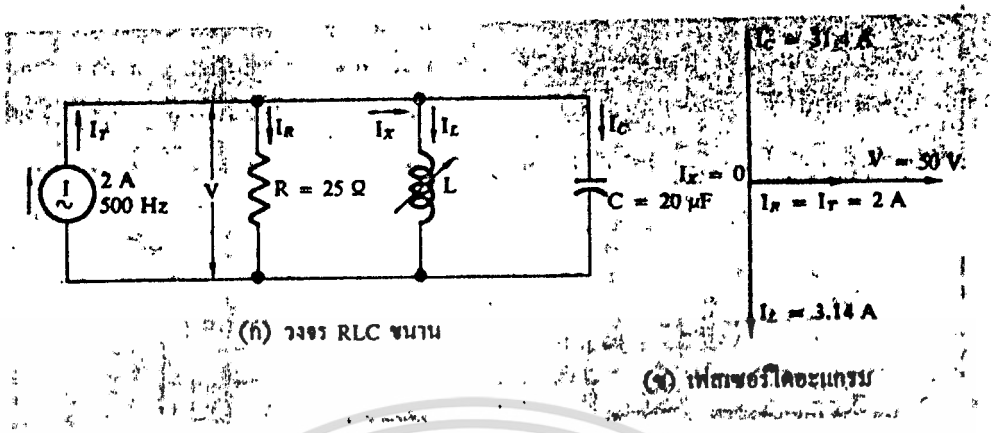
$$LC = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C}$$

$$\text{หรือ} \quad C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L}$$

**ตัวอย่างที่ 4.4** วงจร RLC ขนาดดังในรูปที่ 4.9 (ก) ถ้าความถี่เท่ากับ 500 Hz จงหาค่า (ก) อิน-ดัคแตนซ์ที่ทำให้วงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ (ข) แอดมิตแตนซ์และอิมพีแดนซ์ของวงจร (ค) กระแส $I_R, I_L, I_C$ และ $I_X$ (ง) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ก) วงจร RLC ขนาน

(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

รูปที่ 27-9

ดัดแดนซ์ที่ทำให้วงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ (ข) แอดมิดแตนซ์และอิมพีแดนซ์ของวงจร (ค) กระแส $I_R$, $I_L$, $I_C$ และ $I_X$ (ง) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม

วิธีทำ (ก) $L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{4\times(3.14)^2\times(500\ \text{Hz})^2\times 20\times10^{-6}\ \text{F}}$

$= 5.071\times10^{-3}\ \text{H} = 5.071\ \text{mH}$

(ข) $B_L = \frac{1}{2\pi f L} = \frac{1}{2\times3.14\times500\ \text{Hz}\times5.071\times10^{-3}\ \text{H}}$

$= 62.8\ \text{mS}$

$B_C = 2\pi f C = 2\times3.14\times500\ \text{Hz}\times20\times10^{-6}\ \text{F}$

$= 62.8\ \text{mS}$

$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$

$= \sqrt{(1/25\ \Omega)^2 + (62.8\ \text{mS} - 62.8\ \text{mS})^2}$

$= \sqrt{(0.04\ \text{S})^2} = 0.04\ \text{S}$

$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{0.04\ \text{S}} = 25\ \Omega$

(ค) เมื่อเกิดสภาวะรีโซแนนซ์จะได้

$I_R = I_T = 2\ \text{A}$

$V = I_R R = 2\ \text{A}\times25\ \Omega = 50\ \text{V}$

$I_L = VB_L = 50\ \text{V}\times62.8\times10^{-3}\ \text{S} = 3.14\ \text{A}$

$I_C = VB_C = 50\ \text{V}\times62.8\times10^{-3}\ \text{S} = 3.14\ \text{A}$

$I_X = I_L - I_C = 3.14\ \text{A} - 3.14\ \text{A} = 0\ \text{A}$

$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = \sqrt{(2\ \text{A})^2 + (0\ \text{A})^2} = 2\ \text{A}$

(ง) เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่เขียนได้ แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 27-8 (ข)

## ตัวอย่างการแก้ปัญหาโจทย์

27-6 วงจร RLC อนุกรมดังในรูปที่ 27-10 (ก) เมื่อวงจรเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ จงหาค่า (ก) ความถี่ (ข) อินดักตีฟและคาปาซิตีฟ รีแอกแตนซ์ (ค) อิมพีแดนซ์ของวงจร (ง) กระแสที่ไหลในวงจร (จ) แรงดันตกคร่อมที่ R, L และ C (ฉ) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม

วิธีทำ (ก) $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times3.14\sqrt{5\times10^{-3}\ \text{H}\times1\times10^{-6}\ \text{F}}}$

$= \frac{1}{2\times3.14\times10^{-4}\times\sqrt{0.5}}\ \text{Hz} = 2251.9\ \text{Hz}$

(ข) $X_L = 2\pi f L = 2\times3.14\times2251.9\ \text{Hz}\times5\times10^{-3}\ \text{H}$

$= 70.71\ (\Omega)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 วงจรขยายย่านความถี่วิทยุ

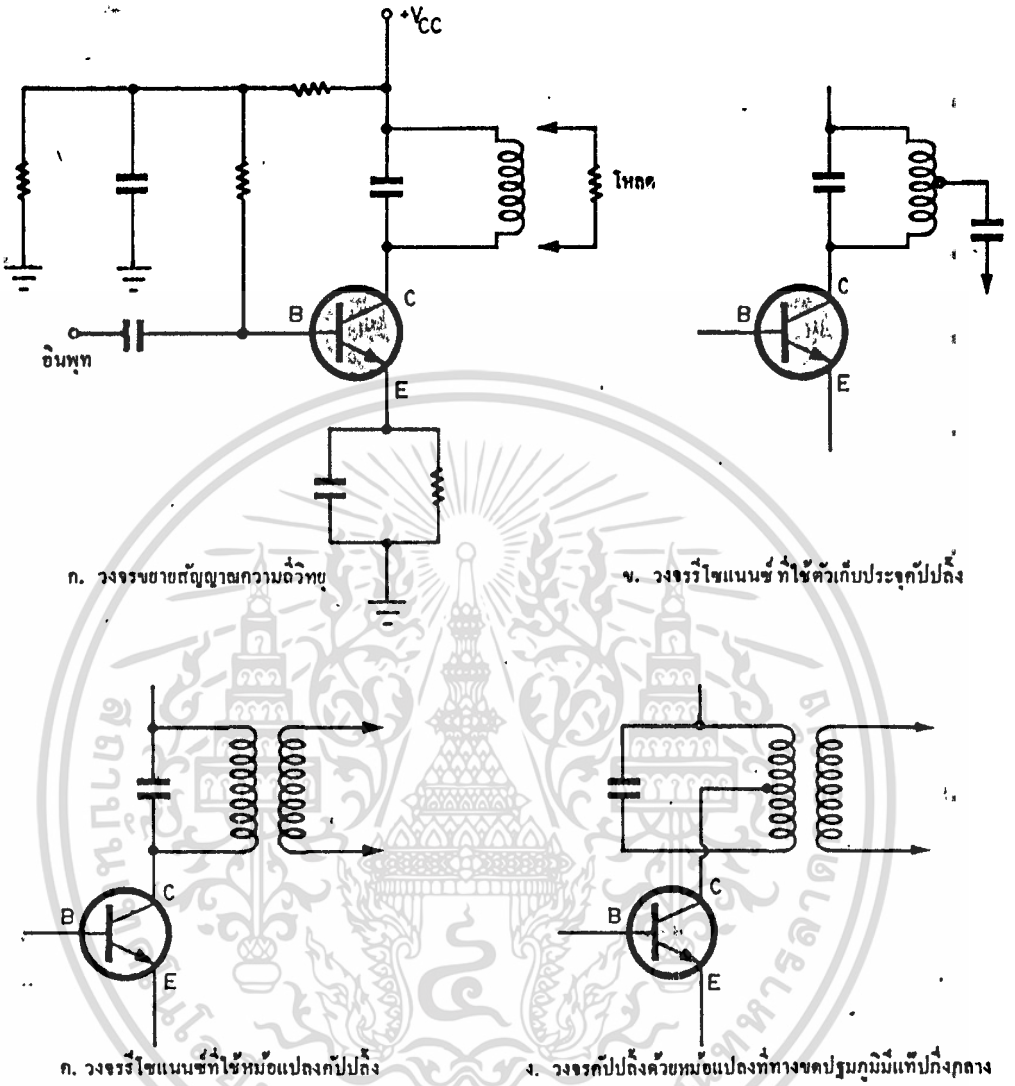
ในบทก่อน ๆ เราได้กล่าวถึงวงจรขยายไปบ้างแล้ว วงจรขยายส่วนใหญ่ที่กล่าวถึงนั้นเราสามารถนำไปใช้งานได้ที่ความถี่ต่ำ คือย่านความถี่เสียง หรือจาก 20 Hz จนถึง 20,000 Hz นั่นเอง ส่วนย่านความถี่ที่สูงกว่านี้ที่อยู่ในย่านความความถี่วิทยุ วงจรขยายที่ใช้จะต้องมีลักษณะที่แตกต่างไปบ้างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวงจรขยายชนิดเลือกความถี่ได้

ความแตกต่างของวงจรขยายแบบเลือกความถี่ และแบบไม่เลือกความถี่ที่เห็นได้ชัดคือ ในวงจรขยายแบบเลือกความถี่ สัญญาณที่วงจรสามารถทำการขยายได้จะอยู่ในช่วงความถี่แคบ ๆ เช่น 455 kHz สำหรับเครื่องรับวิทยุ AM เป็นต้น ส่วนวงจรขยายแบบไม่เลือกความถี่สามารถขยายได้ในแถบความถี่กว้าง ๆ เช่น วงจรขยายเสียงไฮไฟ สามารถขยายได้ในช่วงจาก 20-20,000 Hz

### 4.4.1 วงจรขยายย่านความถี่วิทยุใช้ทรานซิสเตอร์

วงจรขยายย่านความถี่วิทยุแบบอิมิตเตอร์ร่วมแสดงให้เห็นดังรูปที่ 17.1 สังเกตว่าโหลดของวงจรเป็น *วงจรรีโซแนนซ์* ซึ่งถ้าพิจารณาแล้วจะเห็นว่าเป็นโหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำมาก เนื่องจากค่าความต้านทานของโหลดมีค่าต่ำมากดังนั้นจึงต้องต่อเพื่อให้แมทช์ได้กับอินพุทของวงจรในภาคต่อไป วงจรที่ต่อเมื่อเชื่อมเข้ากับอินพุทของวงจรขยายภาคต่อไปแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10 ในรูปที่ 4.10 (ข) เป็นวงจรรีโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำที่มีการแท็ปแบ่ง โดยมีตัวเก็บประจะเป็นทางผ่านของสัญญาณอีกตัวหนึ่ง ส่วนในรูปที่ 4.10 (ก) โหลดจะต่อกับหม้อแปลง ถ้าหากเราเลือกจำนวนขดของวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิให้เหมาะสม ก็จะทำให้การแมทช์เกิดขึ้นได้ ตามปกติแล้วเอาท์พุทอิมพิแดนซ์ของวงจรขยายทรานซิสเตอร์มักจะมีค่าต่ำ ดังนั้นเราจึงมีวิธีการต่อโหลดที่เป็นรีโซแนนซ์อีกแบบหนึ่งดังวงจรในรูปที่ 4.10 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

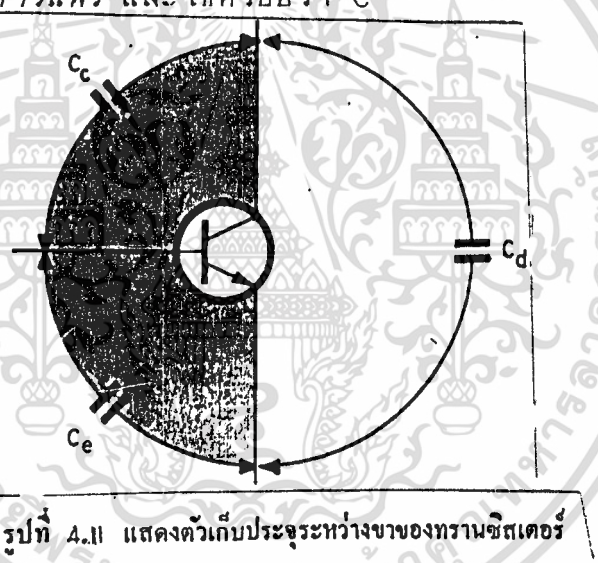



รูปที่ 4.10 วงจรขยายที่มีโหลดเป็นวงจรรีโซแนนซ์

เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณย่อนความถี่วิทยุซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง ดังนั้น ผลของสัญญารจึงมีผลต่อค่าตัวอุปกรณ์อย่างยิ่ง สำหรับวงจรในรูปที่ 4.10 เราจะเห็นว่าโหลดของวงจรจะต่อในลักษณะเป็นวงจรรีโซแนนซ์ ซึ่งความถี่ของสัญญาณกับค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อกันอย่างมาก ในการออกแบบหรือวิเคราะห์วงจรขยายย่ายความถี่วิทยุนี้ เราจึงต้องคำนึงถึงตัวเก็บประจุที่มีอยู่ภายในตัวทรานซิสเตอร์ประกอบด้วย เพราะ ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะเหมือนกับต่อขนานอยู่กับวงจรรีโซแนนซ์ ทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรรีโซแนนซ์เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวได้ง่ายก็ คือค่าตัวเก็บประจุในตัวทรานซิสเตอร์จะมีผลอย่างมากกับวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุนี้เราลองหันมาดูกันซิว่า ตัวเก็บประจุเหล่านี้มีอะไรบ้าง สิ่งที่เราพบก็คือตัวเก็บประจุจะเกิดขึ้นระหว่างขาทั้งสามของทรานซิสเตอร์นั้น สองในสามของตัวเก็บประจุนี้เป็นตัวเก็บประจุ ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเนื้อสาร P และเนื้อสาร N ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุระหว่างรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสใช้ตัวย่อว่า $C_e$ และตัวเก็บประจุระหว่างรอยต่อคอสเลคเตอร์กับเบสใช้ตัวย่อว่า $C_e$ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนตัวเก็บประจุอีกตัวเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ที่เกิดจากการแพร่ของพาหะในบริเวณเนื้อสาร เราจึงเรียกตัวเก็บประจุนี้ว่า *ตัวเก็บประจุจากการแพร่* และใช้ตัวย่อว่า C




รูปที่ 4.11 แสดงตัวเก็บประจุระหว่างขาของทรานซิสเตอร์

จากเหตุผลของการคายและรับประจุของตัวเก็บประจุซึ่งจะมีผลต่อเวลาการคายและรับประจุ ดังนั้นที่ความถี่สูง ๆ ผลเหล่านี้ก็จะปรากฏออกมาเด่นชัด ผู้ผลิตทรานซิสเตอร์ได้คำนึงถึงผลเสียของสิ่งเหล่านี้แล้วจึงได้พยายามสร้างให้ตัวเก็บประจุเหล่านี้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ โดยปกติจะมีค่าเพียง 1-10 พิโคฟารัดเท่านั้นสำหรับทรานซิสเตอร์สมัยใหม่ที่ได้รับการออกแบบมา เพื่อใช้ได้กับความถี่สูงมาก อาจจะอยู่ในย่านความถี่สูงมาก (จะมีค่าตัวเก็บประจุเหล่านี้น้อยมาก ๆ และกรรมวิธีในการผลิตที่จะให้ผลเหล่านี้ดีขึ้น จะต้องให้บริเวณเนื้อสารที่เป็นเบสแคบมาก ๆ ซึ่งก็จะมีผลต่อกระแสด้วย ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในย่านความถี่สูงส่วนใหญ่จึงให้กำลังงานเอาท์พุทได้ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.2 ทรานซิสเตอร์ความถี่สูง

กรรมวิธีในการผลิตทรานซิสเตอร์เพื่อให้ใช้ได้ที่ความถี่สูง เป็นสิ่งละเอียดก่อน ผลสำเร็จในการผลิตทรานซิสเตอร์ความถี่สูง เป็นสิ่งที่ท้ายความสามารถของมนุษย์มาก จนกระทั่งในปัจจุบันทรานซิสเตอร์ ได้ถูกนำมาใช้จนถึงย่านความถี่ไมโครเวฟ

ตัวพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการบอกคุณสมบัติพิเศษของทรานซิสเตอร์มีด้วยกันหลายตัวด้วยกันตัวพารามิเตอร์เหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับความถี่นั้นเอง ตัวพารามิเตอร์ที่เราใช้กันเป็นประจำได้แก่

1. $f_{max}$ คือความถี่สูงสุดที่ทรานซิสเตอร์ยังสามารถออสซิลเลทให้สัญญาณออกมาได้

2. $h_{feo}$ หรือ $\beta_p$ ใช้เป็นตัวบอกค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์โดยปกติที่ความถี่ต่ำ (โดยปกติใช้ 1 kHz)

3. $f_x$ เป็นความถี่ใช้งานของทรานซิสเตอร์ที่ต่อในลักษณะเบสร่วมที่ให้ค่าอัตราขยายเป็น 1

4. $f_\alpha$ เป็นความถี่คัทออฟ สำหรับวงวรทรานซิสเตอร์ที่ต่อในลักษณะอิมิตเตอร์ร่วม และที่ความถี่นี้อัตราขยายจะลดลง 3 dB เมื่อเทียบกับอัตราขยายที่ความถี่ต่ำ ๆ

5. $f_t$ เป็นความถี่ที่ทำให้วงจรทรานซิสเตอร์ ที่ต่อในลักษณะอิมิตเตอร์ร่วมมีอัตราขยายเป็น 1 ค่า ๆ นี้บางครั้งจะเรียกว่าค่าผลคูณระหว่างอัตราขยายกับความถี่

ตัวพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นสิ่งที่จะต้องนำมาคำนึงถึงอย่างยิ่ง เช่นถ้าต้องการให้วงจรออสซิลเลทหรือขยายสัญญาณที่ความถี่ 100 MHz ก็มิได้หมายความว่าถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ที่มี $f_{max}$ 100 MHz แล้วจะใช้ได้เสมอไป เพราะทรานซิสเตอร์เบอร์เดียวกันย่อมมีผลแตกต่างกันได้บ้าง นอกทั้งที่ความถี่ $f_{max}$ นี้ ทรานซิสเตอร์จะไม่ให้อัตราขยายใดๆ ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจะต้องเลือกค่า $f_{max}$ ให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

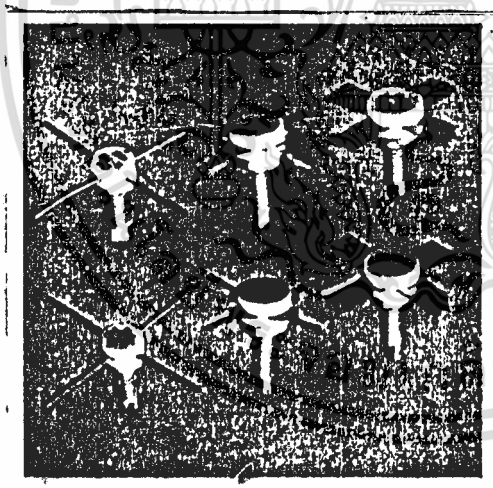
ค่าสูงกว่าความถี่ที่ใช้งานมากกว่า 2 เท่าขึ้นไป ในทางเดียวกันค่าความถี่ $f_t$ ก็คือค่าความถี่ที่ทำให้มีอัตราขยายเป็น 1 ดังนั้นถ้าทำเป็นวงจรขยายเราต้องการให้มีอัตราขยายมากกว่า 1 ดังนั้นเราจะต้องเลือก $f_t$ ให้มีค่าสูงกว่าความถี่ที่ใช้งานเป็นจำนวนกับอัตราขยาย หรือผลคูณระหว่างอัตราขยายกับความถี่ ที่ใช้งานจะเท่ากับ $f_t$ นั่นเอง หรือ

$$f = \frac{f_t}{A_v}$$

เมื่อ $f$ คือความถี่ที่ใช้งาน

$f_t$ คือความถี่ที่ให้มีอัตราขยายเป็น 1

$A_v$ คือค่าอัตราขยายของวงจร



รูปที่ 4.13 ทรานซิสเตอร์ความถี่สูง

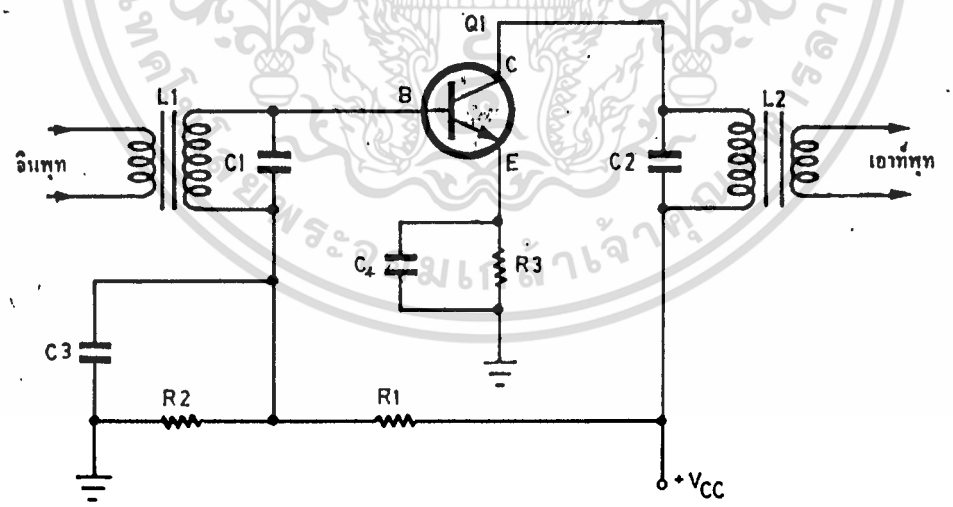
### 4.4.3 วงจรขยายเลือกความถี่สูงจูนช้างเดียว

วงขยายเลือกความถี่ย่านความถี่วิทยุแสดงให้เห็นดังวงจรรูปที่ 4.13 สังเกตให้ดีจะเห็นว่าวงจรนี้จะมีการเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลง โดยปกติหม้อแปลงที่ใช้เชื่อมต่อเป็นหม้อแปลงที่มีผลตอบสนองต่อความถี่สูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ เป็นตัวไบแอสทรานซิสเตอร์ (ไบแอสคงที่) ตัวเก็บประจุ $C_3$ เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำ ที่ความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นจึงเป็นสทางผ่านของสัญญาณความถี่วิทยุลงกราวนด์เพื่อป้องกันการสูญเสียของสัญญาณ เราอาจจะแปลกใจว่า เมื่อให้สัญญาณผ่านลงกราวนด์แล้วทำไมจึงลบดการสูญเสียได้ ถ้าพิจารณาที่เบสกับกราวนด์จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ $C_1$ ต่ออนุกรมกับ $C_3$ และ $R_2$ เมื่อ $C_3$ มีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำตัวเก็บประจุ $C_3$ จะเสมือนลัดวงจรแทนที่จะตกคร่อมตัวต้านทาน $R_2$

ที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน ความถี่รีโซแนนซ์จะเป็นความถี่ที่วงจรขยายทำงาน ดังนั้นวงจรสามารถขยายความถี่ได้เพียงช่วงความถี่แถบหนึ่งเท่านั้น และความถี่ที่นอกเหนือจากนี้จะถูกปั่นทอนออกไป




รูปที่ 4.14 วงจรขยายเลือกความถี่

ช่วงกว้างทางความถี่ของวงจรขยายวามารถกำหนดขึ้นได้ด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรรีโซแนนซ์ ในทางปฏิบัติแล้วความถี่ของการใช้งานนี้เรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้วงจรเลือกความถี่มีความถี่กึ่งกลางได้สูง จากหลายสิบกิโลเฮริทซ์ถึงหลายร้อยเมกกะเฮริทซ์ และช่วงกว้างทางความถี่ก็สามารถทำให้แคบมาก จนกระทั่งกว้างเป็นหลายเมกกะเฮริทซ์ได้

ตัวเก็บประจุที่ประกอบในวงจรขยายย่านความถี่วิทยุมักจะมีค่าคงจะเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถ้าเทียบกับตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรขยายเสียงแล้วจะแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะที่ความถี่สูงค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าต่ำ ถ้าหากว่าเป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในย่านความถี่เสียง เราต้องให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากเพื่อให้ค่ารีแอกแตนซ์ต่ำหรือเป็นทางผ่านของสัญญาณ ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรขยายตามรูปที่ 4.13 คือตัวเก็บประจุ $C_3$ และ $C_4$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.001 uF ถึง 0.1 uF แต่ถ้านำวงจรนี้ไปใช้ในย่านความถี่เสียงจะต้องเพิ่มค่า $C_3$ และ $C_4$ เป็น 1 uF ถึง 100 uF

ผลของตัวเก็บประจุจะแสดงออกมาได้เด่นชัดที่ความถี่ทั้งนี้เพราะตัวเก็บประจุที่มีอยู่ภายในตัวทรานซิสเตอร์จะมีค่าขึ้นใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุของวงจรจูน ดังนั้นส่วนของตัวเก็บประจุในตัวทรานซิสเตอร์จึง

เสมือนกับเป็นตัวต่อระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทในลักษณะการป้อนกลับ ลักษณะสมบัติการทางานทางด้านอินพุทจึงมีผลกับทางด้านเอาท์พุทด้วย จะเห็นได้ว่าสิ่งเหล่านี้มีผลต่อเสถียรภาพของวงจรอย่างยิ่ง เพราะถ้าหากว่าการป้อนกลับนี้เป็นการป้อนกลับแบบบวกแล้ววงจรย่อมเกิดการออสซิลเลทได้

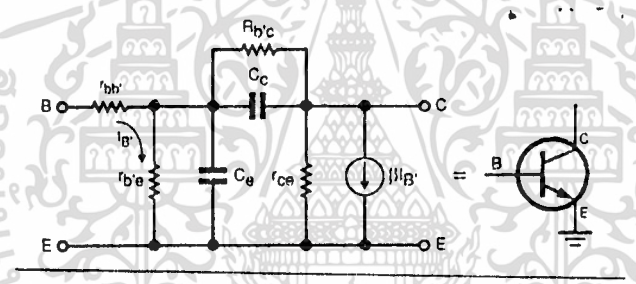
ดังนั้นในวงจรขยายแบบเลือกความถี่ จึงมีตัวต้านทานต่อคร่อมวงจรรีโซแนนซ์ทางขาคอลเลคเตอร์ของวงจรตัวต้านทานที่ต่อนี้มีชื่อว่า *ตัวต้านทานสแวม์ปปิ้ง* ตัวต้านทานที่ใช้นี้ควรจะมีค่าพอเหมาะทำให้วงจร มีสถานะเสถียรภาพโดยไม่เกิดการออสซิลเลท ผลเสียที่เกิดขึ้นคือจะทำให้อัตราขยายของวงจรลดลงและขอบเขตของการเปลี่ยนความถี่กว้างขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งได้ว่าค่า Q ของวงจรลดลงนั่นเอง

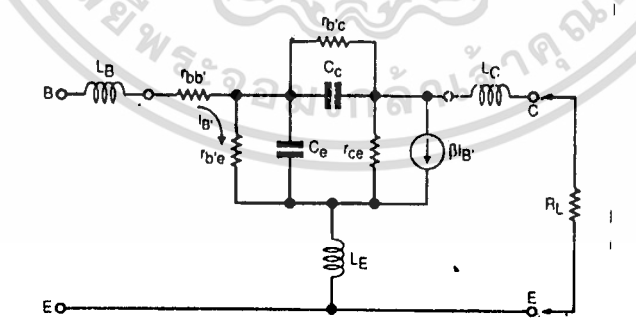
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 RF ทรานซิสเตอร์

คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

เนื่องจากทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราการขยายสัญญาณ ดังนั้นการที่จะอธิบายและวิเคราะห์การทำงายของทรานซิสเตอร์เราต้องหาแบบ (model) หรือวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ขึ้นมาก่อน เพื่อแทนสภาวะการทำงานของตัวทรานซิสเตอร์ซึ่งมีที่ใช้กันประมาณ 2-3 แบบ ตามจุดประสงค์ของการใช้งานในการแทนพฤติกรรมของทรานซิสเตอร์ ที่สภาวะการทำงานหนึ่งๆ สำหรับวงจรสมมูลที่นำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมของทรานซิสเตอร์ที่




ความถี่สูงนี้เป็นแบบไฮบริดจ์พาย (hybrid model) ที่ได้ชื่อนี้เพราะมันมีลักษณะโครงสร้างคล้ายตัว นิยมใช้กันในงานที่ต้องการศึกษาการทำงานของทรานซิสเตอร์อย่างละเอียด เพราะเป็นแบบที่ให้ผลเหมือนตัวทรานซิสเตอร์มากที่สุด ดังแสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ที่จัดวางจรแบบ อิมิตเตอร์ร่วม (common emitter)

โดยที่ $r_{bb}$ เรียกว่า เบสสเปรดดิ้งรีซิสแตนซ์ (Basespreading resistance) แทนค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เป็นเบสกับลวดตัวนำที่ต่อออกมาเป็นขาเบสที่ตัวถังของทรานซิสเตอร์ ความต้านทานแบบนี้จะเกิดขึ้นเสมอไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่พอที่จะทำให้มีค่าต่ำลงได้ โดยการทำให้ตัวทรานซิสเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้พื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างรอยต่อมีขนาดใหญ่ขึ้น

$r_{be}$ เป็นความต้านทานทางอินพุตที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ขณะที่รอยต่อ P-N นี้ถูกเป็นไบแอสตรง (forward bias) โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 1,000 โอห์ม ที่สภาวะการทำงานปกติของทรานซิสเตอร์

$r_{bc}$ เป็นค่าความต้านทานป้อนกลับที่เกิดขึ้นระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบส ความต้านทานที่เกิดขึ้นนี้มีค่ามากถึงประมาณ 5 เมกะโอห์ม ($5\ 10^6$ โอห์ม) ทำให้ในงานบางอย่างสามารถที่จะไม่นำค่าความต้านทานซิสเตอร์ ค่าความต้านทานที่ได้จะไม่นำค่าความต้านทานนี้มาคิดได้

$r_{ce}$ เป็นความต้านทานทางเอาต์พุต เมื่อมองเข้าไปข้างในขาคอบเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ค่าความต้านทานที่ได้จะประมาณ 100 กิโลโอห์ม

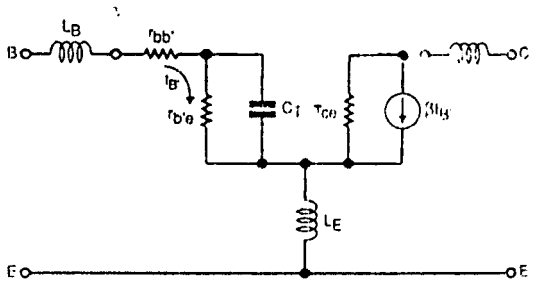
$C_e$ คือค่าความจุไฟฟ้ารวมระหว่างความจุไฟฟ้าที่อยู่รอบๆ ขาอิมิเตอร์หรือดิฟฟิวชั่นคาปาซิแตนซ์ (diffusion capacitance) กับค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อของอิมิตเตอร์กับเบส เนื่องจากความจุที่รอยต่อนี้มีขนาดเล็ก ค่าความจะที่อยู่รอบๆ อิมิตเตอร์ดังนั้นความจุไฟฟ้า $C_e$ จึงมักเรียกกันสั้นๆ ว่าดิฟฟิวชั่นคาปาซิแตนซ์ โดยมีค่าประมาณ 100 พิโกฟารัด ($100\ 10^{12}$)

$C_C$ เป็นความจะไฟฟ้าป้อนกลับที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้ไบแอสกลับ (reverse bias) ที่รอยต่อระหว่างเบสกับคอบเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่สูงๆ ความจะไฟฟ้านี้จะมีผลต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์มาก จะทำให้

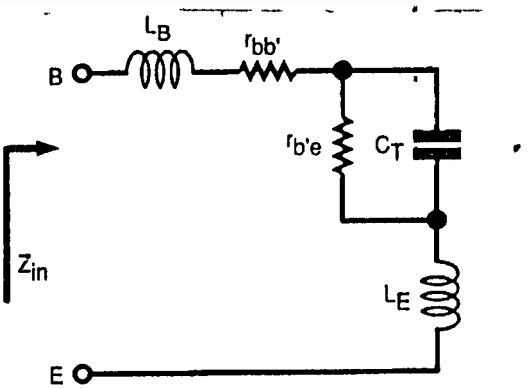
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายของทรานซิสเตอร์ลดลง เนื่องจากมีการป้อนกลับเกิดขึ้น โดยทั่วไป ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้มีค่าประมาณ 3 พิโกฟารัด แหล่งจ่ายกระแสคา $BI_B$ แทนกระแสคอบเบ็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ โดยมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสเบส ($I_B$) ที่ไหลผ่านความต้านทาน $r_{bc}$ B เป็นค่าคงที่แทนอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ค่ากระแสที่ไหลในคอบเบ็กเตอร์หรือแหล่งจ่ายกระแสจ่ายออกมุทา จึงมีค่าเท่ากับผลคูณของ $I_B$ กับ B กล่าวคือ $I_C = BI_B$

วงจรสมมูลดังในรูปที่ 1 เป็นวงจรสมมูลของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ ที่เกิดขึ้นจากลักษณะของเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้นยังไม่ได้รวมถึงขาของทรานซิสเตอร์ที่ต่อออกมาใช้งาน ในการออกแบบใช้งานทรานซิสเตอร์ที่ความถี่สูงๆ ต้องคำนึงถึงจุดนี้ ด้วยการต่อขาทรานซิสเตอร์ออกมาใช้งาน ต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างเนื้อสารกึ่งตัวนำกับขาที่จะนำต่อออกมาใช้งาน ต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างเนื้อสารกึ่งตัวนำกับขาที่จะนำต่อออกมาใช้งาน โดยการใช้ลวดโลหะมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกลวดโลหะนี้ว่า บอนด์ดิ้งไวร์ (bonding wire) เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกนำไปใช้ในงานที่ความถี่สูงๆ บอนด์ดิ้งไวร์และขาของทรานซิสเตอร์ก็จะมีคุณสมบัติของความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมา ดังที่ได้เคยกล่าวไว้แล้วในเรื่องพลิกวิถี R L, C ดังนั้นวงจรสมมูลที่ใช้ในตอนนี้จึงไม่ใช่ดังรูปที่ อีกต่อไปแล้ว แต่จะมาเป็นดังรูปที่ 4.15 แทน โดยมีส่วนของตัวเหนี่ยวนำ $L_B$, $L_C$ และ $L_E$ เพิ่มขึ้นมา ซึ่งแทนค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น




รูปที่ 4.16 วงจรสมมูลที่ผ่านการลดรูปโดยใช้ทฤษฎีของมิลเลอร์




รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลทางด้านอินพุตอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากบอนด์ดิ้งไวร์และขาของทรานซิสเตอร์ที่เบส, คอลเล็กเตอร์ และอิมิตเตอร์ตามลำดับ

เมื่อได้วงจรสมมูลขึ้นมาแล้ว ต่อไปเราจะมาศึกษาคุณสมบัติของอินพุตอิมพีแดนซ์, เอาต์พุตอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย และคุณสมบัติการป้อนกลับของทรานซิสเตอร์ ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่อย่างไรบ้าง

### 4.5.1 อินพุทอิมพีแดนซ์

การวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ โดยการใช้วงจรสมมูลในรูปแบบที่ง่ายต่อการคำนวณ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ผิดพลาดไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากความต้านทาน $r_{bc}$ ที่ได้จะไม่ผิดพลาดไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากความต้านทานนี้ได้ โดยมองเสมือนว่าเป็นสวิตช์ที่เปิดวงจรอยู่ และย้ายความจุไฟฟ้า $C_c$ ที่เกิดขึ้นระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบสไปต่อขนานกับความจุไฟฟ้า $C_e$ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าใหม่ตามทฤษฎีของมิลเลอร์ (miller theorem) เป็น

$$C_{new} = C_c \quad (1-BR_L)$$

เมื่อ $R_L$ เป็นค่าความต้านทานของโหลด

ต่อมากำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าใหม่ที่ได้นี้รวมกับค่าความจุไฟฟ้า $C_e$ เป็นความจุไฟฟ้ารวม $C_T$ ทำให้ได้วงจรสมมูลใหม่หลังจากการลดรูปแล้วตามรูปที่ 4.16 และเมื่อแยกเฉพาะวงจรส่วนที่เกี่ยวข้องกับอินพุตอิมพีแดนซ์เท่านั้นออกมา ก็จะได้วงจรสมมูลของอินพุตอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.17 สิ่งที่ควรสนใจเป็นพิเศษก็คือความต้านทาน $r_{be}$ กับความจุไฟฟ้า $C_T$ เนื่องจากความต้านทาน $R_{bb}$ มักมีค่าน้อยมากๆ ในขณะที่ความเหนี่ยวนำ $L_B$ และ $L_E$ ก็สามารถที่จะทำให้มีค่าน้อยลงได้ด้วยการตัดขาของทรานซิสเตอร์ให้เหลือน้อยที่สุดในขณะที่ใช้งาน เพื่อให้เหลือแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากบอนด์ดิ้งไวร์เท่านั้น และจะมีผลกระทบต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์ก็ต่อเมื่อความถี่ใช้งานสูงเกินกว่าความถี่ย่าน VHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เมื่อทำการวิเคราะห์อย่างคร่าวๆ พบว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์จะมีค่ามากที่สุด เมื่อป้อนแรงดันไฟตรงเข้าที่อินพุต โดยเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มความถี่แรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจากเดิมที่เป็นไฟตรง ผลของความจุไฟฟ้า $C_T$ ที่ต่อขนานกับความต้านทาน $r_{be}$ ก็เริ่มมีผลทำให้ความต้านทานรวมของวงจรขนาน $r_{be}$ กับ $C_T$ นี้มีค่าลดลงจนมีค่าน้อยมาก ๆ สามารถตัดทิ้งได้ที่ความถี่สูง ๆ ทำให้เหลือแต่ค่าความเหนี่ยวนำ $L_B$, $L_E$ กับความต้านทาน $r_{bb}$ เท่านั้น

ถ้าเรามาวิเคราะห์ให้ลึกลงไปอีกนิด เมื่อมองจากรูปที่ 4.17 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Z_{in} = X_{LB} + r_{bb'} + \left[\frac{X_{CT} \times r_{b'e}}{X_{CT} + r_{b'e}}\right] + X_{LE}$$

เมื่อ $X = j\omega$ จะได้

$$Z_{in} = j\omega L_B + r_{bb'} + \left[\frac{\frac{1}{j\omega C_T}\left(r_{b'e}\right)}{\frac{1}{j\omega C_T} + r_{b'e}}\right] + j\omega L_E$$

$$= j\omega\left(L_B + L_E\right) + r_{bb'} + \frac{r_{b'e}}{1 + r_{b'e}\, j\omega C_T}$$

$$= j\omega L_T + r_{bb'} + \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} C_T} \quad \ldots(1)$$

ถ้าสมมติให้ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งมีค่า

$L_T$ = 20 นาโนเฮนรี, $R_{be}$ = 1000 โอห์ม

$r_{bb}$ = 50 โอห์ม, $C_T$ = 100 พิโกฟารัด

เมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปแทนลงในสมการที่ (1) แล้วนำไปเขียนลงในสมิดชาร์ต ก็จะได้ผลลัพธ์ในรูปที่ 5 ซึ่งจะต้องคูณด้วย 100 จึงจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริง เนื่องจากเราทำการนอร์มัลไลซ์ (normaliyed) หรือหาอิมพีแดนซ์จริงด้วย 100 ก่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเขียนลงสมิตชาร์ต ผลที่ได้จากสมิตชาร์ตแสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะลดลง โดยมีค่ามากสุดที่แรงดันไฟตรงคือ 1,050 โอห์ม และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจนเป็น 50 โอห์มที่ความถี่ 112 เมกะเฮิรตซ์ และหลังจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ตัวนี้มีค่าความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ 112 เมกะเฮิรตซ์

### 4.5.2 เอาต์พุตอิมพีแดนซ์

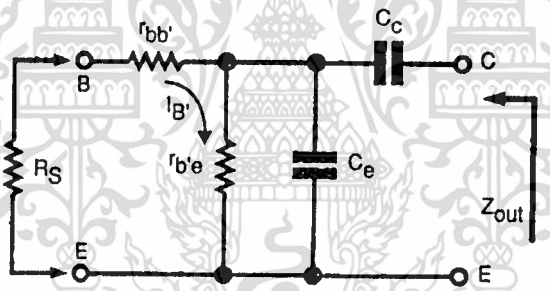
วงจรสมมูลที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มาจากวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.14 เมื่อมองเข้าไปข้างในวงจรสมมูลทางคอลเล็กเตอร์จะเห็นความต้านทาน $r_{ce}$ ซึ่งมีค่าประมาณ 100 กิโลโอห์มกับ $r_{bc}$ ค่า 5 เมกะโอห์มต่ออยู่ในวงจร ค่าความต้านทานทั้ง 2 ตัวนี้ นับว่ามีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอุปกรณ์อื่น ๆ ในวงจร ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจร เราจะละทิ้งความต้านทานทั้ง 2 ตัวนี้ คือเสมือนว่ามันเปิดวงจรอยู่ โดยผลที่ได้ก็ไม่ผิดพลาดไปมากนัก ทำให้ได้วงจรสมมูลของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ดังในรูปที่ 4.18 โดยความต้านทาน $R_s$ เป็นค่าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายภายนอกที่นำมาต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์ และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกระแสถือว่าเป็นอนันต์หรือมีค่ามาก ๆ จึงไม่นำมาคิด

เนื่องจากอุปกรณ์ทางเอาต์พุตเป็นความจะไพฟ้า $C_e$ และ $C_e$ ทำให้เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงตามการลดลงของค่ารีแอกแตนซ์ของความจุไพฟ้า แต่ใช่ว่าการลดลงของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุนี้เพียงอย่างเดียว ยังมีสาเหตุอื่นอีกที่ทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ลดลงโดยที่ไม่สามารถมองจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.18 ได้นั่นคือการป้อนกลับของสัญญาณทางเอาต์พุต กล่าวคือในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่จะมีสัญญาณทางเอาต์พุตส่วนหนึ่งถูกป้อนกลับมายังทางอินพุต โดยผ่านทางความจะไพฟ้า $C_C$ ซึ่งขนาดของการป้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อมความต้านทาน $r_{be}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสูงขึ้น กระแส $I_B$ ที่ไหลผ่านความต้านทาน $r_{be}$ จึงมีค่าสูงขึ้นตามกระแสคอลเล็กเตอร์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับ $I_B$ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตามอัตราขยาย B

การเพิ่มขึ้นของแระแสคอลเล็กเตอร์นี้ ทำให้ดูเหมือนว่าอิมพีแดนซ์ทางค่อลเล็กเตอร์มีค่าลดลง ผลที่ได้จึงเสมือนว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง สผลที่ได้จึงเสมือนว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงไปอีกนอกเหนือไปจากการลดลงที่เกิดขึ้นเพราะ $C_e$ และ $C_C$ ค่าความต้านทาน $R_S$ ก็ยังมีผลทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปได้เหมือนกัน โดยความต้านทาน $R_S$ มีค่ามากขึ้นจะทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง เพราะว่ากระแสที่ไหล




**รูปที่ 4.เซงจรสมมูลทางด้านเอาต์พุตอิมพีแดนซ์**

ผ่านความต้านทาน $R_S$ ไหลผ่านได้น้อยลง กระแสที่เหลือจึงไหลผ่านไปทาง $r_{be}$ แทนกระแส $I_b$ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมทำให้กระแสคอบเบ็กเตอร์เพิ่มมากขึ้น หรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คุณสมบัติของการป้อนกลับ**

ส่วนของวงจรสมมูลในรูปที่ 4.14 ที่ทำให้สัญญาณเกิดการป้อนกลับมายังอินพุตคือความจุไฟฟ้า $C_C$ และความต้านทาน $r_{bc}$ แต่ที่สำคัญมากที่สุดคือความจุไฟฟ้า $C_c$ เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของมันเปลี่ยนแปลงไปตามความพี่ ในขณะที่ความต้านทาน $r_{bc}$ มีค่าคงที่และมีค่ามาก จึงมีผลต่อคุณสมบัติการป้อนกลับของทรานซิสเตอร์น้อยมาก เมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตมีค่าสูงขึ้นการป้อนกลับของสัญญาณทางคอลเล็กเตอร์มายังเบสจะมีค่ามากขึ้นด้วย เพราะค่ารีแอกแตนซ์ของความจุไฟฟ้า $C_c$ มีค่าลดลง

ที่ความถี่ต่ำผลของการป้อนกลับมีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่าความจะไฟฟ้า $C_c$ มีค่าไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการป้อนกลับจึงไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์ แต่ที่ความถี่สูงการป้อนรกลับเริ่มมีค่ามากขึ้น ผลของการป้อนกลับจะทำให้เฟสของสัญญาณเลื่อนไป 180 องศา และเมื่อผ่านวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมทำให้เฟสของสัญญาณที่ได้จากการป้อนกลับมีเฟสตรงกันกับสัญญาณอินพุต เกิดเป็นการป้อนกลับแบบบวกขึ้น เป็นผลให้ทรานซิสเตอร์เกิดการออสซิลเลตขึ้นมาได้

ผลของความจุไฟฟ้า $c_c$ นอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาการป้อนกลับภายในตัวทรานซิสเตอร์แล้ว ยังก่อให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ขึ้นอีก เนื่องจากเกิดการไม่แยกออกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรทางด้านคอลเล็กเตอร์กับวงจรทางด้านเบส นั่นคือการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของความต้านโหลดที่วงจรทางด้านคอลเล็กเตอร์จะส่งผลกระทบโดยตรงมายังอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เบส และในทางกลับกันก็เป็นเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของความต้านทานภายใน แหล่งจ่ายที่ต่อเข้ากับวงจรเบสาจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่คอลเล็กเตอร์

สิ่งเหล่านี้เป็นปัญหาสำคัญที่ควรจะนำมาพิจารณา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการออกแบบวงจรแมิ่งทางอินพุตและเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ในเวลาเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะเมื่อคุณออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่งทางด้านอินพุตก่อน แล้วไปออกแบบวงจรแมตชิ่งทางด้านอินพุตก่อน แล้วไปออกแบบวงจรแมตชิ่งทางด้านเอาต์พุตทีหลัง ผลของวงจรแมตชิ่งทางด้านเอาต์พุตทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ที่คุณใช้ออกแบบตั้งแต่แรกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นวงจรแมตชิ่งทางด้านอินพุตที่ออกแบบไว้แล้วก็ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้อีกต่อไปคุณจะต้องทำการออกแบบใหม่ และหลังจากที่คุณได้ทำการออกแบบวงจรแมตชิ่งทางด้านอินพุตใหม่เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะพบว่าวงจรแมตชิ่งทางด้านเอาต์พุตที่คุณออกแบบไว้แล้วนั้นจะต้องทำการออกแบบใหม่ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงวงจรแมตชิ่งทางด้านอินพุต

ดังนั้นการออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่งโดยที่ไม่มีการคิดถึงผลของการป้อนกลับในตัวทรานซิสเตอร์เนื่องจากความจะไฟฟ้า $C_c$ และความต้านทาน $r_{be}$ จะทำให้วงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่งที่เราออกแบบมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น แต่ถ้าค่าความจะไฟฟ้า $c_c$ ที่เกิดขึ้นระหว่างเบสกับคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าน้อยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยด้วย จนพอจะยอมรับได้แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นเราจะต้องทำการออกแบบวงจรแมตชิ่งด้วยวิธีที่เรียกว่า ซิมมูลเทเนียส คอนจูเกตแมต (Simultaneous Conjugate match) ดังจะได้กล่าวถึงในตอนต่อไป

### 4.5.4 อัตราขยาย

อัตราขยายของ RF ทรานซิสเตอร์ที่เราสนใจไม่ใช่อัตราขยายแรงดันหรืออัตราขยายกระแส แต่เป็นอัตราขยายกำลัง เพราะว่าในวงจรไฟฟ้าที่ทำงานเกี่ยวกับเคลื่อนความถี่สูง หรือที่เรียกกันว่าวงจร RF เช่น ในวงจรเครื่องรับ-ส่งวิทยุมีส่วนของวงจรที่มีอิมพีแดนซ์สูง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมาไม่คงที่ เช่นอิมพีแดนซ์ของส่วนที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความถี่ การที่มีแต่อัตราขยายกระแสหรือแรงดันเพียงอย่างเดียวจึงใช้ทำงานจะไรไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการขยายทั้งกระแสและแรงดันพร้อมกัน ซึ่งก็คืออัตราขยายทางกำลังนั่นเอง เพราะเป็นสาเหตุหนึ่งที่เราไม่ใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

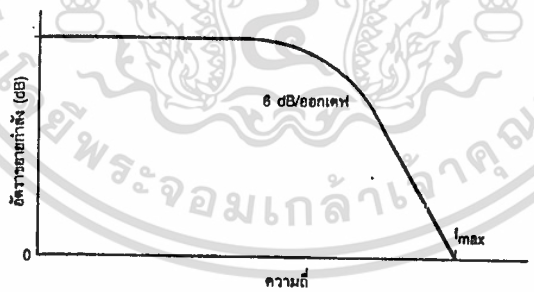
งานขยายกำลัง เพราะอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟเป็นอุปกรณ์ที่ให้อัตราขยายทางแรงดันหรือทางกระแสได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถขยายทั้งแรงดันและกระแสพร้อมกันได้ ไม่เหมือนกับทรานซิสเตอร์ที่มีทั้งอัตราขยายแรงดันและกระแสเมื่อเราจัดทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม

อัตราการขยายกำลังของทรานซิสเตอร์จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งจะเห็นว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ RC ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ถ้าเราลองมองย้อนกลับไปดูวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 โดยไม่คำนึงถึงผลของตัวเหนี่ยวนำเพราะมีค่าน้อยมาก เราจะเห็นว่าความต้านทาน $r_{be}$ กับความจะไพฟ้า $C_T$ จะทำหน้าที่คล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน กล่าวคือ ที่ความถี่ต่ำ ๆ สัญญาณจะไหลผ่านความจะไพฟ้า $C_T$ ได้น้อย สัญญาณส่วนมากจึงไหลมาทางความต้านทาน $r_{be}$ ทำให้กระแส $I_B$ มีค่ามาก แหล่งจ่ายกระแส $BI_B$ ทางด้านคอลเล็กเตอร์จึงมีค่ามากด้วย แต่เมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นสัญญาณก็จะไหลผ่านความจะไพฟ้า $C_T$ ได้มากขึ้น ทำให้กระแส $I_B$ ที่ไหลผ่านความต้านทาน $r_{be}$ มีค่าน้อยลง แหล่งจ่ายกระแส $BI_B$ ก็จะมีค่าน้อยลงตามอัตราขยายกำลังของทรานซิสเตอร์จึงมีค่าน้อยลงเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยมีอัตราการลดลงเป็น 6 dB/ออกเตฟ กล่าวคือทุก ๆ ครั้งที่ความถี่เพิ่มขึ้น 1 เท่า อัตราขยายกำลังจะลดลงไป 6 dB ความถี่ที่ทำให้อัตราขยายกำลังของทรานซิสเตอร์ลดลงจนเป็น 0 dB หรือมีอัตราขยายอยู่ ถ้าความถี่สูงเกินกว่าค่านี้แล้วก็จะเกิดการลดทอนสัญญาณขึ้นในตัวทรานซิสเตอร์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้ ถ้าดูจากรูปก็คือตรงความถี่ที่เขียนว่า "$f_{max}$" ส่วนในคู่มือของทรานซิสเตอร์มักนิยมเขียนสั้น ๆ ว่า $f_y$ อัตราขยายกำลังของทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **อัตราขยายกำลังแบบยูนิแลตเตอร์รัลไลซ์ (Unilateralized)** คือ อัตราขยายกำลังของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเราคิดว่าไม่มีการป้อนกลับแบบลบอันเนื่องมาจากความต้านทาน $r_{bc}$ กับความจะไพฟ้า $C_c$ เกิดขึ้นในตัวทรานซิสเตอร์ ทำให้อัตราขยายกำลังแบบนี้มีค่ามากกว่าอีก 2 แบบหลังดังที่จะกล่าวต่อไป ซึ่งเป็นแบบที่คิดถึงผลของการป้อนกลับ เพราะว่าเมื่อมีการป้อนกลับแบบลบเกิดขึ้นจะทำให้อัตราขยายกำลังของทรานซิสเตอร์มีค่าลดลง

2. **อัตราขยายกำลังแบบนิวตรัลไลซ์ (Neutralized)** เป็นอัตราขยายกำลังแบบที่คิดถึงผลของการป้อนกลับที่เกิดขึ้นด้วย แต่จะคิดเฉพาะผลของความต้านทาน $r_{bc}$ เท่านั้น จะถือว่าไม่มีความจะไพฟ้า $C_c$ เกิดขึ้น หรือคิดอีกอย่างว่าได้ทำการนิวตรัลไลซ์ความจะไพฟ้า $C_c$ ทิ้งแล้ว




**กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่**

3. **อัตราขยายกำลังแบบอันนิวตรัลไลซ์ (Unneutralized)** เป็นอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายกำลังที่คิดตรงกันข้ามกับแบบที่ 2 คือจะคิดแต่ผลของการป้อนกลับอันเนื่องจากความจุไฟฟ้า $C_c$ เท่านั้น ผลของความต้านทาน $r_{bc}$ จะไม่นำมาคิดรวมด้วย อัตราขยายกำลังแบบนี้จะมีค่าน้อยที่สุดในทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาก เพราะค่ารีแอกแตนซ์ของความจะไฟฟ้า $C_c$ จะมีค่าขึ้นกับความถี่ ยิ่งความถี่สูงขึ้นการป้อนกลับก็ยิ่งมีมากขึ้น อัตราขยายจึงมีค่าน้อยลง ไม่เหมือนกับความต้านทาน $r_{bc}$ ซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ อีกทั้งยังมีค่าความต้านทานมากอีกด้วย จึงทำให้การป้อนกลับมาค่าน้อยมาก

อัตราขยายกำลังแบบยูนิแลตเตอร์รัลไลซ์กับแบบนิวตรัลไลซ์มีค่าต่างกันน้อยมาก จนเราสามารถประมาณให้มีค่าเท่ากันได้ เนื่องจากความต้านทาน $r_{bc}$ มีค่าสูงมากจนไม่นำมาคิดได้ซึ่งก็จะทำให้อัตราขยายกำลังแบบนิวตรัลไลซ์กลายเป็นแบบยูนิแลตเตอร์รัลไลซ์ดังนั้นอัตราขยายของทรานซิสเตอร์จึงนิยมคิดแบบนิวตรัลไลซ์เพราะในทางปฏิบัติสามารถทำได้ง่ายกว่าแบบยูนิแลตเตอร์รับไลซ์

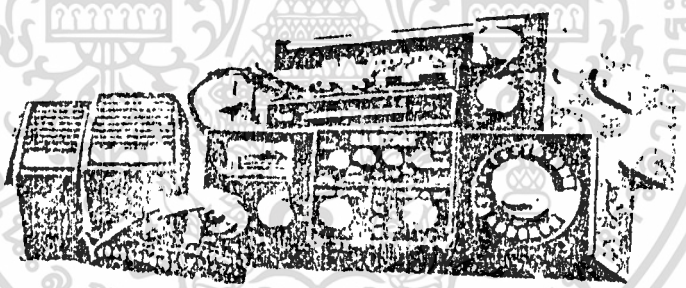
อัตราการขยายกำลังแบบนิวตรัลไลซ์ จำเป็นจะต้องมีการนิวตรัลไลซ์ความจะไฟฟ้า $C_c$ ทิ้งให้เหลือแต่ความต้านทาน $r_{bc}$ แต่เพียงอย่างเดียว การนิวตรัลไลซ์สามารถทำได้โดยการต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้าไปที่ระหว่างขาคอลเล็กเตอร์กับขาเบสของทรานซิสเตอร์โดยให้มีขนาดและเฟสของการป้อนกลับจากคอลเล็กเตอรีมายังเบสสัญญาณไปหักล้างกับการป้อนกลับที่เกิดขึ้นภายในตัวทรานซิสเตอร์พอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6 วงจรออสซิลเลเตอร์

ออสซิลเลเตอร์ มีความหมายในตัวเองแปลว่าสิ่งที่แกว่งไปแกว่งมา สำหรับกรณีของวงจรอิเลคทรอนิคส์ ออสซิลเลเตอร์มีความหมายถึงการเปลี่ยนแปลงไปมาของแรงดันหรือกระแสระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด หรืออาจกล่าวได้ง่าย ๆ ก็คือเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนั่นเอง

วรจรออสซิลเลเตอร์ส่วนใหญ่จะให้สัญญาณรูปซายน์ ดังนั้นวงจรออสซิลเลเตอร์จึงถูกนำมาใช้งานในวรจรเครื่องส่ง วงจรสร้างสัญญาณเสียงดนตรี วงจรในเครื่องมือพวกสร้างสัญญาณเสียงและเป็นวรจรต้นกำเนิดสัญญาณความถี่ต่าง ๆ นอกจากนี้วงจรออสซิลเลเตอร์ยังเป็นวรจรในส่วนประกอบย่อยของวรจรอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก



เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างสัญญาณต่าง ๆ

---

การกำเนิดสัญญาณด้วยวรจรออสซิลเลเตอร์มีได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีลักษณะสำคัญพิเศษอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่นให้ความถี่ต่ำ ๆ ดีเสถียรภาพทางความถี่ดี การปรับความถี่เป็นไปได้ยากหรือง่ายเป็นต้น ในบทนี้เราจะกล่าวถึงวรจรออุสซิล-เลเตอร์ทั่ว ๆ ไปที่มีใช้อยู่ในวงจรอิเลคทรอนิคส์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.6.1หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์**

วรจรออสซิลเลเตอร์ก็คือวรจรขยายชนิดหนึ่งนั่นเอง แต่เป็นวงจรขยายชนิดป้อนกลับ และที่สำคัญคือการป้อนกลับของสัญญาณจะมิได้ป้อนกลับในลักษณะลบเหมือนกับวงจรขยายป้อนกลับที่ได้กล่าวแล้ว ลองพิจารณาอัตราขยายแรงดันจากสมการการป้อนกลับของวรจรขยายจากบทก่อนดังนี้

$$A_V = \frac{A_V}{1-B_V}$$

จากตัวอย่างถ้าสัญญาณป้อนกลับมาที่อินพุทมีเพียง 5% และเป็นการป้อนกลับในลักษณะนำมาหักล้างกับสัญญาณอินพุทหรือป้อนกลับแบบลบ นั่นคือถ้า B = -.05 อัตราขยายแรงดันขณะไม่มีการป้อนกลับเป็น 100 อัตราขยายหลังการป้อนกลับจะมีค่าเท่ากับ 16.7

จะเห็นได้ว่าอัตราขยายหลังการป้อนกลับแล้วลดลงไป และถ้าเราลองมาพิจารณาในส่วนของเทอม $A_VB$ ดู ถ้าหากว่าเทอม $A_VB$ มีค่าเป็นบวก นั่นก็หมายความว่าเป็นการป้อนกลับแบบบวกอัตราขยายวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะทำให้เสถียรภาพของวรจรเลวลงมาก ครั้นถ้าพิจารณาดูให้ดีจะเห็นว่าถ้าเทอม $A_VB$ มีค่าเป็น 1 จะเป็นผลทำให้อัตราขยายของวงจรเพิ่มขึ้นจนเป็นอนันต์ (อินฟินิตี้) ซึ่งหมายความว่าแม้เพียงใส่อินพุทมาเพียงเล็กน้อยเอาท์พุทที่ได้ จะมากมายมหาศาลแต่ในทางเป็นจริงแล้วเอาท์พุทที่ได้จะเกิดขึ้นเองถึงแม้ว่า จะไม่ใส่อินพุทก็ตามนั่นหมายความว่าวงจรเกิดการออสซิล-เลชั่นนั่นเอง

สิ่งหนึ่งที่จะอธิบายในเรื่องของการป้อนกลับแบบ บวกให้เข้าใจก็คือ การพิจารณาในรูปของเฟสกับการป้อนกลับ สัญญาณป้อนกลับจากเอาท์พุทจะกลับเฟส 180 แล้วป้อนผ่านเข้ามาทางอินพุทใหม่ ดังนั้นสัญญาณที่เข้ามาจะมีทิศทางเสริมกับสัญญาณป้อนกลับซึ่งถ้าเฟสที่ป้อนกลับเข้ามาไม่ตรงกับวงจรขยายก็จะไม่ออสซิล์เลท(โดยปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรขยายทั่วไปสัญญาณเอาท์พุทจะมีเฟสต่างจากอินพุท 180 อยู่แล้ว)

เพื่อให้เข้าใจว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ทำงานได้อย่างไร ลองมาดูกันว่าถ้าให้สัญญาณขนาดเล็ก ๆป้อนเข้ามาทางอินพุทของวงจรขยาย สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะกลับเฟสแล้วมาเสริมกับอินพุทของวงจรขยายทำให้อินพุทมีขนาดเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เอาท์พุทที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย เมื่อป้อนกลับเข้ามาเสริมอีกก็จะให้เอาท์พุทได้ใหญ่ขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยปกติการเพิ่มขึ้นของสัญญาณจะถูกจำกัดที่ค่าแรงดันค่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อกลับมาแล้วก็เสมือนกับการป้อนกลับด้วยค่าแรงดันคงที่ วงจรจึงให้เอาท์พุทได้ที่ระดับแรงดันเสมือนกับคงที่คือการออสซิลเลทนั่นเอง

การออสซิลเลทหรือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุทจากค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุด มักจะเกิดการเปลี่ยนในลักษณะคลื่นรูปซายน์ ความถี่ของลูกคลื่นสามารถคำนวณหาได้จากค่าคงตัวของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร

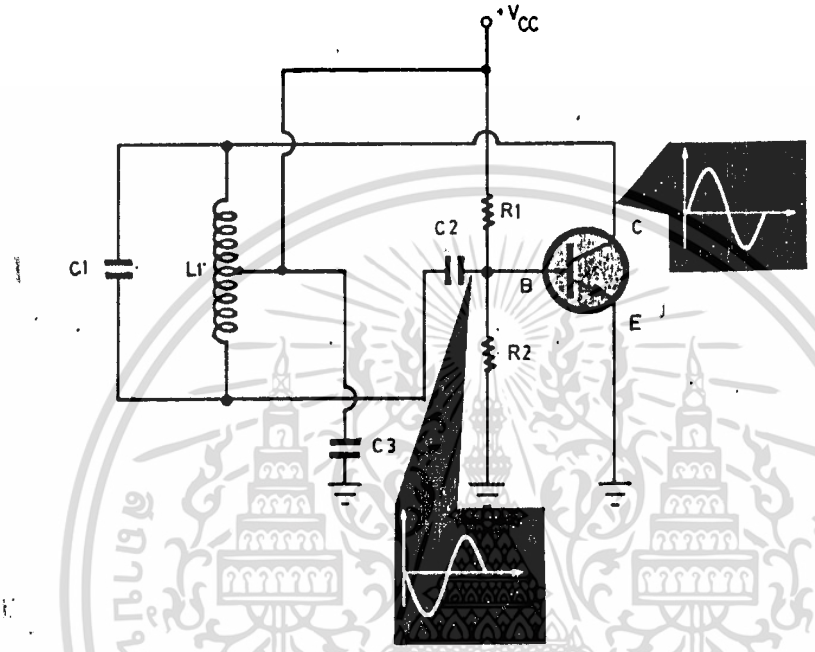
ในวงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปที่ใช้งานกันอยู่จะมีการออสซิลเลทได้ด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องมีการป้อนสัญญาณอินพุทเข้าไปแม้แต่น้อย ทั้งนี้เพราะสัญญาณที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการออสซิลเลทในขณะเริ่มต้นนั้นคือ สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ภายในอุปกรณ์นั่นแล้วและการออสซิลเลทจะเกิดขึ้นตลอดเวลาเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟตรงเลี้ยงวรจร

วรจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปมักจะมีการออสซิลเลทที่ความถี่เดียว ทั้งนี้เพราะวรจรป้อนกลับที่สัญญาณจากเอาท์พุทมายังอินพุท มักจะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์จำพวก R,L และ C ซึ่งก็เป็นที่แน่นอนว่าอุปกรณ์ L และ C ย่อมให้ผลทางด้านเฟส นั่นคือจะมีความถี่ที่เป็นผลทำให้เฟสที่ได้กลับมาเสริมกับอินพุทเกิดการออสซิลเลทหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ สัญญาณเอาท์พุทเมื่อผ่านวรจรป้อนกลับแล้วจะเป็นผลทำให้ผลคูณของ $A_V$ เติมกับค่า B ของวงจรป้อนกลับมีค่าเป็น 1 พอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6.2วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น

วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ทรานซิสเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.21




รูปที่ 4.21 วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้น

วงจรออสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 4.21 นี้มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าวงจร *ฮาร์ทเล่ย์-ออสซิลเลเตอร์* การทำงานของวงจรอาศัยหลักการป้อนกลับด้วยวงจรรีโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ $C_1$ และตัวเหนี่ยวนำ $L_1$ สัญญาณป้อนกลับจากเอาท์พุททางขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จะป้อนกลับผ่านวงจรจูน เมื่อกลับเฟส 180 ป้อนเข้ามาทางเบสของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวต้านทาน $R_1$ และ $R_2$ จะเป็นตัวไบแอสทรานซิส-เตอร์ให้ทำงานในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณ ส่วนตัวเก็บประจุ $C_2$ เปรียบเสมือนเป็นตัวคับปลิ้งสัญญาณเข้ามาทางอินพุท โดยปกติวงจรขยายชนิดขาอิมิตเตอร์ร่วมนั้นสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ทางขาคอลเลคเตอร์ จะมีทิศเฟสตรงข้ามกับสัญญาณทางอินพุทอยู่แล้วคือมีทิศทางเฟสต่างกัน 180 ผลของสัญญาณป้อนกลับจะมีทิศทางในทางเสริมกับสัญญาณอินพุททันที วงจรก็จะออสซิลเลทได้

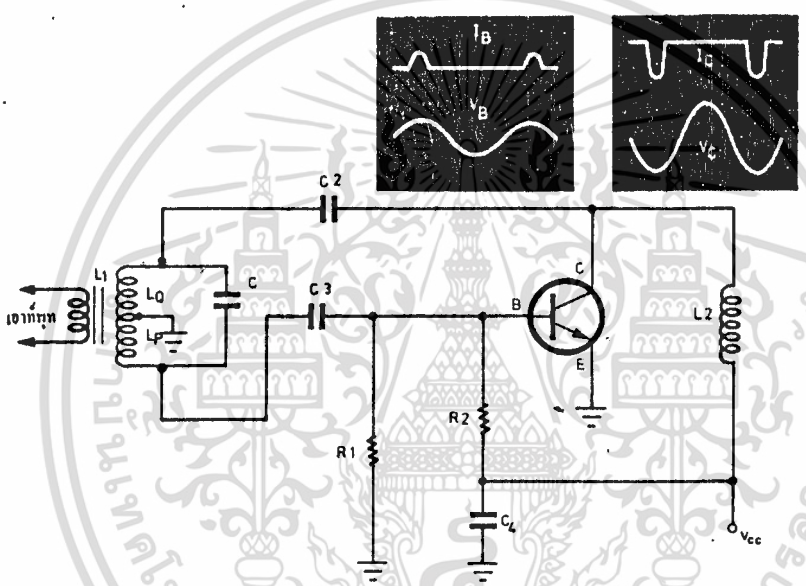
การทำงานในแต่ละรอบของการออสซิลเลทพอจะอธิบายได้ดังนี้ ในขณะเริ่มแรกของการออสซิลเลทจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นผลป้อนกลับมาทางด้านอินพุททางเบสกระตุ้นที่เบส โดยถ้ากระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นทางค่ามากจะทำให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์ลดลง การป้อนกลับจะกระตุ้นเข้ามาที่เบสด้วยค่าแรงดันน้อยลงเป็นผลทำให้กระแสลดลง และแรงดันคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะสูงขึ้นเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

ตัวเก็บประจุ $C_3$ ของวงจรตามรูปที่ 4.21 เป็นทางผ่าน (bypass) ของสัญญาณไฟสลับ และในทำนองเดียวกันก็จะเป็นตัวกั้นแรงดันไฟตรงเพื่อไม่ให้สัดลงกราวนด์ความถี่ของวงจรได้จากความถี่ของวงจรได้จากความถี่รีโซแนนซ์ของ $L_1$ และ $C_1$ ซึ่งเราสามารถปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ได้ด้วยการปรับค่าของ $L_1$ หรือ $C_1$ นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.3 วงจรออสซิลเลเตอร์ย่านความถี่สัญญาณวิทยุ

**วงจรออสซิลเลเตอร์ทรานซิสเตอร์** วรจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไปสามารถออสซิลเลทได้ที่ความถี่ไม่สูงมากนักแต่ถ้าเราเลือกค่าอุปกรณ์และวงจรออสซิลเลเตอร์ให้ถูกต้องแล้ววงจรสามารถออสซิลเลทได้ถึงย่านความถี่วิทยุ




**รูปที่ 4.22** วงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ที่แสดงลักษณะคลื่นของสัญญาณ

จากรูปที่ 4.21 เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ย่านความถี่วิทยุวงจรหนึ่งมีชื่อว่าวงจร *ฮาร์ทเลย์ ออสซิลเลเตอร์* อาศัยหลักการต่อป้อนกลับโดยนำสัญญาณที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ต่อเข้าอนุกรมกับวงจรรีโซแนนซ์ ในบางครั้งเราจึงเรียกวงจรนั้นว่า *วงจรป้อนอนุกรมฮาร์ทเลย์* (Series Feed Hartley) แต่เราสามารถจัดวงจรเสียใหม่ได้ดังวงจรรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนกลับของสัญญาณจะผ่านวงจรจูนหรือรีโซแนนซ์ ในกรณีนี้คอลเลคเตอร์ต่อกับวงจรรีโซแนนซ์โดยการผ่านตัวเก็บประจุ $C_2$ แรงดันไฟเลี้ยงป้อนเลี้ยงทรานซิสเตอร์ทางขาคอลเลคเตอร์โดยผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ $L_2$ จะต้องมีค่ารีแอกแตนซ์สูงมากที่ความถี่ของการออสซิลเลท การต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าที่ขาคอลเลคเตอร์ก็เพื่อจุดมุ่งหมาย 2 ประการ ประการแรกเป็นความต้องการให้กระแสไฟตรงผ่านเข้าทางคอลเลคเตอร์ได้โดยตรง เพราะที่แรงดันไฟตรงตัวเหนี่ยวนำจะมีค่ารีแอกแตนซ์เป็น 0 อีกประการหนึ่งคือตัวเหนี่ยวนำจะเสมือนมีค่ารีแอกแตนซ์สูงมาก ที่ความถี่ของการออสซิลเลทจึงเสมือนเป็นการกันไฟตรงที่จะผ่านเข้าไปยังวงจรรีโซแนนซ์ลงกราวนด์ ทางจุดกึ่งกลางของขดลวด $L_Q$ และ $L_P$

ระดับของการป้อนกลับ และแรงดันไฟเลี้ยงมีผลอย่างมากต่อวงจรออสซิลเลเตอร์ดังตัวอย่างเช่น ในวงจรโลคัลออสซิลเลเตอร์ของเครื่องรับวิทยุ เราต้องการระดับสัญญาณเอาท์พุทของวงจรออสซิลเลเตอร์ต่ำ ๆ ดังนั้นการป้อนกลับจะมีข้อจำกับและแรงดันไฟเลี้ยงจะต้องมีค่าน้อยด้วย นั่นคือเราจะต้องให้วงจรทำงานอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นค่าเล็ก ๆ บนกราฟลักษณะสมบัติ

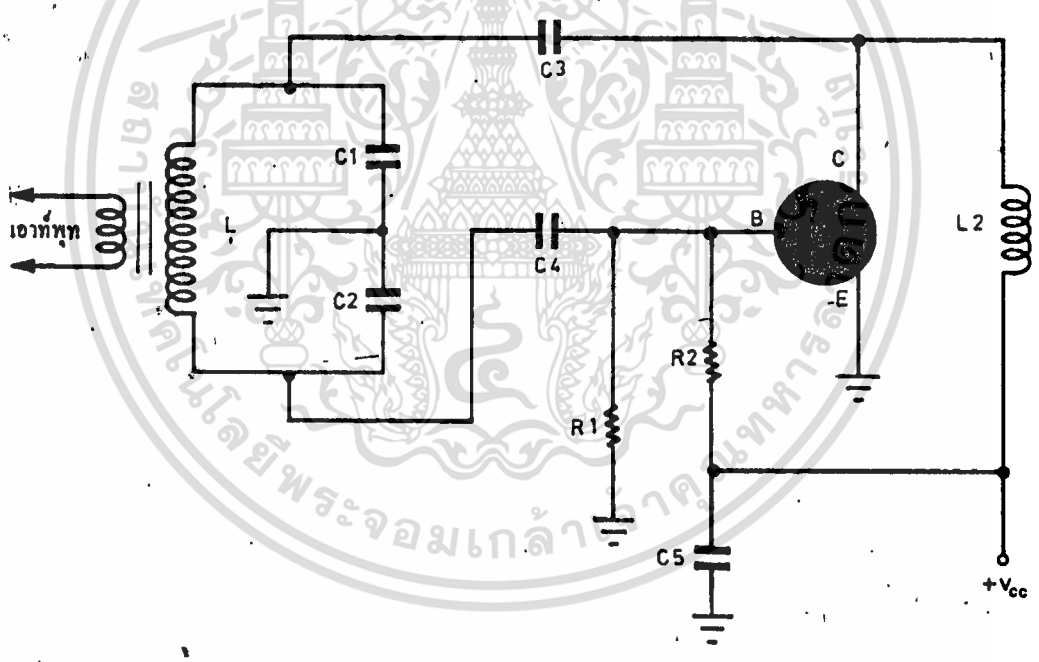
วงจรออสซิลเลเตอร์ส่วนใหญ่สร้าง สัญญาณที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะใช้กับวงจรทรานซิสเตอร์หรือวงจรหลอดสูญญากาศการทำงานของวงจรอาจจะต้องเลยออกนอกช่วงที่เป็นเชิงเส้นของกราฟลักษณะสมบัติสำหรับในกรณีนี้เราจะต้องใช้แรงดันไฟตรงเลี้ยงวงจรมีขนาดสูงได้และการเลือกแท็ปก็สามารถเลื่อนให้มีการป้อนสัญญาณมาก ๆ ได้ซึ่งสามารถเลื่อนจนกระทั่งวงจรทำงานอยู่ในระดับคลาสซี ดังรูปสัญญาณที่เขียนไว้ในรูปที่ 4.22 สังเกตดูว่าจะมีลักษณะสัญญาณทางด้านกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสเป็นพัลซ์ ดังนั้นเราสามารถจัดวงจรไบแอสด้วยค่า $R_2$ และ $R_1$ ใหม่ให้วงจรทำงานในช่วงคลาสซีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของการออสซิลเลทของวงจรสามารถคำนวณได้จากค่ารีแอกแนนซ์ของ $L_Q$, $L_p$ และ C ที่ต่อป้อนกลับ เพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์หาค่าความถี่ สมการของการหาค่าความถี่จะเป็นดังนี้

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi (L_p+L_Q)C)^{1/2}}$$

4.6.4 **วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์** วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.23




**รูปที่** 4.23 **วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์**

วงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ แตกต่างจากวงจรฮาร์ทเลย์ออสซิลเลเตอร์ในส่วนของลักษณะการต่อวงจร รีแอกแนนซ์ของวรจรป้อนกลับ ในวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ใช้ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็นสองตัว หรือกล่าวได้ว่าวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์มีลักษณะพิเศษในเรื่องการแท็ปที่ตัวเก็บประจุ ทนที่จะเป็นตัวเหนี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแรงดันป้อนกลับจะปรากฏคร่อมตัวเก็บประจุ $C_2$ หรือระหว่างเบสหรือกราวนด์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C_2$ จะมีเฟสต่างจากแรงดันที่คอลเลคเตอร์ นั่นคือ สัญญาณจะมีลักษณะมีเฟสตรงกับสัญญาณที่เบสของทรานซิสเตอร์ ปริมาณของแรงดันเอาท์พุทที่ป้อนกลับมายังอินพุทหาได้จากค่าของตัวเก็บประจุ $C_1$ และ $C_2$ โดยปกติค่ารีแอกแตนซ์ของตัวประจุ $C_2$ ควรจะมีค่าน้อยกว่ารีแอกแตนซ์ของ $C_1$ หรือกล่าวได้ว่าตัวเก็บประจุ $C_1$ ควรจะมีค่าความจุน้อยกว่าตัวเก็บประจุ $C_2$ นั่นเอง

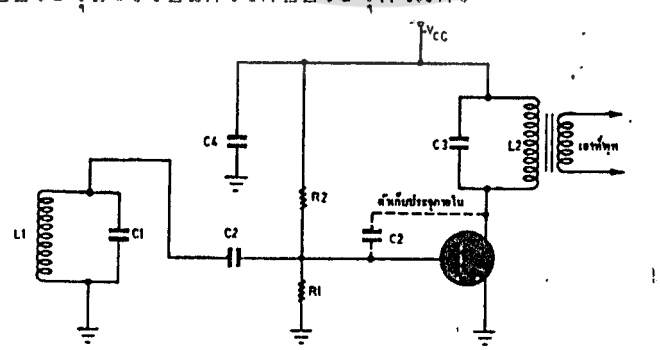
ความถี่ของวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$f_{OSC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{c_r L}}$$

เมื่อค่า $C_T$ คือผลรวมของตัวเก็บประจุ $C_1$ และ $C_2$ หรือ $C_R = \frac{C_1 c_2}{C_1 + C_2}$

**4.6.5 วงจรออสซิลเลเตอร์คลิก จูนอินพุท จูนเอาท์พุท** วงจรที่แสดงใน รูปที่ 4.24 เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์แบบหนึ่งซึ่งเป็นวงจรที่มีใช้งานกันน้อย แต่มันมีความสำคัญเพราะว่าการทำงานของวงจรใช้หลักการเดียวกับวงจรออสซิลเลเตอร์ชนิดคริสตอล-ออสซิลเลเตอร์

ในวงจรออสซิลเลเตอร์ชนิดนี้ส่วนของการป้อนกลับจะอยู่ที่ตัวเก็บประจุภายในตัวทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุนี้จะเกิดขึ้นที่ตรงบริเวณรอยต่อของเบส-คอบเบค-เตอร์ ตัวเก็บประจุนี้จึงเป็นตัวเก็บประจุที่ไม่พึง

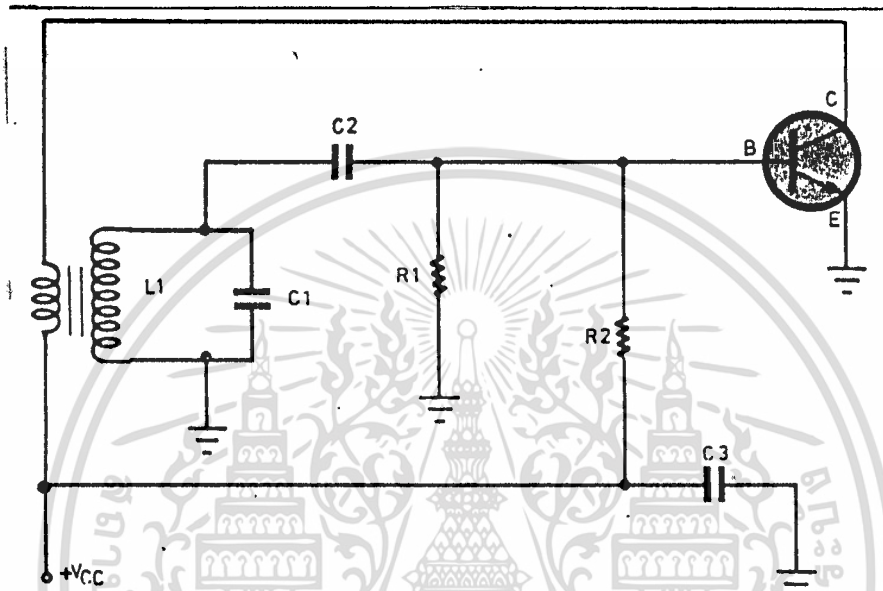



รูปที่ 4.24 วงจรออสซิลเลเตอร์ชนิด จูนอินพุท จูนเอาท์พุท

ปรารถนาในวงจรขยายสัญญาณ เพราะจะเป็นผลทำให้วงจรเกิดการออสซิลเลทได้ ตัวเก็บประจุตรงบริเวณรอยต่อจึงเสมือนเชื่อมต่อระหว่างอินพุทและเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรโดยตรงส่วนเอาท์พุทจะเป็นวงจรรีโซแนนซ์ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากที่ความถี่รีโซแนนซ์ และผลของการเลื่อนเฟสจะขึ้นอยู่กับส่วนของวงจรอินพุทรีโซแนนซ์ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมที่วงจรรีโซแนนซ์ทางด้านอินพุทและมีเฟสตรงข้ามกับแรงดันที่ตกคร่อมทางด้านเอาท์พุท




**รูปที่** 4.25 วงจรอาร์มสตรองออสซิลเลเตอร์

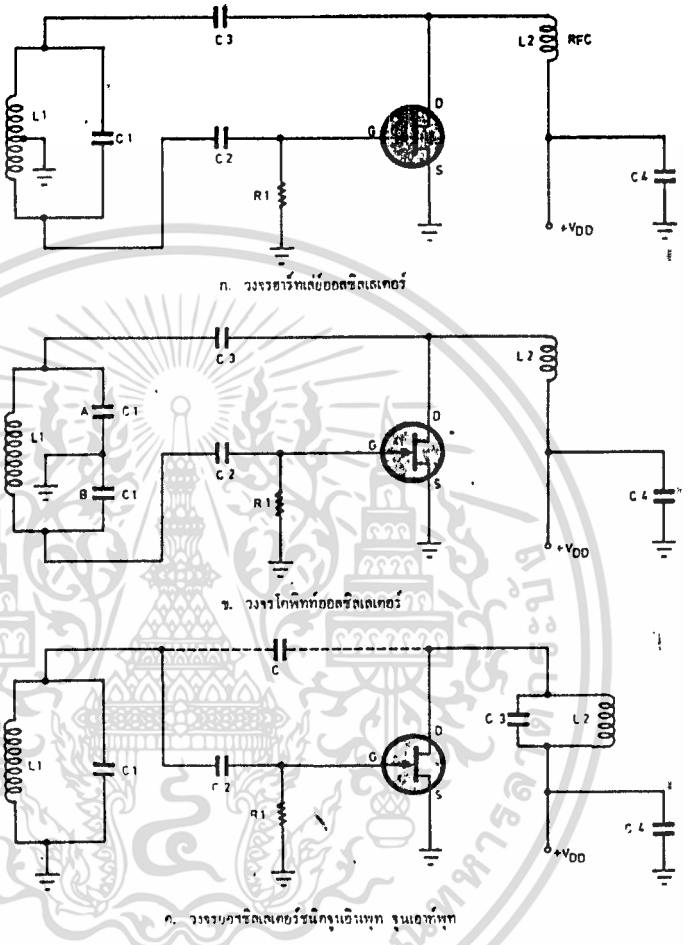
เราอาจจะให้การป้อนกลับระหว่าง อินพุทและเอาท์พุทเป็นไปได้โดยการต่อคัปปลิ้งร่วมด้วยหม้อแปลงซึ่งต่อเป็นวงจร ดังรูปที่ 16.6 วงจรดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกว่า *วงจรอาร์มสตรอง* (Armstrong) วงจรจะทำการป้อนกลับสัญญาณจากเอาท์พุทเข้ามาทางวงจรจูน $L_1$ $C_1$ ผ่าน $C_2$ เข้าเบสของทรานซิสเตอร์

**4.6.6 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ในย่านความถี่วิทยุที่ใช้ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์**

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์มีลักษณะการทำวงจรเช่นเดียวกับวงจรทรานซิสเตอร์ ซึ่งต้องอาศัยการป้อนกลับเช่นเดียวกัน แต่ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์มีข้อเหนือกว่าทรานซิสเตอร์ ในลักษณะทางด้านอินพุทอิมพิแดนซ์สูงมากเช่นเดียวกับหลอดสูญญากาศคือ ตัวฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ไม่ต้องมีวงจรจุดไส้หลอดเหมือนกับหลอดสูญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรออสซิลเลเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.26 ในส่วนของเกทของฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์จะต้องอยู่ในสภาวะไบแอสกลับระหว่างขั้วเกทกับขั้วซอร์ส ซึ่งก็เหมือนกับการไบแอสวงจรหลอดสูญญากาศนั่นเอง




**รูปที่ 4.26 วงจรออสซิลเลเตอร์ใช้ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์**

### 4.6.7 วงจรออสซิลเลเตอร์ใช้ผลึกควอร์ตซหรือคริสตอล

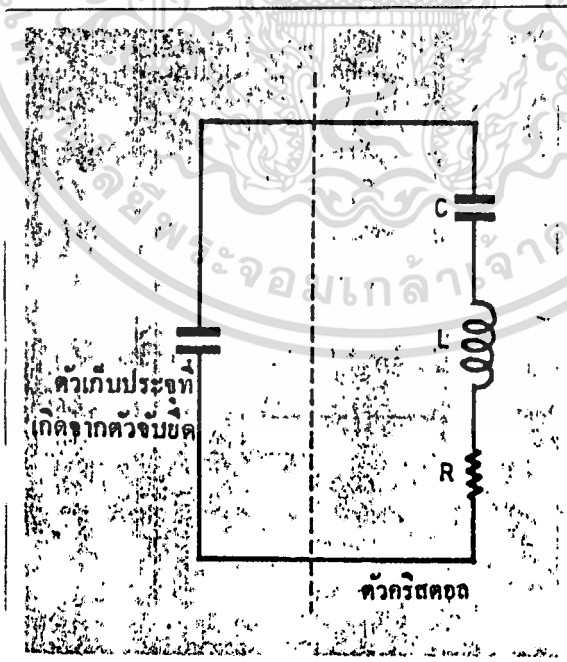
ในวงจรเครื่องส่วนใหญ่ที่ต้องการให้เสถียรภาพทางความถี่ของการส่งมีค่าสูง หรือความถี่มีค่าคงที่ตลอดเวลาเพื่อให้เครื่องรับสามารถจูนรับสถานีได้ถูกต้องและตลอดไป วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ให้คุณสมบัติเด่นในเรื่องเสถียรภาพทางความถี่ได้แก่ *วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์* นอกจากนี้วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ยังใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณที่มีความถี่มาตรฐานไว้สำหรับตรวจสอบเครื่องมือบางชนิด และยังใช้เป็นตัวสร้างแรงดันฐานเวลามาตรฐาน ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการความเที่ยงตรง เช่น นาฬิกาอิเลคทรอนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คริสตอลเป็นศัพท์ภาษาอังกฤษแปลว่า *ผลึก* โดยความหมายของตัวมันเองก็คือผนึกของวัสดุบางชนิด เช่น ผนึกควอร์ตซ เกลือหินรอเชลล์ และทัวร์มาลีน วัสดุเหล่านี้รวมเรียกว่า *พิโรอิเลคตริก* ซึ่งมีคุณสมบัติคือมันจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเมื่อบิดงอหรือกดผนึกเหล่านี้ด้วยแรง และในทางกลับกันถ้าหากเราสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับมันแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวผนึกเหล่านี้จะมีผลทำให้ผนึกของวัสดุเหล่านั้นมีรูปร่างบิดเบี้ยวผิดออกไปจากเดิม

คริสตอลที่ใช้งานอยู่ทั่วไปทำมาจากผนึกควอร์ตซ เมื่อมีแรงดันตกคร่อมผนึกควอร์ตซ ฯ ก็จะเกิดการสั่นความถี่ที่สั่นได้จะมีค่าเกือบคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของผนึกนั้น ความถี่ที่เกิดขึ้นจะยังคงเปลี่ยนแปลงได้อีกเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิ

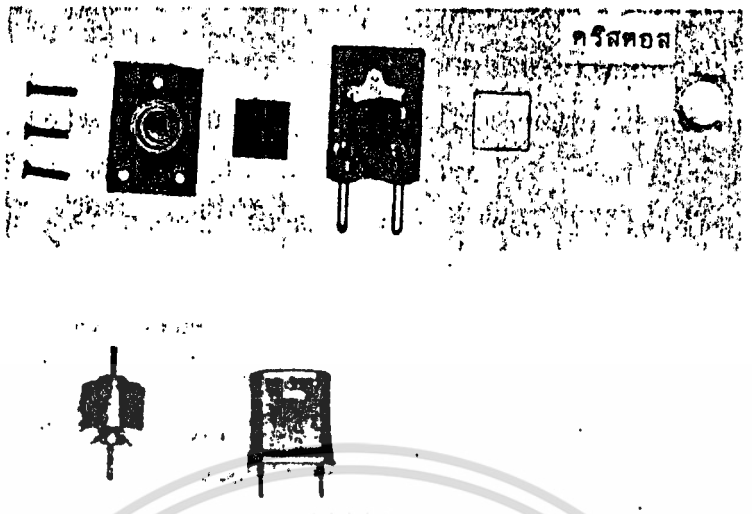
โดยหลักการแล้วลักษณะสมบัติของคริสตอล มีลักษณะคล้ายคลึงกับวงจรรีโซแนนซ์ที่สามารถเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 4.27




รูปที่ 4.27 วงจรสมมูลย์ของผนึกคริสตอล

ค่าตัวเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลย์ของตัวคริสตอลจะมีค่าสูงแต่มีค่าตัวเก็บประจุต่ำมาก รูปร่างและลักษณะของคริสตอลตลอดจนถึงโครงสร้างภายในแสดงให้เห็นดังวงจรรูปที่ 4.28

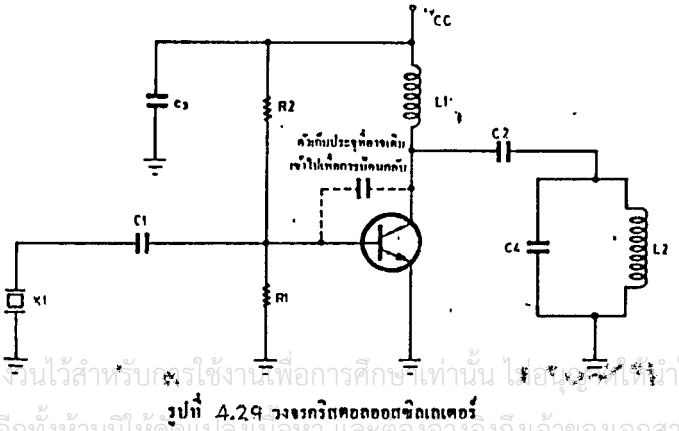
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 4.28 โครงสร้างและตัวอย่างรูปร่างคริสตอล

ตัวคริสตอลเป็นเพียงผนึกของควอร์ตซที่ยังต้องอาศัยตัวจับยึดเข้ากับกระป๋องโลหะดังนั้นในส่วนของตัวจับยึดคริสตอลจึงเกิด มีลักษณะเหมือนเป็นตัวเก็บประจุที่ขนานอยู่อีก 1 ตัวดังวงจรสมมูลย์รูป 4.27 แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุในตัวผนึกของคริสตอลที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ภายนอกจึงมีอิทธิพลต่อการออสซิลเลทของสัญญาณน้อยมาก และในขณะรีโซแนนซ์นั้นส่วนของวงจรรีโซแนนซ์แบบ อนุกรมและแบบขนาน เกือบจะให้ความถี่โซแนนซ์เป็นความถี่เดียวกัน

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้คริสตอลประกอบอยู่แสดงให้เห็นดัง รูปที่ 4.29 วงจรนี้จะมีลักษณะเหมือนกับวงจร ออสซิลเลเตอร์ชนิดจูนอินพุท-จูนเอาท์พุท ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วแต่มีข้อแตกต่างกันตรงส่วนอินพุทตรงส่วนของ ตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มแทนจูนอินพุท คือตัวคริสตอลนั่นเอง

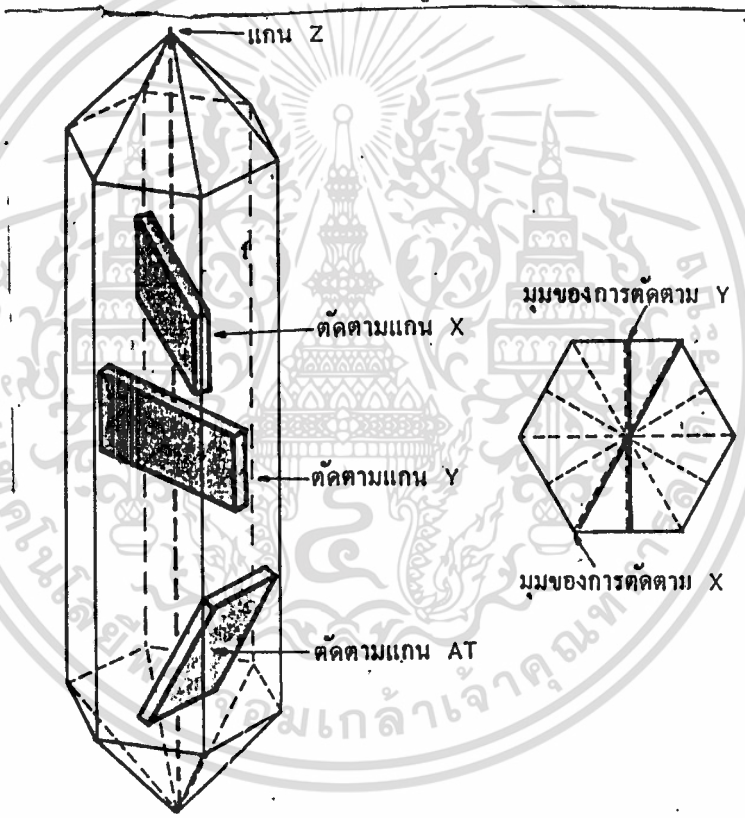



รูปที่ 4.29 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ให้เสถียรภาพทางความถี่สูงและ จากวงจรรูปที่ 4.29 ส่วนของเอาท์พุทก็ยังคงเป็นวงจรจูน โดยวงจรอาศัยตัวคริสตอลเป็นตัวกระตุ้นให้เบสทางาน ในบางวงจรค่าตัวเก็บประจุระหว่างเบส-คอลเลคเตอร์ที่อยู่ภายในตัวทรานซิสเตอร์มีได้มีผลต่อการออสซิลเลทเลย

ผนึกควอร์ตซที่ได้นี้เป็นวัสดุจำพวกซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีลักษณะเหมือนแก้วใน ส่วนของผนึกจะมีรูปร่างเป็น 6 ด้านเหมือนปริซึมโดยผนึกควอร์ตซที่ใช้งานจะได้รับการตัดด้วยลักษณะของแกน 3 แกนดังแสดงในรูปที่ 4.30




**รูปที่** 4.30 แสดงผลึกควอร์ตซและการตัดผลึก

แกน X เป็นแกนที่ลากระหว่างมุมสองมุมของแท่งปริซึม ส่วนแกน X จะเป็นแกนที่ลากตั้งฉากกับผิวหน้าของตัวคริสตอล นั่นคือถ้าหากตัดคริสตอลตามแนวผลึกจากมุมหนึ่งไปยังอีกมุมหนึ่งที่อยู่ตรงข้ามก็เรียกว่าการตัดแบบ X (X - cut) ซึ่งผลของการตัดแบบนี้จะทำให้ความถี่ที่ได้เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในลักษณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความถี่จะลดลง แต่ถ้าตัดในแนวแกน Y ก็จะเป็นผลทำให้ความถี่ของการสั่นสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะตัดในแกน X หรือ Y จะเป็นผลทำให้ความถี่ของการสั่นของคริสตอลขณะรีโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิได้มาก ดังนั้นเราจึงต้องหาทางตัดแกนใดแกนหนึ่งเพื่อให้ผลการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยที่สุดหรือแทบจะกล่าวได้ว่ามันไม่มีผลเลย แกนที่ใช้ในการตัดคือแกน AT ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.30

เราอาจจะตัดคริสตอลให้อยู่ในแกนอื่น ๆ ก็ได้ในแต่ละระนาบของการตัดจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ต่ออุณหภูมิ ตลอดจนความถี่ฮาร์โมนิคส์ที่ใช้งานแตกต่างกัน

ส่วนความหนาของแผ่นคริสตอล จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการรีโซแนนซ์ถ้าแผ่นคริสตอลยิ่งบางก็หมายความว่าความถี่ของการรีโซแนนซ์มีค่าสูงขึ้น แผ่นคริสตอลที่ทำความถี่ได้สูงประมาณ 15 MHz ไม่เกิน 50 MHz แต่ถ้าต้องการความถี่สูงกว่านี้อีกมักใช้ฮาร์โมนิคส์ของสัญญาณนั่นเอง

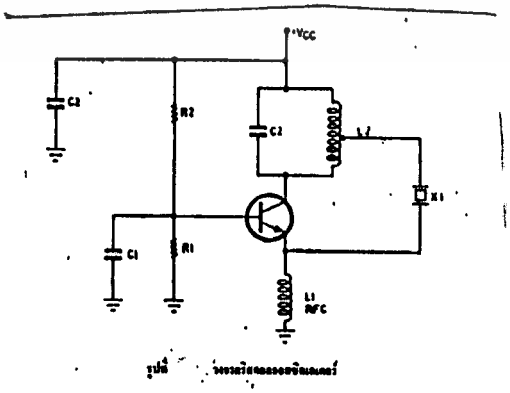
อุปกรณ์จำพวกคริสตอลเป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างบอบบาง ดังนั้นคริสตอลจึงต้องทำงานที่ระดับพลังงานต่ำ ๆ หรือในขณะใช้งานเป็นตัวกระตุ้น ในขณะที่ป้อนกลับระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทจะต้องไม่ให้ระดับแรงดันตกคร่อมตัวมันมากเกินไป ซึ่งจะทำให้คริสตอลทำงานผิดความถี่ และเกิดความร้อนกับตัวมันมากเกินไปซึ่งจะเป็นผลทำให้คริสตอลทำงานผิดความถี่ และถ้าเกิดความร้อนกับตัวมันสูงสุดจนมันเกิดเสียหายได้

จากที่กล่าวแล้วว่าเราใช้คริสตอลกระตุ้นวงจรออสซิลเลเตอร์ ก็เพื่อเหตุผลในเรื่องต้องการให้ได้ความถี่ที่มีค่าเสถียรภาพสูง ค่าเสถียรภาพของวงจรออสซิลเลเตอร์สามารถหาได้จากการกำหนดค่า Q ของตัวคริสตอลและสัมประสิทธิ์การผันแปรทางความถี่กับอุณหภูมิ ค่า Q ของคริสตอลมักจะมีค่าสูงกว่าค่า Q ของวงจรจูนที่ประกอบด้วย RLC ถึง 100 เท่า 1000 เท่า คริสตอลที่มีขายกันในปัจจุบันมีค่า Q ประมาณ 5000 ถึง 30000 เราจึงพอจะเห็นแล้วว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้คริสตอลจึงมีเสถียรภาพทางความถี่สูงกว่าวงจร LC ออสซิลเลเตอร์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์** จากวงจรรูปที่ 4.29 เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์แบบหนึ่งที่ทางานในลักษณะวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน ตัวคริสตอลจะต่อระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวคริสตอลที่ใช้มีหน้าที่ควบคุมความถี่แต่สาหรับวงจรในรูปที่ 4.30 ตัวคริสตอลทางานในลักษณะต่ออนุกรม ดังนั้นการรีโซแนนซ์จึงเกิดในสภาวะรีโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยให้ความถี่รีโซแนนซ์ผ่านตัวคริสตอลกลับป้อนเข้าไปยังวงจรทางด้านอินพุท (วงจรด้านเบสอิมิตเตอร์) ที่ความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่รีโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวคริสตอลจะมีค่าสูงมากดังนั้นสัญญาณเอาท์พุทจึงไม่สามารถป้อนกลับเข้ามายังอินพุทได้ แต่ครั้นสัญญาณที่ความถี่รีโซแนนซ์เกิดขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวคริสตอลจะลดลงต่ามาก ทาให้สัญญาณที่ความถี่นี้สามารถป้อนกลับเข้ามาได้

วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้คริสตอลที่แพร่หลายอีกแบบหนึ่งคือวงจรที่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.31 ลักษณะของวงจรนี้จะให้ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรต่ากว่าวงจรในนอกจากนี้ยังใช้ในวงจรเครื่องส่งบางเครื่องอีกด้วยการต่อของวงจรในรูปที่ 4.31 นี้เหมือนกับวงจรโคพิทท์ออสซิลเลเตอร์ โดยมีตัวเก็บประจุที่เป็นวงจรสมมูลย์ดูรูป ข. คือ $C_x$ และ $C_{1n}$ โดยที่ $C_x$ เป็นตัวเก็บประจุที่เกิดจากคริสตอลส่วน $C_{1n}$ คือค่าตัวเก็บประจุอินพุทของวงจรทรานซิสเตอร์เอาท์พุทที่ขาคอลเลคเตอร์จะต่อลับตัวเหนี่ยวนาเป็นโหลด หรือจะใช้ตัวต้านทานเป็นโหลดก็ได้



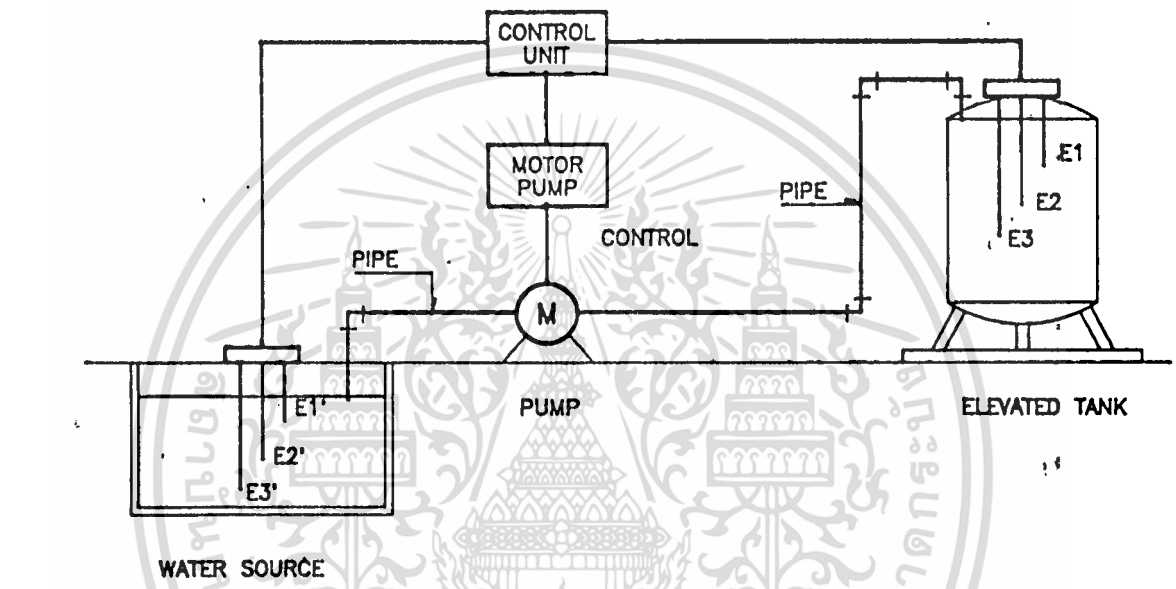

รูปที่ วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## หลักการและทฤษฎีของ floatless flow liquid

จากการได้ทราบเกี่ยวกับการควบคุม ระดับของเหลวโดยใช้ folatless flow liquid level เราสามารถนำหลักการนั้นมาใช้งานจริงโดยทำการควบคุมระดับดังรูป




รูป 5.1 หลักการทำงาน FLOATLESS FLOW LIQUID

หลักการทำงานก็คล้ายๆ กับที่มีชุดขด relay ชุดเดียว คือจะใช้ของอิเล็คโทรดคอยตรวจสอบระดับของน้ำแล้ว ส่งสัญญาณมาที่ส่วนที่ใช้ควบคุมไปควบคุมการทำงานของ relay และนำผลที่ได้จากส่วน relay ไปขับ (drive) ของชุดควบคุมของมอเตอร์ปั๊มโดยอาจต่อผ่านชุดของ magnetic coil เพื่อควบคุมการปิดเปิดของมอเตอร์ปั๊มและสามารถออกแบบชุดควบคุมระดับดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเข้ามาสั่งงานแทนรายละเอียดเกี่ยวพับการควบคุมระดับและเซ็คระดับโดยใช้คลื่นวิทยุมีดังนี้

### 5.1 การเซ็คระดับของสารแบบเป็นจุดหรือ set-point

สามารถกระทำได้หลายวิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดคือ วิธีใช้ตัวนำไฟฟ้าหรืออิเล็คโทรด หลักการทำงานของวิธีนี้ได้จากหลักที่ว่า "ถ้าสารใดมีความนำไฟฟ้าแตะระหว่างอิเล็คโทรดที่ระดับนั้นแล้วเกิดนำไฟฟ้าขึ้น เราสามารถนำสัญญาณนั้นไปใช้งาน sansor ได้ " จากหลักการดังกล่าวทำให้เราสร้างตัวเซ็คระดับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบวงจรอิเล็คโทรนิคและกำหนดให้สัญญาณไฟฟ้าที่อิเล็คโทรด เป็นความถี่กระแสสลับ เพราะว่าถ้าเป็นกระแสตรงก็อาจทำให้อิเล็คโทรดข้างใดข้างหนึ่ง สูญเสียอิเล็คตรอน ( สังเกตุปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ )

แท่งอิเล็คโทรดมักออกแบบเป็น สแตนเลส เพราะว่าทนต่อการกัดกร่อนได้ดีส่วนความถี่ที่ใช้อาจเป็น 50 HZ หรือเท่าไหร่ก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร นอกจากนี้ถ้าเราต้องการระดับและล่างเราสามารพควบคุมได้จาก ความยาวของอิเล็คโทรดในระดับที่เราต้องการ

5.2 <u>การเช็คระดับของสารอย่างต่อเนื่อง</u>

สามารถกระทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดคือวิธี ใช้ความถี่อุลตร้าโซนิค (สะท้อนวัตถุ) เพราะเป็นวิธีที่ง่ายสะดวกและไม่ต้องสัมผัสกับสารเลยแต่มีข้อเสียในเรื่องความหนาแน่นของอากาศ กับการเดินทางของเสียเราสามารถชดเชยได้ด้วยความต้านทางที่แปรผันตามอุณหภูมิ การวัดระดับสารโดยใช้ความถี่วิทยุเพราะ

<u>ข้อดีของการใช้คลื่นวิทยุ</u>

1 เนื่องจากการควบคุมบางครั้งต้องเดินสายระยะทางไกลมาก ๆ การใช้ความถี่วิทยุจะสามารถกระทำได้สะดวกกว่า

2 ความคล่องตัวขณะปฏิบัติงาน จะทำการควบคุมตำแหน่งใดก็ได้

3 เหมาะกับสถานที่ที่อันตราย เช่น โรงบรรจุถังแก๊ส , สารไวไฟ ซึ่งบางครั้งควบคุมด้วยสายจะทำได้ลำบาก แต่ใช้ความถี่วิทยุสามารถกระทำได้ทันทีและไม่ต้องกังวลเรื่องสายหลุด หรือไม่กล้าเข้าไปควบคุม

<u>ข้อเสียของการใช้คลื่นวิทยุ</u>

1 ถูกรบกวนจากสิ่งรอบข้างได้ง่าย

2 ถ้ามีความถี่เข้ามาแทรกจะไม่สามารถทำการติดต่อ ณ ความถี่นั้น ๆ ได้

3 การใช้ความถี่ที่ทำให้กลายเป็นผู้รบกวนความถี่ของวิทยุ โทรทัศน์เดิมที่มีอยู่

<u>การแก้ไขข้อเสีย</u>

ด้วยเหตุที่มีข้อดีดังกล่าวข้างต้นที่เป็นประโยชน์ต่อการใช้งาน ทำให้ project นี้ต้องออกแบบและแก้ไขข้อผิดผลาด ข้อเสียที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะสามารถใช้ตัวเช็คระดับอย่างสมบูรณ์แบบ จึงกำหนดวิธีการ รับ/ส่ง ข้อมูลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ให้สามารถควบคุมในระยะหวังผลด้วยการรับส่งอย่างมีประสิทธิภาพ

2 การส่งข้อมูลด้วยวิธีเข้ารหัสแบบดิจิตอล ทำให้ป้องกันการเสื่อนหรือการแทรกรบกวน แบบอนาล็อกไม่อาจเกิดขึ้นได้ และยังสามารถเช็คได้ว่ากำลังติดต่ออุปกรณ์ใดอยู่

3 การส่งข้อมูลต้องส่งตั้งแต่ 2 ความถี่ขึ้นไป เช่นกันตัวรับต้องรับได้ 2 ความถี่ขึ้นไป เพื่อป้องกันการแทรกจากความถี่ใดความถี่หนึ่ง

4 สามารถแจ้งได้ว่าขณะนี้ความถี่ใดถูกรบกวน

5 การส่งความถี่ออกไป ให้ส่งเท่าที่จำเป็น และส่งในเวลานั้น ๆ

การใช้งานผ่านความถี่วิทยุจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1 ตัวเช็คระดับแบบเป็นจุด (set-point)ผ่านคลื่นวิทยุ

2 ตัวเช็คระดับอย่างต่อเนื่องผ่านคลื่นวิทยุ

แบบที่ 1 จ. ให้ทำงาน เมื่อ ... จุ่มลงไปในระดับน้ำที่ต้องการ (ถ้าเป็นสารเคมี ควรเช็คให้แน่ใจก่อนว่าตัวนี้เช็คโทรดทนได้หรือไม่) หลังจากจุ่มลงไปแล้วให้ทำการคำนวณว่า ค่าความนำของน้ำสามารถ sensor หรือยัง เมื่อ sensor ระดับได้แล้วให้ส่วนต่าง ๆ เข้าประมวลทางด้านอิเล็คทรอนิคส์ โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทุกๆ 10 วินาที และข้อมูลของระดับจะถูกส่งเข้ารหัสอย่างต่อเนื่อง ถ้าการตรวจสอบมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น วงจร mono stable 1 และ 2 จะสั่งให้เครื่องส่ง 1 และ 2 ทำงานตามลำดับ (ส่งข้อมูลความถี่ 1 แล้วจึงส่งข้อมูลความถี่ 2 ) โดยความถี่ทั้ง 2 นี้ อยู่คนละย่านกัน เพื่อป้องกันการรบกวนที่เกิดขึ้น และการส่งความถี่ให้ส่งด้วยเวลาสั้น ๆ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนความถี่อื่นๆ ด้วย

ที่ภาครับจะพบว่า สามารถรับได้ทั้ง 2 ความถี่ โดยจะแปลข้อมูล 1 กับข้อมูล 2 แล้วเก็บเอาไว้เปรียบเทียบกัน ถ้าข้อมูลที่ความถี่ 1 กับ 2 ไม่ตรงกัน ให้ยึดข้อที่ 2 เป็นหลัก แต่ถ้าเกิดกรณีรับข้อมูลไม่ได้ (เพราะถูกรบกวนที่ความถี่หนึ่ง) เราสามารถตรวจได้จากรหัสที่เข้ามามีข้อมูลส่งมาด้วยหรือไม่ ถ้าไม่มีการส่งข้อมูลรหัสที่ความถี่นั้น ๆ มาแสดง ความถี่นั้นใช้งานไม่ได้ วงจรจะตัดสินใจเลือกความถี่ที่มีรหัสเข้ามาเท่านั้นความถี่จะใช้คือ 49 MHZ และ 109 MHZ

5.3 การเช็คระดับอย่างต่อเนื่องผ่านความถี่วิทยุ

เนื่องจากการเช็คระดับอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องส่งข้อมูลอยู่ตลอดเวลาเพราะเหตุนี้เอง การส่งความถี่หรือรับความถี่ อาจกระทำอย่างถาวรที่ความถี่ใด ๆ ก็ได้ สังเกตุจากบล็อกไดอะแกรมในที่นี้จะใช้แค่ความถี่เดียว

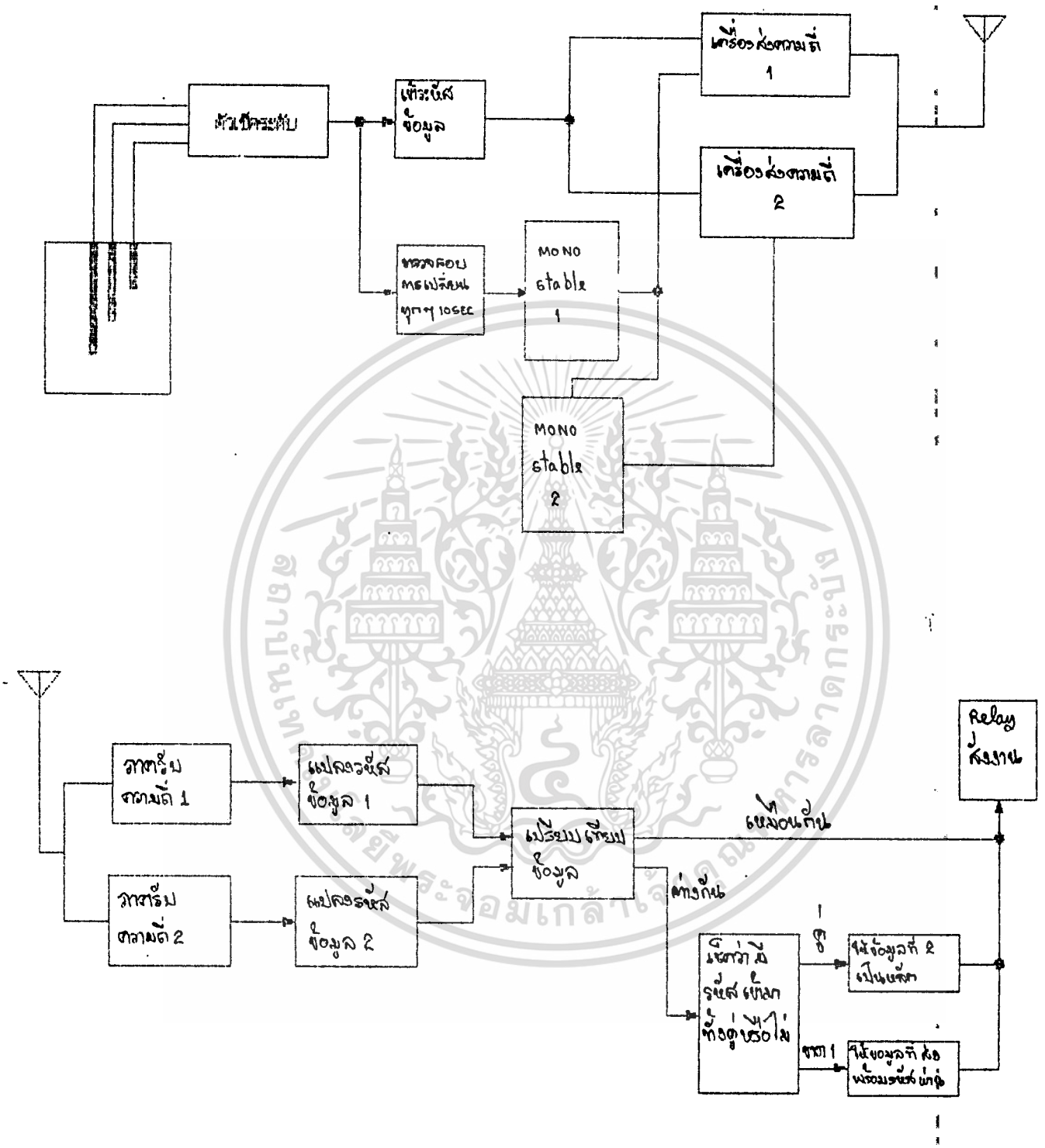
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของระบบอุลตร้าโซนิค จะกระทำได้โดยตัวส่งและตัวรับ ซึ่งใช้ความถี่เสียงที่ 40 KHZ ส่งผ่านอากาศและเจอวัตถุสะท้อนกลับมา เราวัดระยะของความห่างได้จากเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จนกระทั่งรับเข้ามา ซึ่งระยะเวลาในการเดินทางของเสียงในอากาศมีค่า 341 เมตร/วินาที ค่านี้สัมพันธ์กับความถี่ 17.05 KHZ กับ 2 KHZ ดังนี้คือ 17.05 KHZ * 2 = 34.1 K นั่นแสดงได้ว่าการวัดระยะทางทำได้โดยมีตัวนับสัญญาณในช่วงเวลาที่เสียงเคลื่อนที่

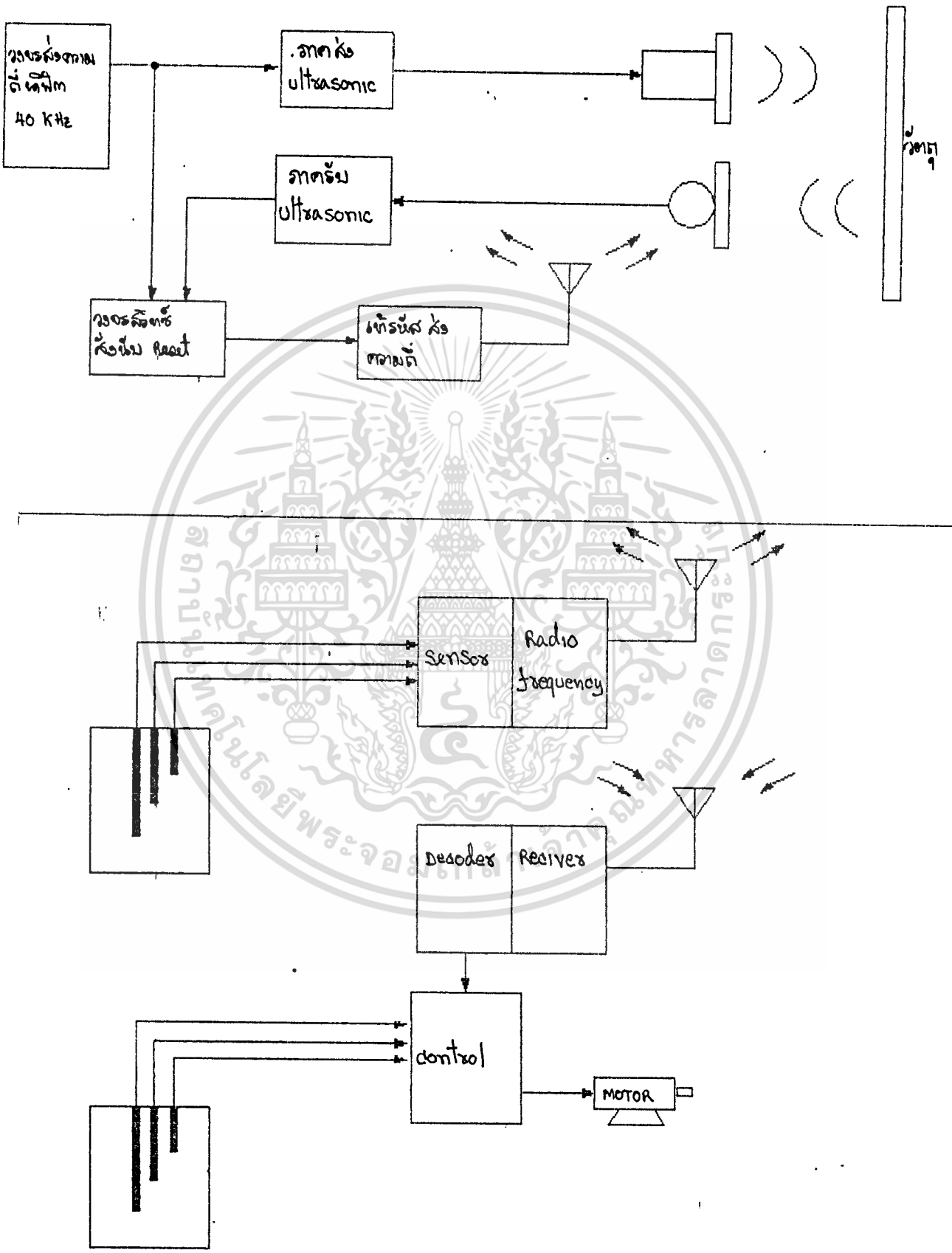
การใช้งาน จะต้องวางตัวเซ็คสัญญาณให้ขนานและตรงกับวัตถุที่ต้องการมากที่สุดถ้าเป็นถังแนวดิ่ง ก็ต้องตั้งฉากกับนั้นให้ได้ มิฉะนั้นการวัดจะผิดพลาดได้ และนอกจากนี้ ควรวางวัตถุกับตัวเซ็คสัญญาณให้ห่างในช่วงของการวัดด้วย (ไม่ใกล้มากหรือไกลมาก)

การส่งคลื่นจะส่งเป็นช่วง ๆ คือช่วงเริ่มเดินทางของเสียงและช่วงที่รับสัญญาณเสียง การส่งจะผ่านรหัสข้อมูลก่อนแล้วจึงส่งความถี่ออกไป เช่นกัน ตัวรับความถี่จะรับจากรหัสเข้ามาในช่วงนั้น ๆ แล้วนำมาแบ่งฐานเวลา และแสดงผลเป็นความถี่ออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



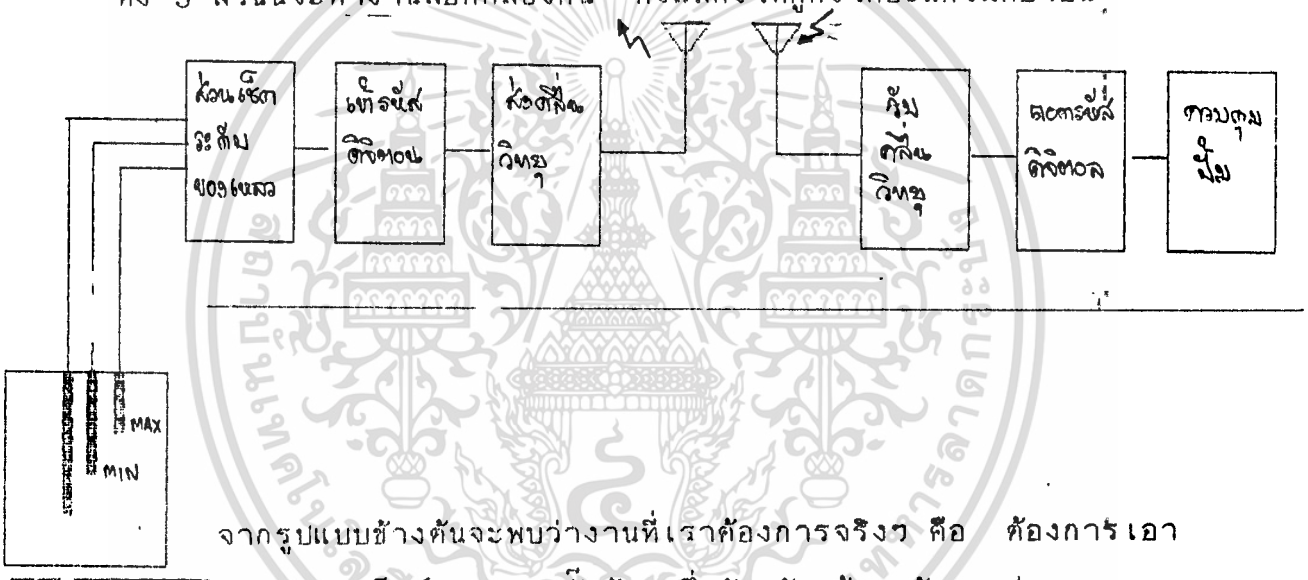

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเช็คสัญญาณระดับน้ำ โดยส่งเป็นคลื่นวิทยุ

ในการทดลองโปรเจกนี้เราได้อาศัยการทำงาน แบ่งเป็น 3 ส่วน หลักคือ

1. ส่วนเช็คระดับของเหลว
2. ส่วนรับส่งข้อมูลแบบดิจิตอล
3. ส่วนคลื่นวิทยุ

ทั้ง 3 ส่วนนี้จะทำงานสอดคล้องกัน ดังแสดงให้ดูดังไดอะแกรมต่อไปนี้




จากรูปแบบข้างต้นจะพบว่างานที่เราต้องการจริงๆ คือ ต้องการเอาระดับของของเหลวในแท็งค์ไปควบคุมปั๊มน้ำ ซึ่งปัจจุบันใช้งานกันแบบส่งสายควบคุม แต่ในโปรเจกนี้จะต้องอาศัยการส่งสัญญาณควบคุมโดยคลื่นวิทยุ และมีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนส่งทุกครั้ง เพื่อป้องกันการรบกวนจากผู้ใช้ความถี่ภายนอกอื่นๆ

การป้องกันสัญญาณรบกวนจากคลื่นวิทยุ สามารถกระทำได้เป็นๆ 2 วิธีคือ

1. ใช้การส่งข้อมูลเป็นแบบดิจิตอล และมีการใช้รหัสผ่าน
2. ใช้การส่งข้อมูลเป็นคลื่นวิทยุโดยใช้ 2 ความถี่ แต่ส่งข้อมูลเดียวกัน

1. การส่งข้อมูลแบบดิจิตอล และมีการใช้รหัสผ่าน

เราสามารถใช้การส่งแบบดิจิตอลเพื่อลดสัญญาณรบกวนได้ เพราะว่าข้อมูลในการส่งแบบดิจิตอลจะเป็นข้อมูลที่มีแต่ LOGIC HI หรือ LOW เท่านั้น แต่ข้อมูลแบบ ANALOG จะมีระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด เมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการส่งแบบ ANALOG หรือ DIGITOL แล้วพบว่า การส่งแบบ ANALOG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกแทรกได้ง่ายจากสนามไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้หากนำมาส่งด้วยตัวส่งสัญญาณ ANALOG จะทำให้ข้อมูลเพี้ยนได้ง่าย และเป็นเหตุให้เครื่องทำงานได้ผิดๆ

การส่งแบบ DIGITOL นี้มักจะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันด้วยข้อดีประการหนึ่งคือ ป้องกันการรบกวนได้ เพราะว่ามีระดับสัญญาณอยู่ 2 สถานะ ทำให้การรบกวนภายนอกที่จะมาให้เกิดสถานะเปลี่ยนแปลงกระทำได้ยาก เพราะสถานะทั้ง 2 มีระดับแรงดันห่างกัน ประกอบกับการส่งแบบดิจิตอลสามารถเข้ารหัสหรือแปลง CODE ของระบบได้ จุดนี้เองที่ทำให้ป้องกันการรบกวนได้อย่างดีเยี่ยมจากคลื่นรบกวนภายนอกและด้วยข้อดีดังหล่าว เรายังสามารถขยาย CHANNAL หรือเพิ่มช่องการรับส่งข้อมูลโดยข้อมูลของ IC ดิจอตอล

ในที่นี้เราใช้ตัวเข้ารหัสข้อมูลจาก IC สำเร็จรูปที่เป็นเบอร์ MC 145026 และตัวแยกรหัสด้วย IC เบอร์ MC 145027 (ข้อมูลจาก IC ทั้งคู่นี้ดูได้จากคู่มือ การใช้งานที่แนบมาในภาคผนวกด้านหลัง) ในที่นี้จะอธิบายข้อมูลอย่างคร่าวๆดังนี้

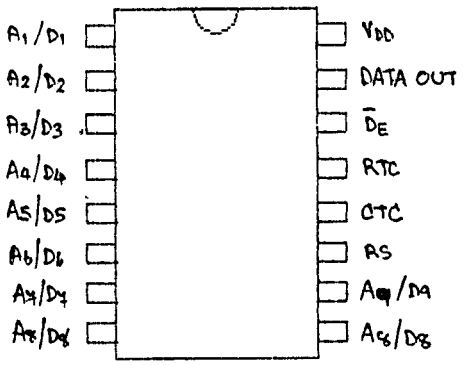
IC เบอร์ MC 145026-7 เป็น IC CMOS แบบ LOW-POWER COMPLEMENTORY MOS ซึ่ง IC อื่นในตระกูลเบอร์นี้เป็นเบอร์ MC 145028-9 ซึ่งทำหน้าที่เป็น IC DE CODER ด้วยกันทั้งคู่ แต่ต่างกันที่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวส่งได้หรือไม่

ข้อมูลของ IC MC 145026

เป็น IC เข้ารหัสดิจิตอล โดยสามารถเข้า LOGIC ได้ 3 สถานะ คือ HI , LOW , HI-Impedance นั่นหมายความว่าข้อมูลที่ต้องการส่งมี 9 บิท IC ตัวนี้จะแยกความแตกต่างได้ถึง $3^9$ หรือ 19 , 683 ความแตกต่าง

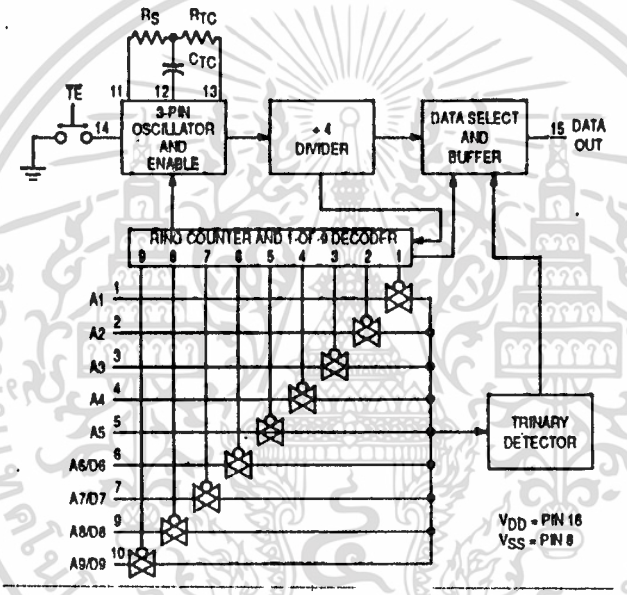
นอกจากนี้ IC เบอร์นี้ยังควบคุมการส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ TE ได้เพียงเส้นเดียว (หมายความว่า TE เป็นสัญญาณ LOGIC 0) ขาต่างๆแสดงดังรูปข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




แรงดันที่ใช้เหมือน C MOS ทั่วไปคือ 4.5 18 V

รูปแสดงขาต่างๆของ IC MC 145026




รูปแสดงบล็อกไดอะแกรมของ IC MC 145026

<u>อธิบายรายละเอียด</u>

$A_1/D_1$- $A_9/D_9$ = Address / Data input คือ ขา 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 โดยขาต่างๆนี้เป็นอินพุท และให้ข้อมูลเป็น Serially output

$R_s$ , $C_{tc}$ , $R_{tc}$ = ขาต่อกับอุปกรณ์กำเนิดความถี่ คือ ขา 11,12,13 โดยต่อ $R_s$ , $C_{tc}$ , $R_{tc}$ ตามลำดับ และหากต้องการต่อกับความถี่อันโดยตรง ให้ต่อเข้าที่ขา $R_s$ โดยตรง และปล่อยขา $R_{tc}$ และ $C_{tc}$ ลอยเอาไว้

TE = ขา Transmit - Enable input การใช้งานจะใช้สถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

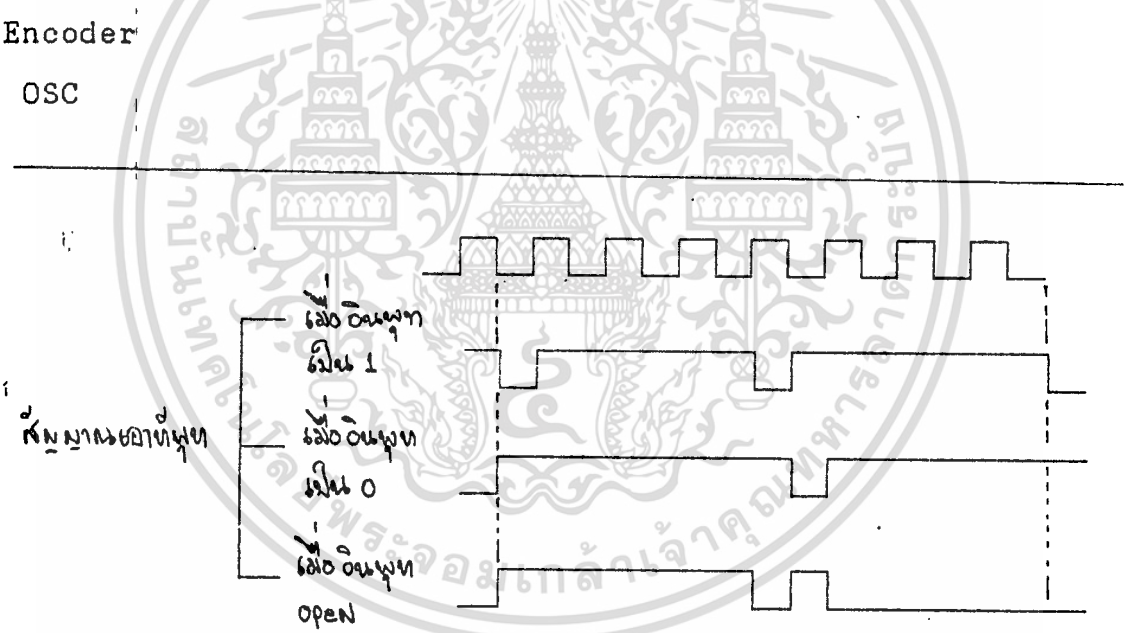
LOW และจะส่งข้อมูลออกไปได้ หากไม่ใช้งาน TE ควรมีการ pull up ด้วย logic Hi

Data output = ขาส่งข้อมูลคือขา 15 เป็นการส่งข้อมูลแบบอนุกรม Serial Output โดยรับข้อมูลจาก $A_1$/ $D_1$ Ag /$D_9$

VDD = ขาแหล่งจ่ายไฟบวก

VSS = ขาแหล่งจ่ายไฟลบ

การส่งข้อมูลของ IC MC 145026 จะส่งเป็นสัญญาณพัลซ์แตกต่างกันโดยแสดงให้ดูดังรูปดังนี้

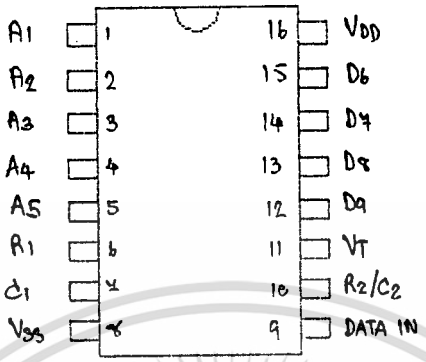



ข้อมูล IC MC 145027

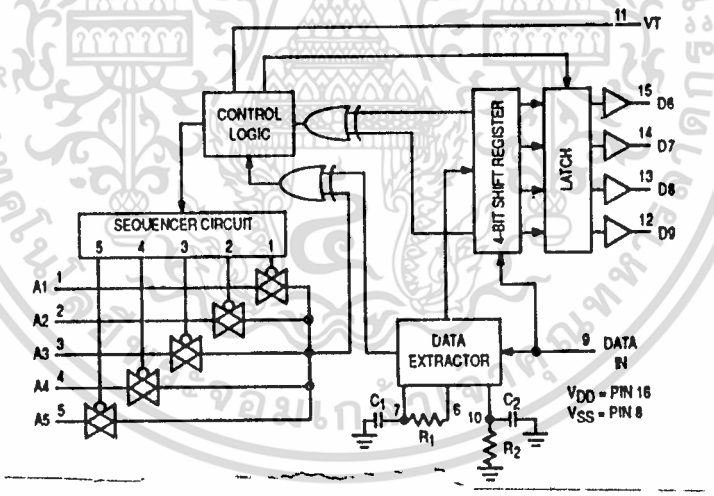
เป็น IC ถอดรหัสดิจิตอล โดยสามารถรับรหัสโดยตรงจาก IC MC 145026 ซึ่ง IC เบอร์นี้สามารถถอดรหัสและรับข้อมูลได้ในตัวเดียวโดย IC MC 145027 จะรับ Address ที่ส่งมาก่อน หากพบว่าได้ Address ตรงกันจึงส่งข้อมูลออกมาที่ขา DATA ($D_6$ - $D_9$) ขณะที่ได้ Address ตรงกัน จะพบว่าที่ขา $V_T$ (Valid Transmission) ได้ output logic Hi ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพร้อมที่จะรับข้อมูลได้ทันที แต่หาก $V_T$ เป็น Logic low แสดงว่า Address ไม่ตรงกัน หากรับข้อมูลขณะนี้ เราจะได้ข้อมูลที่ผิดพลาด ขาต่างๆของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IC MC 145027 แสดงได้ดังนี้




รูปแสดงขาต่างๆของ IC MC 145027



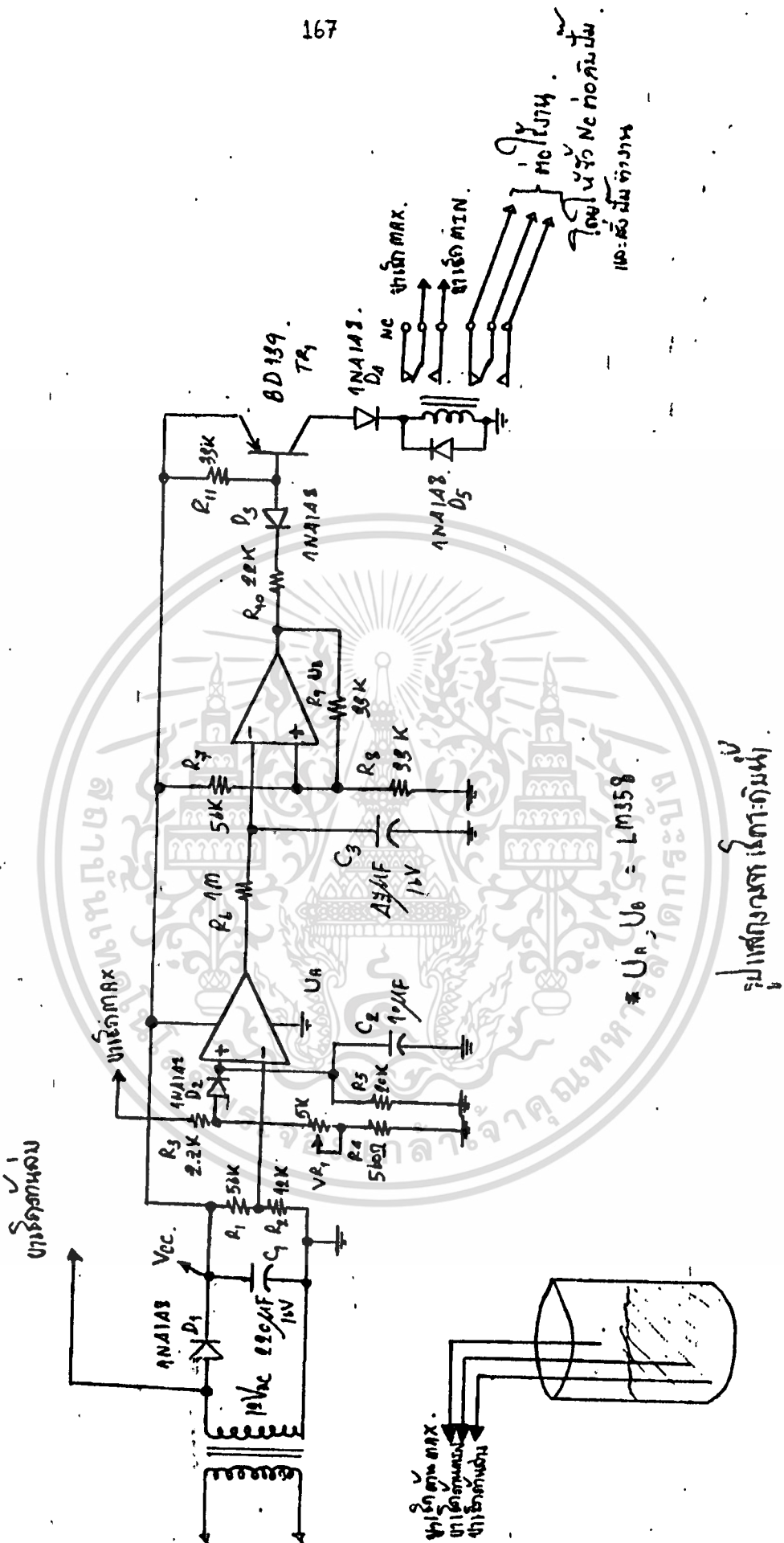

รูปแสดง Blook Diagram ของ IC MC 145027

<u>อธิบายรายละเอียดขาต่างๆได้ดังนี้</u>

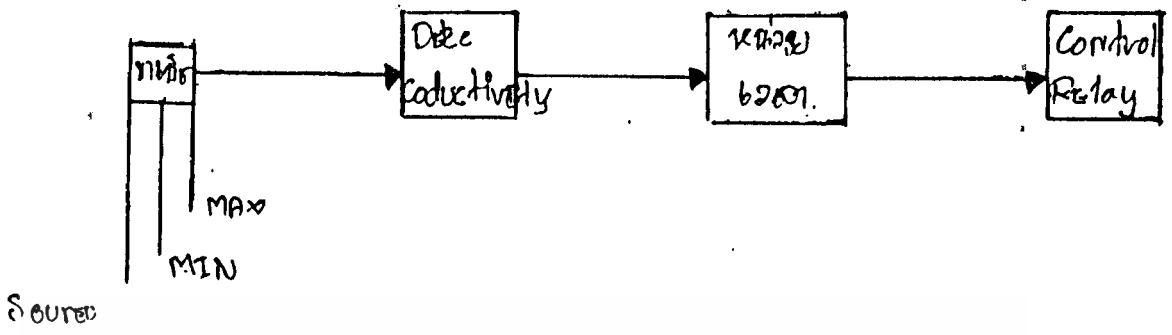
$A_1$ - $A_5$ = ขา Address เป็นขาที่ต้องแสดงสถานะ Address input เพื่อให้ตรงกับ Address ที่ส่งเป็นข้อมูลมาจาก Data in

$D_6$ - $D_9$ = ขา Data output เป็นขาที่ได้รับข้อมูลจากการถอดรหัสจาก input encoder และ input encoder นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




จากบล็อกไดอะแกรมอธิบายการทำงานได้ดังนี้ เริ่มจากขาเช็คระดับน้ำ อันประกอบด้วย แท่งอีเล็คโทรด 3 ขา คือ Source , Max and Min. โดยขา Source จะเป็นขาที่เสียบเข้าไปในน้ำเพื่อจ่ายไฟกระแสสลับโดยให้น้ำเป็นสื่อในการส่งระดับแรงดันไปยังขา Max and Min ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับน้ำ สัญญาณที่ส่งเข้ามาจะถูกนำมาเปรียบเทียบที่บล็อก Detec Conductirity เพื่อเช็คว่าสัญญาณระดับน้ำอยู่ในตำแหน่ง Max and Min หากพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะมีการหน่วงเวลาก่อน แล้วส่งไปยังภาค Control Relay เพื่อสั่งมอเตอร์ปั๊มน้ำหรือหยุดปั๊มต่อไป

การคำนวณค่าต่าง ๆ ในวงจรเช็คระดับน้ำ

จากรูปวงจรเช็คระดับน้ำเริ่มได้จาก หม้อแปลงเปลี่ยนแรงดันจาก 220 Vac โดยแรงดัน 12 Vac ส่วนหนึ่งจะใช้ต่อกับขาเช็คด้านล่างเพื่อเป็น Source ให้กับขาเช็คระดับ Max , Min และอีกส่วนจะแยกเป็นแหล่งจ่ายไฟเพื่อเลี้ยงวงจรแหล่งจ่ายไฟของวงจรนี้ ใช้แบบ Half ware Rectifier ก็พอเพียงแล้ว

การทำงานของภาค Detec Conductirity จะใช้ UA เป็นตัว Detec โดยอาศัยวงจร Comparator ระหว่างขาอินเวอร์ติ้งและนอนอินเวอร์ติ้ง ในที่นี้ให้ขาอินเวอร์ติ้งต่อระหว่าง $R_1$ กับ $R_2$ ซึ่งคำนวนแรงดันได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V \text{ ของ } UA = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times Vcc$$

$$= \frac{12k}{12x + 56X} \times 14\ V$$

$$= 2.47 \quad V$$ (ในการคำนวนหาค่า $R_1$ กับ $R_2$ อาจประมาณค่าเป็น 2.5 V. ได้)

ส่วนที่ขานอนอินเวอร์ติ้งจะถูกต่อเพื่อเซ็ตที่ระดับ Max. โดยเราสามารถคำนวนหาค่า $R_3$ , $R_4$ , $VR_1$ ได้ดังนี้

กำหนดค่าต้านทานของน้ำ $\sim$ 5x OHM

กำหนดให้ การเซ็ตระดับ CONDUCTIIVITY กันกระแสไม่เกิน 5 mA (เพื่อป้องกันการลัดวงจร) ดังนั้นจะได้

$$R_3 = \frac{12\ Vac}{5\ mA} = 2.33\ K$$ หรือ 2.2 K

เมื่อขาอินเวอร์ติ้งมีค่าแรงดันเท่ากับ 2.5 V ดังนั้นคำนวณหาค่า $VR_1 + R_4$ ได้ดังนี้

กำหนดค่า คตท.ของน้ำ 5 Kr หรือมากกว่า

$$2.5 = \frac{(Vr_1 + R_4)}{(VR_1 + R_4) + (5K + 2.2K)} \times 12$$

$$(2.5)\ [VR_1 + R_4 + 7.2K] = (12)(VR_1 + R_4)$$

$$7.2\ K = 4.8\ (VR_1 + R_4) - (VR_1 + R_4)$$

$$7.2\ K = 3.8\ (VR_1 + R_4)$$

$$VR_1 + R_4 = 1.89\ K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $VR_1$ ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 5 K และ $R_4$ มีค่า 560

ค่าของ $D_2$ , $R_5$ , $C_2$ ได้จากการประมาณคร่าวๆ เพื่อสามารถ Retifier สัญญาณจากขาเซ็คเท่านั้น ได้ $D_2$ , $C_2$ จะเป็น Half Have Retifier ส่วน $R_5$ เป็นตัวคายประจุให้ $C_2$

สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบ จะถูกนำไปผ่านวงจรหน่วยเวลาอันได้แก่ $R_6$ กับ $C_3$ ซึ่งกำหนดการหน่วงเวลาเอาไว้ที่ 5 วินาที นั่นคือ

$$T = R \times C = 5 \text{ Sec}$$

เลือก $= 1M \times 4.7\ \mu F = 4.7 \text{ Sec} \approx 5 \text{ Sec}$

$R_6 = 1M$

$C_3 = 4.7\ \mu F$

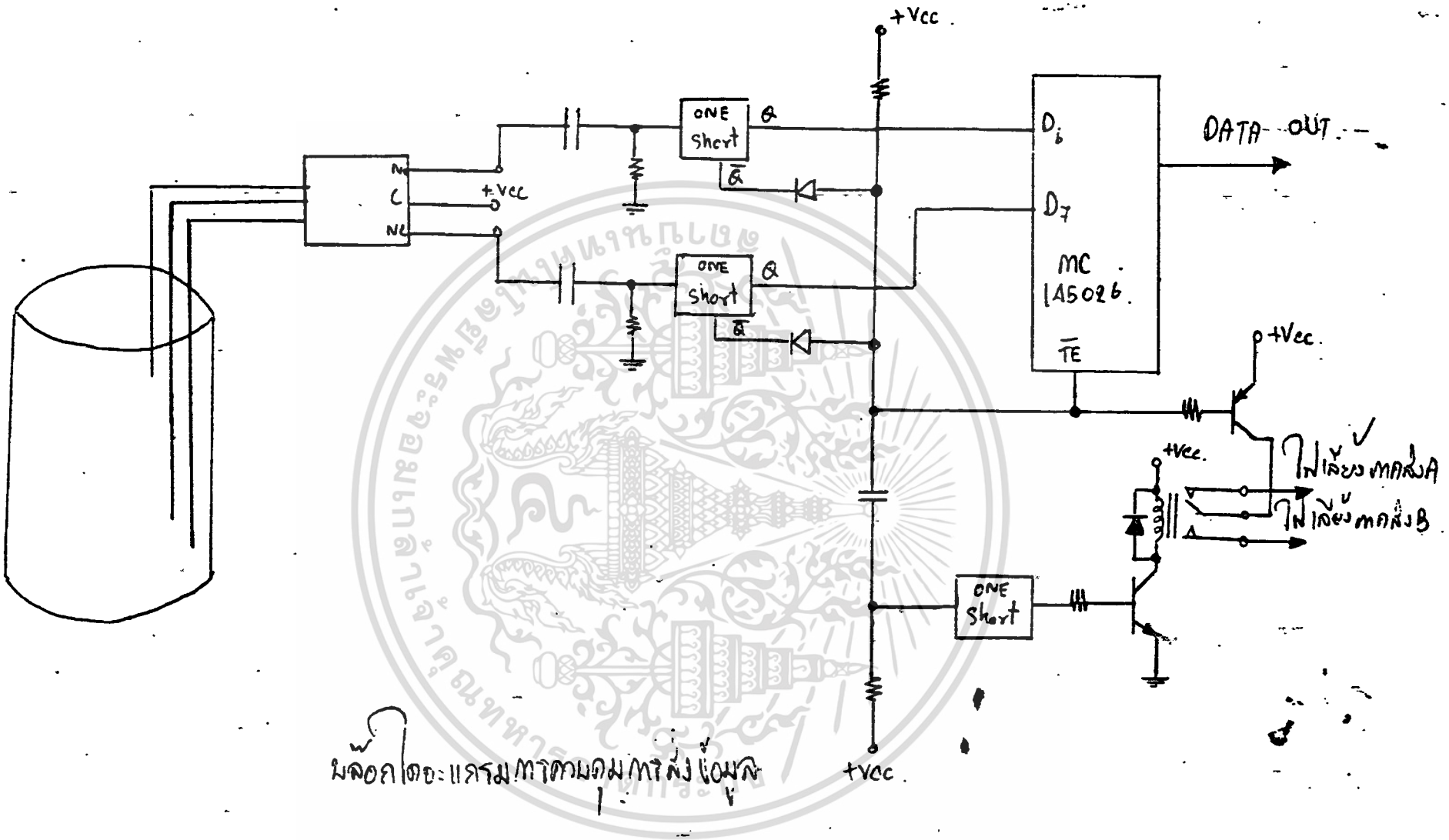
จะพบว่าค่า $R_6$ กับ $C_3$ จะหน่วงเวลาได้ 5 วินาที ก็ต้องขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรชนิดทริกเกอร์ $U_B$ ด้วย โดยปกติแล้วค่า หรือ R x C จะใช้ระดับแรงดันที่ 36.66 % ของ Vcc. นั่นหมายความว่าค่า $R_7$ , $R_8$ , $R_9$ จะต้องได้ สัดส่วนเพื่อเกิดแรงดันขนาด 0.366 เท่าของ Vcc. จากการทดลองหาค่า $R_7$ , $R_8$ , $R_9$ จะได้ค่าที่เหมาะสมคือ 56K , 33K , 33K ตามลำดับ ทดลองแทนค่าได้ดังนี้

$$36\% \quad 37\% = \frac{33K}{33K + 56K} \times 100\%$$

หลังจากได้สัญญาณที่หน่วงเวลาแล้วก็นำไปเข้าวงจรขับกระแส Relay โดยต่อ $TR_1$ ซึ่งเป็นแบบ PNP และกำหนด $R_{10}$ , $D_3$ เป็นตัว BIAS สั่งงาน Relay ส่วน $R_{11}$ เป็น R pull up ขา Base ของ $TR_1$ ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณสั่งงาน

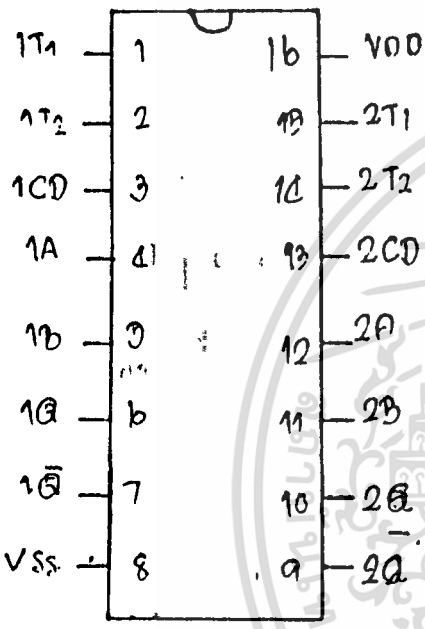
* หมายเหตุ สังเกตุการต่อ Contact Relay ที่ขาเซ็ค MAX , MIN จะพบว่า Relay เมื่อทำงานจาก $N_c$ เป็น $N_o$ แล้วก็ทำให้เซ็คสัญญาณที่ระดับขา MIN และหากไม่มีสัญญาณหรือ Conductivity แล้ว Relay จะถูกสั่งงานปั๊ม โดยการกลับเข้าสู่สภาวะ $N_c$ ดังเดิม วิธีการเช่นนี้จะช่วยลดการเปิด / ปิด ของปั๊มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

## การใช้งาน IC CMOS 4528 หรือ IC MONOSTABLE (ONE SHORT)



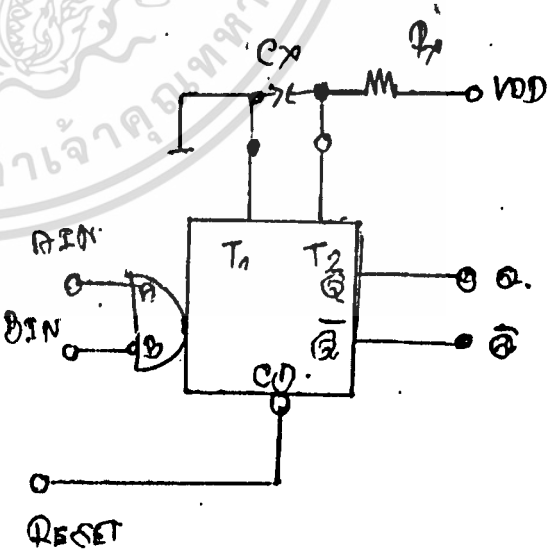

ลักษณะการใช้งาน IC ตัวนี้ จะต้องร่วมกับอุปกรณ์ $C_x$ กับ $R_x$ เพื่อกำหนดช่วงหน่วงเวลาและสามารถเลือกช่วงเวลาได้ จากตารางข้อมูล (ภาคผนวก)

IC ตัวนี้ 1 ตัวสามารถสร้างชุดหน่วงได้ 2 ชุด ดังแยกด้านซ้ายเป็นชุด 1 และด้านขวาเป็นชุดที่ 2

นอกจากนี้หากต้องการพลิกแพลงการใช้งานก็สามารถดูได้จากตารางข้างล่าง เพื่อการใช้งานที่เหมาะสม

รูปแสดงตำแหน่งขา

| INPUT | | | OUTPUT | |
|---|---|---|---|---|
| CD | A | B | Q | $\bar{Q}$ |
| L | X | X | L | H |
| X | H | X | L | H |
| X | X | L | L | H |
| H | ↑ | H | ⎍ | ⎍ |
| H | L | ↓ | ⎍ | ⎍ |




↑ = ขอบขาขึ้น

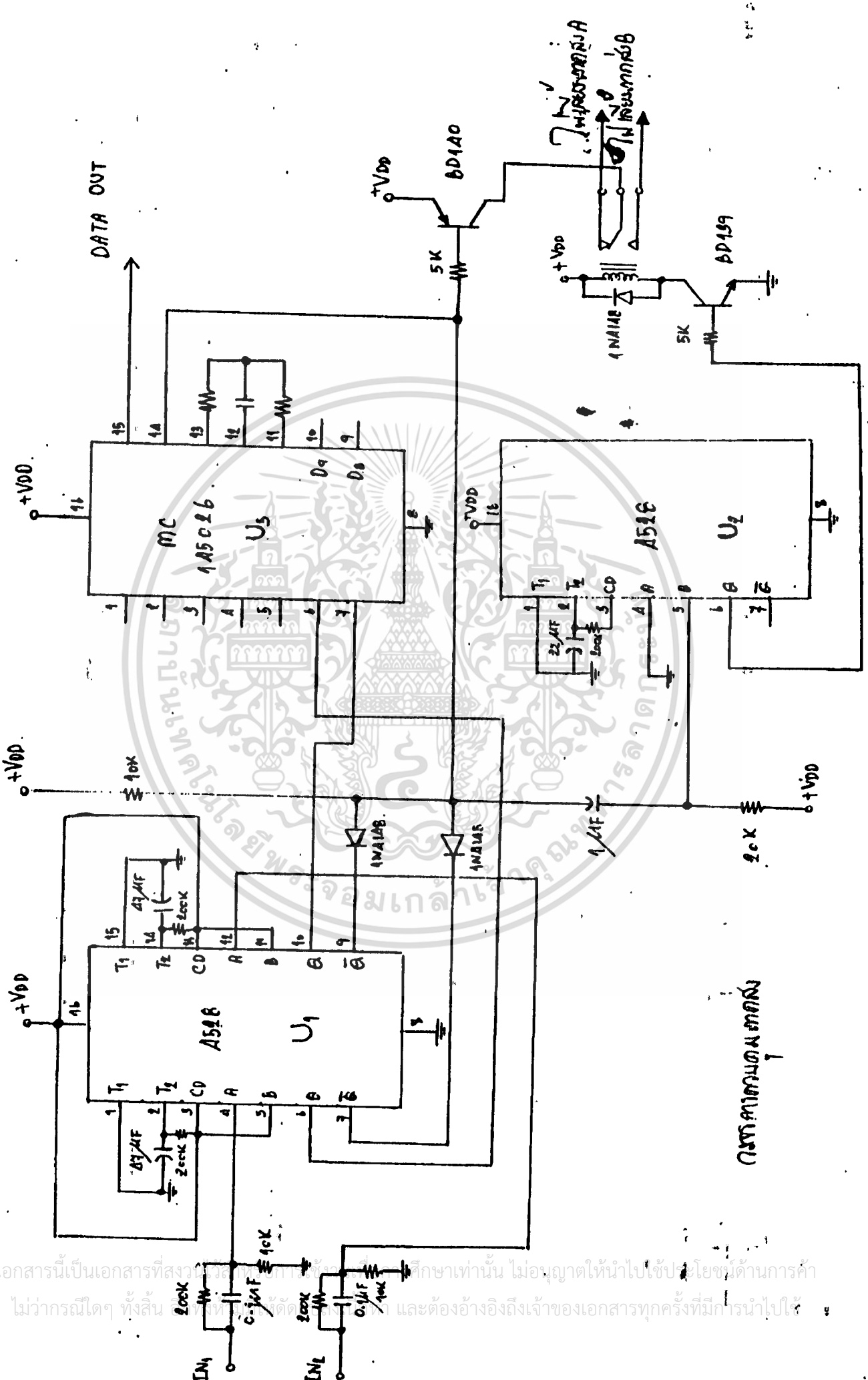
↓ = ขอบขาลง

⎍ = ขาขึ้น 1 ครั้ง

⎍ = ขาลง 1 ครั้ง

note ค่า $R_x$ จะต้องมีค่าต่ำสุดที่ 1 K
ส่วน $C_x$ จะมีค่าเท่าไรก็ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= ขอบขาลง

= พัลซ์บวก 1 ลูก

= พัลซ์ลบ 1 ลูก

การคำนวณค่าต่างๆในวงจรภาคควบคุมการส่งข้อมูล

เริ่มจากการรับสัญญาณข้อมูล $IN_1$ (START) และ $IN_2$ (STOP) โดยกำหนดให้การรับเป็นพัลซ์เพื่อหรีกสัญญาณเข้า IC ONE-SHORT เราสามารถคำนวณค่าพัลซ์ โดยประมาณได้ดังนี้

$$T = R \cdot C$$
$$= 0.1\ \mu F \times 10\ K$$
$$= 1\ ms.$$

และการทดลองจะพบว่า เมื่อหรีกสัญญาณเข้าไปจะทำให้ C เก็บประจุค้างและนานกว่าจะรับสัญญาณหรีกอีกครั้งต้องรอเวลาถึง 2 นาที ดังนั้นจึงใส่ R 200K เพื่อช่วยในการ discharge ทำให้รอรับสัญญาณใหม่ได้เร็วยิ่งขึ้น

ที่ภาค MONO STABLE หรือ ONE - SHORT เราใช้ IC - CMOS เบอร์ 4528 ($U_1$) ซึ่งสามารถดูข้อมูลได้จากตารางดังภาคผนวก ในที่นี้ เราเลือกค่า R , C เพื่อกำหนดระยะเวลาประมาณ 2 วินาที ระยะเวลาดังกล่าวจะถูกใช้ในการส่งข้อมูลผ่าน IC MC145026 และกำหนดให้ใช้ 2 ความถี่คือ ช่อง A , B ดังนั้นจึงต้องผ่าน IC ONE-SHORT อีก 1 ตัว ($U_2$) เพื่อกำหนดเวลาในการเปลี่ยนความถี่ A กับ B (อย่างละ 1 วินาที) ในการเปลี่ยนความถี่ A กับ B ในที่นี้เราใช้ Relay เป็นตัวตัดต่อไฟเลี้ยวของความถี่ที่ต้องการ และการทำงานของความถี่ทั้งหมดจะถูกกำหนดด้วยทรานซิสเตอร์ เบอร์ BD 140

เนื่องจากการทำงานของ IC MC145026 ($U_3$) จะต้องกำหนดส่งข้อมูลด้วยขา TE ซึ่งเป็น LOGIC "0" ดังนั้นจึงต้องใช้ OUTPUT จาก $U_1$ เป็น Q และต้องเอา LOGIC "0" นี้ ไปสั่งงานทรานซิสเตอร์ เพื่อจ่ายไฟเลี้ยวภาคส่งคลื่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 หลักการทำงานของเครื่องส่ง

เนื่องจากเราต้องการส่งข้อมูลแบบเดียวตันถึงความถี่ เราจึงต้องมีเครื่องส่ง 2 ย่าน คือ

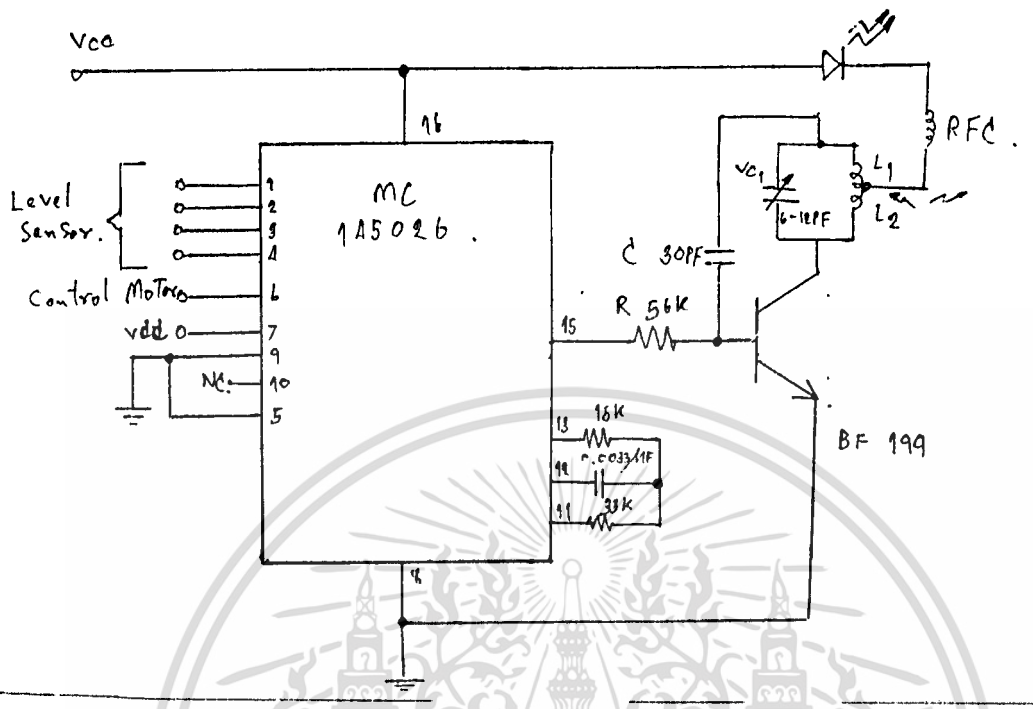
1. UHF
2. HF

1. ย่าน UHF เราใช้ความถี่ประมาณ 300 MHZ ความถี่ช่วงนี้ยังไม่ค่อยใช้กันมากนักจึงเหมาะสำหรับงานนี้ และจากภาครวมสัญญาณ (Multiplex) เราได้กำหนด Address ของข้อมูลเพื่อให้ถึงตัวรับ โดยกำหนด Address ที่ขา 7,9,10 เป็น +,-,NC ตามลำดับ Address ที่กำหนดนี้จะถูกส่งไปพร้อมๆกับข้อมูลในการเช็คสัญญาณของระบบอันได้แก่ Level, Pump Control ดังนั้น ตัวรับจะถูกตั้ง Address ให้ตรงกับทางด้านส่ง แล้วแปลงข้อมูลของ Lecel กับ Pump Control ออกมา

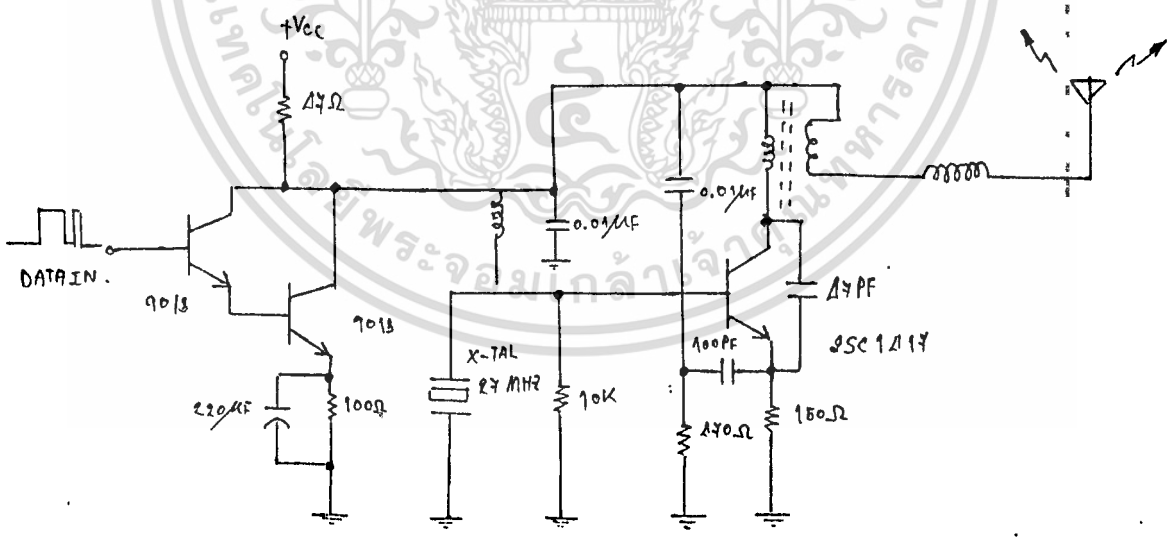
จากรูปวงจรเครื่องส่งจะพบว่าเป็นวงจรส่งสัญญาณแบบ FM โดยการกำหนดการสวิงของเครื่องด้วย LOGIC จาก DATA OUT ของ MC 145026 และเนื่องจากการส่งความถี่ 300 MHZ เป็นความถี่สูง ดังนั้นเราจึงสามารถสร้าง L เกิดขึ้นได้ภายในลายปรินซ์ และไม่จำเป็นต้องต่อสายอากาศ จากวงจรจะพบว่า $VC_1$ เป็นตัวปรับความถี่เรโซแนนซ์ ให้สัมพันธ์กับค่าของ $L_1$ กับ $L_2$ โดยความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าตามการปรับ $VC_1$ ในวงจรนี้เราอาจพันลวดเบอร์ 30 ลงบนความต้านทานขนาด 100 1/4 W พันเป็นจำนวน 20 รอบก็ใช้ได้ หรืออาจใช้ค่า R ต่ำมากๆประมาณ 0.1 แทนก็ได้

2. ย่าน HF ย่านนี้เป็นความถี่วิทยุที่ต่ำ และจำเป็นต้องใช้สายอากาศเข้าช่วย และการพันลวดเพื่อเป็นวงจรจูนความถี่จะต้องพันบนสลักแกนขนาด 5 mm. สำหรับการ Modulate ย่านนี้เราใช้การ Modulate แบบ AM ซึ่งจะให้การส่งคลื่นที่แรง แต่อาจรบกวนได้ง่าย การ Modulate จะเป็นการ Modulate จะเป็นการ Mod สัญญาณข้อมูลจาก IC MC 145026 ซึ่งเป็น LOGIC ดังนั้น % การ MOdulation จะสูงมากเกือบถึง 100% แม้ว่าเครื่องส่งที่นำมาใช้นี้จะมีขนาดกำลังสูงกว่าเครื่องส่งย่าน UHF แต่จะต้องระวังเรื่องของสัญญาณรบกวนให้มาก ดังนั้นจึงถือว่ามีประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลพอๆกับเครื่องแบบ UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปวงจรแสดงการ Multi lex สัญญาณ และส่งคลื่นวิทยุ UHF




รูปวงจรเครื่องส่งข้อมูลด้วยคลื่น 27 MHZ

* หมายเหตุ วงจรการมัลติเพลกซ์สัญญาณเป็นแบบเดียวกับการส่ง UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

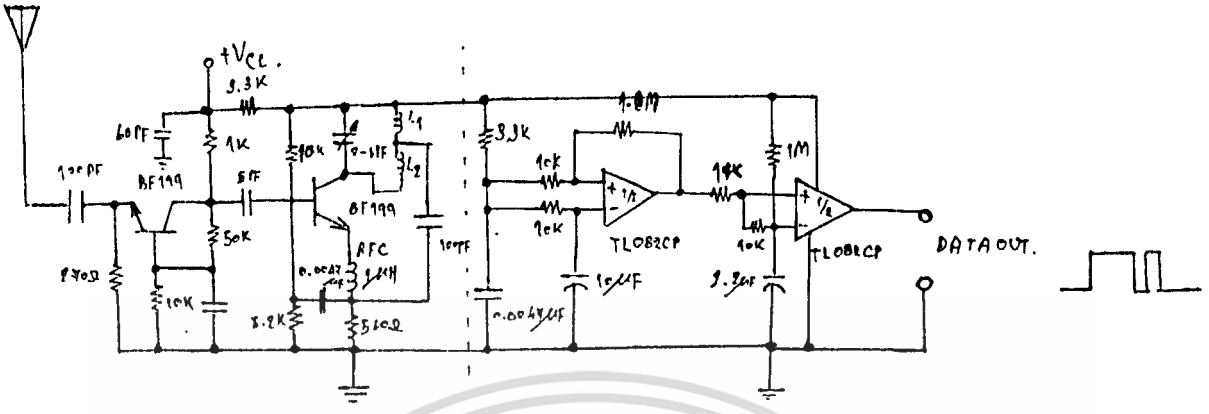
ภาครับข้อมูล

การทำงานและการสร้าง

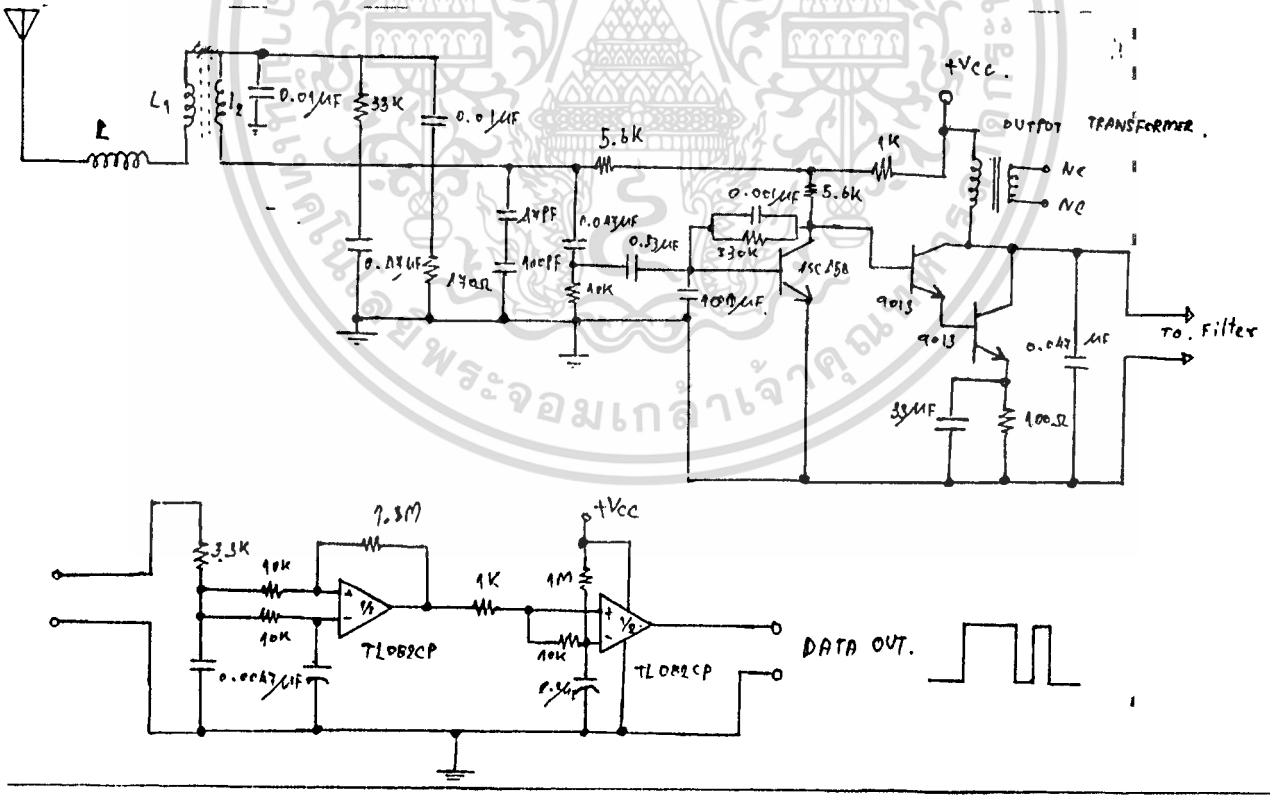
1. ภาครับสัญญาณคลื่นวิทยุ
2. ภาคควบคุมข้อมูลและประมวลผลข้อมูล
3. ภาคขับอุปกรณ์ปัมน้ำ

1. ภาครับสัญญาณคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปวงจรแสดงการทำงานของวงจรรับสัญญาณคลื่น UHF







รูปวงจรแสดงการทำงานของวงจรรับคลื่น 27 MHZ และคลื่นถูก FILTER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

จากบททฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการทดลองในเรื่องของการใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก และมีหลายๆ ปัจจัยประกอบ เนื่องจากความถี่วิทยุเป็นความถี่สูงและยากต่อการดูรูปสัญญาณ นอกจากนี้เรายังพบปัญหามากมายในการดีเทคคลื่นให้ได้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพราะเราพบว่าคลื่นที่เราดีเทคได้นั้นจะถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กอื่นๆทำให้ได้สัญญาณดิจิตอลที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการใช้งานของเครื่องสามารถใช้งานได้ดีในระยะใกล้ (ประมาณ 20-30 เมตร) และการใช้งานนี้ต้องมีสนามรบกวนน้อยๆหากต้องการใช้งานระยะไกลมากๆ จะต้องใช้ขนาดเครื่องส่งที่สูงๆ วงจร Modulate แบบ FM และภาครับสัญญาณแบบมี Squale (ตัดคลื่นรบกวน) ซึ่งในการใช้งานติดต่อบั้มห์น้ำ เราได้ทดลองวงจรเครื่องส่งตั้งแต่ขนาด 50 MW - 150 MW ปรากฏว่าไม่สามารถรับสัญญาณได้ หรือหากรับได้ก็ได้สัญญาณอ่อนและเต็มไปด้วยคลื่นรบกวน ดังนั้นเราจึงตัดสินใจเลือกใช้ความถี่ 27 MHZ ส่งด้วยกำลังส่ง 1 W และ Modulate แบบ FM พร้อมด้วยภาครับซึ่งมีวงจร Squale ปรากฏว่าสามารถรับ/ส่งสัญญาณได้ดีระดับหนึ่ง แต่มีปัญหาบางตัวซึ่งต้องแก้ไขก็คือ

1. จุดรับสัญญาณเป็นห้องทึบทำให้การกระจายคลื่นมีสัญญาณรบกวนสูง
2. มีมอเตอร์อยู่ในบริเวณนั้นมาก
3. คาดว่ามีการส่งความถี่แบบเดียวกัน จากภาคโทรคมนาคม
4. การส่งข้อมูลด้วยดิจิตอล เมื่อแพร่กระจายมาระยะทางไกลๆ จะเกิดการผิดเพี้ยนเกิดขึ้น ผลกระทบอันนี้เกิดขึ้นเพราะใช้คลื่นพาห์ต่ำเกินไป คือ 27 MHZ เท่านั้น หากใช้คลื่นพาห์ความถี่สูงๆ ผลอันนี้จะเกิดขึ้นน้อยนั้น หมายถึง ความถี่สูงกำลังส่งควรเพิ่มขึ้นด้วย

การสร้าง

เนื่องจากวงจรที่ใช้มีภาคดิจิตอลและภาคคลื่นความถี่วิทยุ ดังนั้นในการสร้างภาคดิจิตอล เราอาจใช้เพียงแค่ปรินซ์อเนกประสงค์ก็ได้ แต่ว่าในการสร้างภาคคลื่นวิทยุควรจะประกอบลงบนปรินซ์จริงโดยเฉพาะวงจรเครื่องรับ/ส่งย่าน UHF ควรพิถีพิถันเรื่องลายวงจรให้มาก เพราะภายในปรินซ์มีขดลวด L แฝงอยู่ด้วย หากขนาดปรินซ์ผิดพลาด อาจทำให้ความถี่เปลี่ยนหรือไม่สามารถส่ง/รับคลื่นได้ ส่วนในการประกอบวงจรรับ/ส่งย่าน HF ไม่เน้นลายวงจรมากนัก แต่ว่าต้องพันขดลวดคอยล์พอร์มบนสลักจูน 5 mm. ด้าน Primavy พัน 6 รอบ ส่วนด้าน Secandary

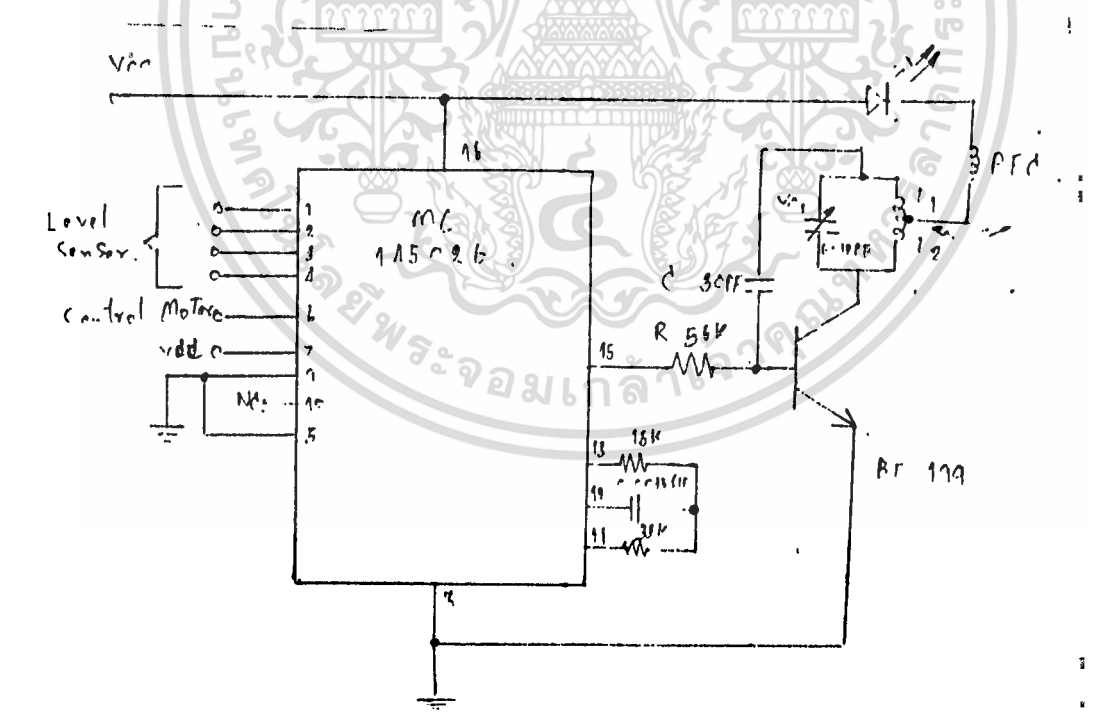
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัน 2 รอบ พันบนคอยล์ฟอร์มตัวเดียวกัน นอกจากนี้การประกอบลงบรินซ์ควรให้ขาของอุปกรณ์สั้นที่สุด

สำหรับวงจรภาครับ/ส่งคลื่น 27 MHZ Modulate แบบ FM จากวงจรที่ให้มามีการสร้างและดัดแปลงโดยแยกเป็นภาครับ , ภาคส่ง และภาคแสดงผล ซึ่งวงจรที่สร้างจะลดความยุ่งยากลงโดยการใช้ IC ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ (LM 386) และ IC Modulate เบอร์ C5121 ซึ่งเป็น IC Modulate ภาคส่งแบบ FM, ส่วนภาครับจะใช้ IC Demodulate แบบ FM เบอร์ MC 3361 จากนั้นจะถูกขยายด้วย TR และIC LM386 ออกไป

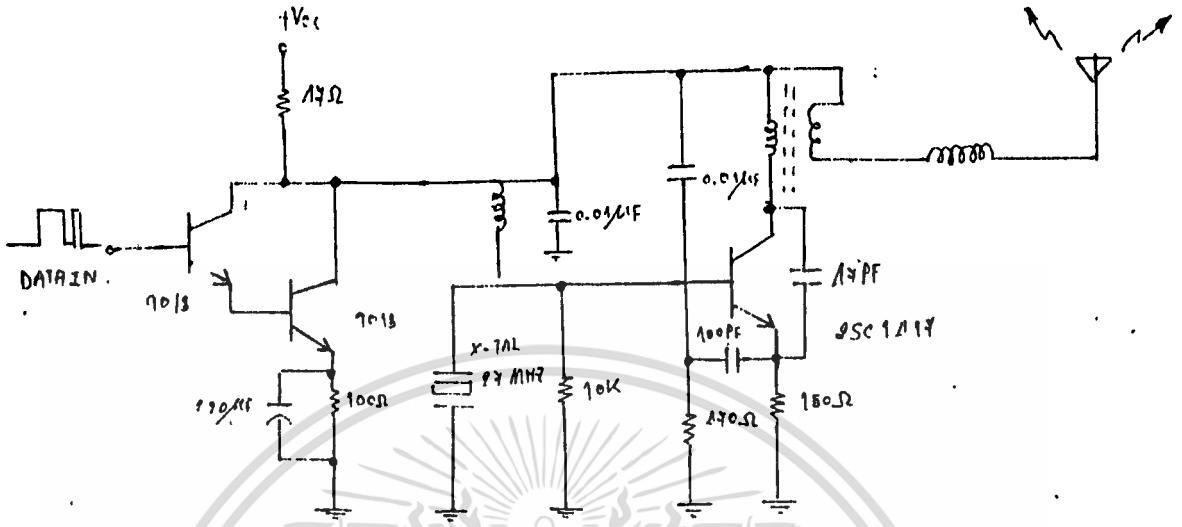
อนึ่ง ในการติดต่อคลื่นระยะทางไกลๆ เราใช้การรับส่งคลื่น 27 MHZ โดย Modulate แบบ FMเนื่องจากลดสัญญาณได้ดี

จากรูปวงจรการ Multiplex สัยยษรด้วยความถี่ UHF และ HF ได้แสดงรูปคลื่นและขนาดของสัญญาณดังสังเกตุ ได้จากรูป




รูปแสดงวงจร Multiplex เครื่องส่ง UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

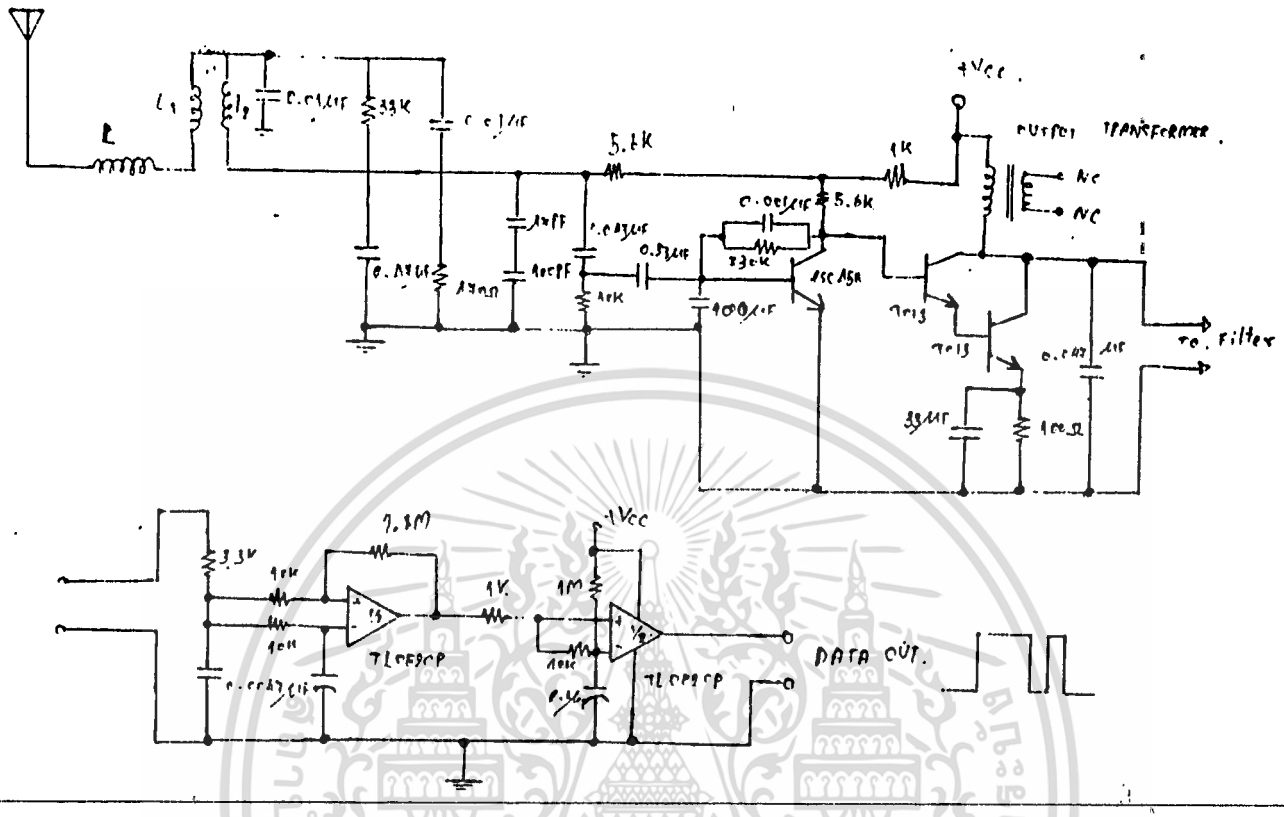



รูปแสดงวงจรเครื่องส่งข้อมูล 27 MHZ

และด้านภาครับก็ได้แสดงรูปคลื่นและขนาดสัญญาณ ตามรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปวงจรแสดงการทำงานของภาครับสัญญาณคลื่น UHF




รูปแสดงวงจรการทำงานของ ภาครับคลื่น 27

จากวงจรที่แสดงมาข้างต้นปรากฏว่า พบปัญหามากมายในการทดลองระหว่างอาคารภาควิชาไฟฟ้ากับห้องปั้มท์น้ำ ซึ่งมีระยะห่างประมาณ 50 เมตร แต่ผลการทดลองในการทดสอบระหว่างปั้มท์น้ำที่บ้านของผู้จัดทำ ในระยะใกล้เคียงกันกลับไม่พบปัญหา ซึ่งในการวัดรูปสัญญาณจากภาครับทั้ง 2 ผลการทดลองนั้นแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะสัญญาณจากห้องปั้มท์ที่ทางสถาบันมีสัญญาณรบกวนมาก ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์รูปคลื่น , ข้อมูลที่ส่งมาจาก IC MC 145026 ได้ ดังนั้น เราจึงต้องเปลี่ยนวงจรแล้วทำการทดสอบใหม่โดยใช้ภาคส่งที่แรงขึ้น , ภาครับที่ไวต่อความถี่เฉพาะย่านมากขึ้น และที่สำคัญเป็นการรับส่งคลื่นด้วยการ Modulate แบบ FM โดยวงจรภาครับส่ง ดังแสดงให้เห็นดังรูปวงจรเครื่องรับส่ง 27 MHZ แบบ FM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของเครื่องรับ/ส่งย่าน 27 MHZ แบบ FM

ภาคส่ง

เริ่มจากการป้อนสัญญาณเข้าที่ขา MIC และต่อ 8W PTT ลงกราวด์ จะทำให้มีสัญญาณเข้าไปยัง TR # 2 SC 1815 (เพื่อขยายสัญญาณ)ขณะเดียวกันทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน TR # 2 SA 1015 ซึ่งเป็นไฟเลี้ยงเฉพาะวงจรภาคส่ง สัญญาณที่ผ่านเข้าไปจะถูกขยายผ่าน IC LM 386 และ VR 10K จากนั้นสัญญาณจะถูก Modulate ที่ขา 14 , 15 , 16 โดยการ Modulate ที่ว่าเป็นการ Modulate แบบ FM ซึ่งอาศัยวาริแคปไดโอด MV 2209 ใช้ในการModulate การModulate ด้วย IC เบอร์ C 5121 นี้ เป็น IC ทำหน้าที่ ซินธิไซเซอร์ ความถี่วิทยุ IC เบอร์ C 1512 อาศัยภาค O SC จากการใช้ X-TALขนาด 10.240 MHZ กำหนดความถี่ จากนั้นความถี่ที่ได้เข้าวงจร หารเพื่อความถี่ที่ต้องการ (ในที่นี้ใช้ความถี่ 26.675 MHZ) สัญญาณที่ได้จาก Modulate จะถูกขยายและฟิลเตอร์ (สังเกตุจากขา 18) TR # 2 SC 1923 จะขยายสัญญาณที่ได้จากการ Modulate ที่วงจรขยายส่วนนี้จะพบว่าใช้วงจร Doubling OSC เข้าช่วยเนื่องจากสัญญาณที่ผลิตจาก OSC มีความถี่ต่ำกว่า 26.675 MHZ ดังนั้นวงจรจึงต้องอาศัยความถี่ฮาร์โมนิคส์ ของ IC # C 5121 ช่วยในการสร้างความถี่ 26.675 MHZ หลังจากได้ความถี่ที่ขยายจากคลื่นฮาร์โมนิคส์แล้ว ก็จะเข้า TR ขยายอีก 2 ตัว คือ 2 SC 1923 กับ 2 SC 2314 การขยายภาคส่งทุกภาคจะผ่านวงจรจูน เพื่อฟิลเตอร์ความถี่ทุกครั้งและท้ายที่สุดวงจรจะถูกส่งเข้าภาค POWER OUT เป็น TR # 2 SC 2078 และเข้าวงจรแมธชิ่งส่งสัญญาณออกสายอากาศต่อไปวงจรภาคส่งนี้ส่งออกด้วยกำลังส่ง 1 W

ภาครับ

เริ่มจากสายส่งสัญญาณที่จุด ANT ผ่านวงจรฟิลเตอร์ L , C ที่ภาคนี้เราป้องกันสัญญาณความแรงจากภาคส่งเข้ามาที่ภาครับด้วยไดโอด IN 4148 สัญญาณจากไดโอดจะบล็อกแรงดันไม่ให้เกิน 0.6 V สัญญาณที่ได้จะผ่าน FET # K 212 และผ่านวงจรจูนเข้า FET # BF 960 การขยายความถี่วิทยุด้วย FET มีข้อดีก็คือมีสัญญาณรบกวนต่ำ และได้เกนที่สูง สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งผ่านเข้า IC ภาค MIXER และแปลงเป็นความถี่ IF 455 KHZ ในที่นี้เราใช้ IC # MC 3361 และการฟิลเตอร์ความถี่ IF เราใช้เซรามิคฟิลเตอร์ความถี่ 455KHZ เนื่องจากภาครับเราใช้ IC เข้าช่วย ดังนั้นจึงลดความยุ่งยากลงได้มาก สังเกตุที่ภาครับนี้จะพบว่ามีการจูน Squale หรือความไวในการรับด้วย VR 10 K (ที่ขา 12) ในการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

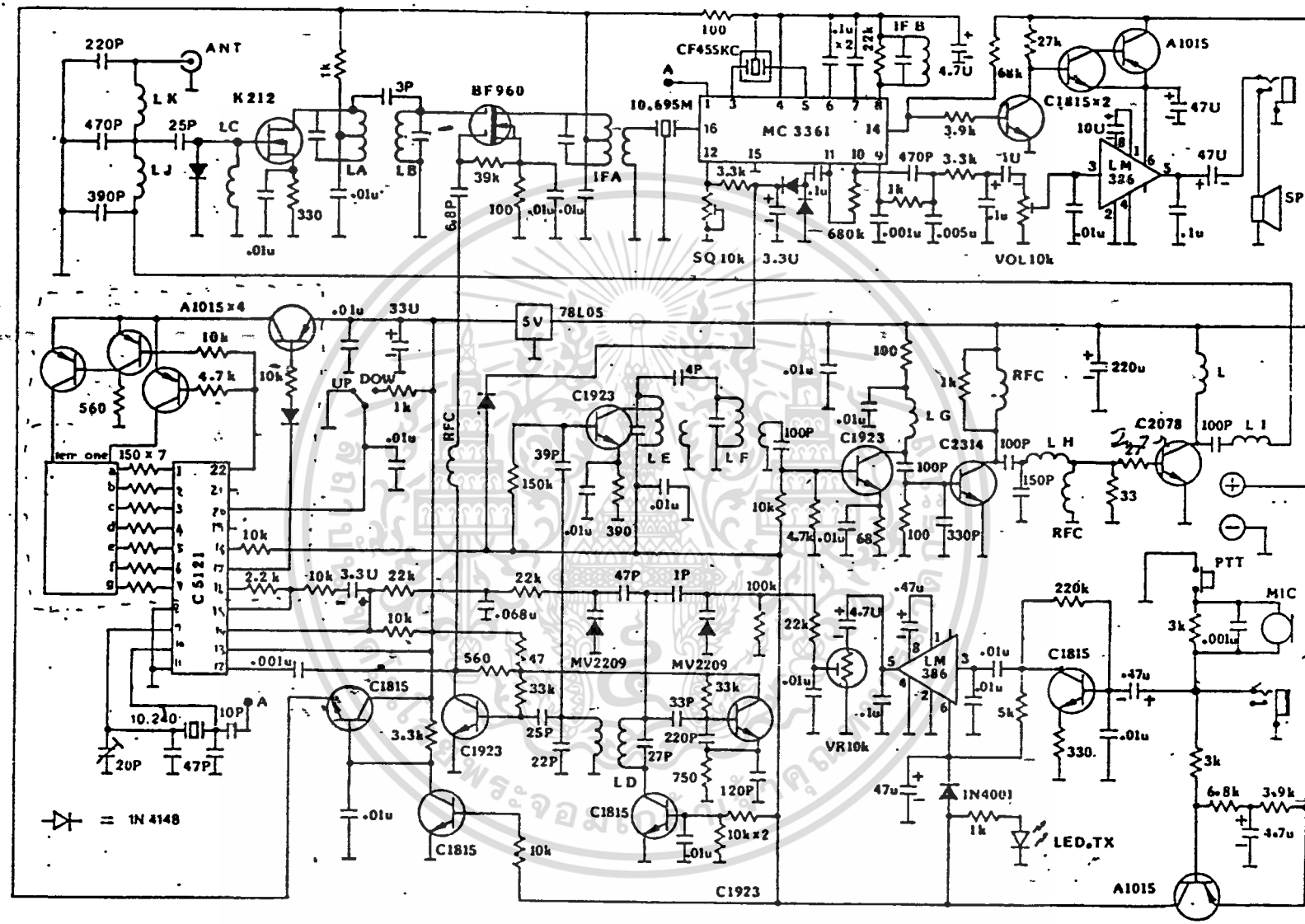
งานจริงเราตัด VR ตัวนี้ออก เพราะหากความไวในการรับสูงมากๆ อาจทำให้มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาแทรกได้ ภาคสุดท้ายของ IC จะทำการ Demodulate สัญญาณออกมาทางขา 9 , 14 ซึ่งสัญญาณที่ได้ขณะนี้จะถูกขยายด้วย IC LM 386 และ TR # 2SC 1815 กับ TR # 25 A 1015 สัญญาณจะออกมายังขา IC LM 386 (ภาครับ) และออกลำโพงต่อไป

NOTE ในที่นี้เราออกสัญญาณจากภาครับเข้าวงจร Comparator และส่งสัญญาณตัดต่อการทำงานของปั๊มท์ต่อไป

จากการทดลองที่ผ่านมาเราจำเป็นต้องแก้ไขภาคส่งข้อมูลใหม่ เนื่องจากว่าการส่งข้อมูลด้วย IC MC 145026 มีความถี่ข้อมูลสูงเกินไป ในการใช้งานกับปั๊มท์จริง ณ สถานที่จริงจึงถูกแก้ไขเป็นการป้อนข้อมูล ON/OFF ธรรมดาโดยใช้ IC 555 กำหนดคลื่นความถี่เพื่อช่วยส่งข้อมูล และเราดีเทคข้อมูลจากภาครับด้วยการใช้วงจรเช็คติฟาย และComparator+Delay time

สาเหตุที่ภาครับ ต้องหน่วงเวลา 20 วินาที ก็เพื่อให้ตัดการรบกวนจากสัญญาณภายนอกหรือความถี่อื่นที่ต้องการ ON PUMP เพราะว่าในความถี่นี้ยังมีการใช้งานสื่อสารที่บกติมักจะเป็น Walky / Talky ซึ่งจะรับส่งกันไม่เกิน 20 วินาที แต่ว่าในเครื่องที่ใช้งานจะสั่งปั๊มท์ทำงานตลอด ถ้าน้ำเต็มจึงสั่งหยุด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 วินาที ในการส่งคลื่นแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปวงจร เครื่องรับ ส่ง ย่าน 27 MHZ แบบ FM.

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สืบเนื่องมาจาก Preject จากปีก่อนที่ผ่านมาได้ใช้งานอุปกรณ์ Floatless Level Control นำมาใช้งานและติดตั้งในระยะเวลาประมาณ 1 เดือน แล้วเกิดปัญหาไม่สามารถทำงานควบคุมได้ ดังนั้นในปีนี้จึงสืบต่อและแก้ไขปรับปรุงวงจรเก่าที่เป็นทรานซิสเตอร์ และการออกแบบที่ผิดพลาดหลาย ๆ จุด นอกจากนี้ได้เพิ่มวงจรส่งข้อมูลคลื่นวิทยุเพื่อใช้สั่งงาน PUMP (Wireless Control) การทำงานและทดสอบนั้นเราได้แยกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. วงจรควบคุมระดับน้ำด้วยอิเลคโทรด
2. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่นวิทยุ

1. การควบคุมระดับน้ำด้วยอิเลคโทรด วงจรในส่วนนี้เป็นวงจรเช็คและสามารถใช้งานได้จริง ซึ่งวงจรที่ออกแบบมาเราใช้ IC OP A-P ทำหน้าที่เป็น Comparator ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ นอกจากนี้เรายังเพิ่มวงจร Delay หรือหน่วยสัญญาณอีก 5 วินาที สาเหตุที่ต้องเพิ่มวงจรส่วนนี้ก็เพราะเราคำนึงถึงสภาวะจริง ในการกระเพื่อมของน้ำ จะทำให้มอเตอร์ปั๊มทำงานติดๆ ดับๆ เป็นเหตุให้มอเตอร์ปั๊มเสียหาย ดังนั้นการป้องกันสาเหตุดังกล่าว เราได้ทดลองจากงานจริงจนพบว่า ค่าหน่วยเวลา 5 วินาที เป็นค่าเวลาที่เหมาะสมพอจะตัดสินการ ON/OFF ของปั๊มท์ ส่วนการ Sen Sor สัญญาณจากขาเช็คระดับน้ำ เราได้ออกแบบจนมั่นใจว่า การใช้ความถี่ 50 HZ ช่วยในการ Sen Sor จะช่วยการเกิดออกไซด์บริเวณขาเช็คได้ เพราะว่าความถี่ 50 HZ เป็นสัญญาณ AC. อิเลคโทรดจะไม่มีการสูญเสียอิเลคตรอนจากด้านใดด้านหนึ่งและท้ายที่สุดการสั่งงานด้วย Relay ซึ่งเหมาะสมจะประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นต่อ ๆ ไป อนึ่ง วงจรที่ออกแบบมานี้เราได้เสริม Application สำหรับสารตัวอื่นหรือ Sen Sor ของเหลวอื่น โดยการใช้ตัวปรับ คตท. ค่า Conductivity ได้ด้วย

วงจรเช็คระดับน้ำนี้เหมาะสมจะใช้งานจริงหรือผลิตเชิงพานิชย์ได้เพราะเราออกแบบแก้ไข/ปรับปรุง จนได้การทำงานที่สมบูรณ์แบบและการกินกระแสต่ำเพราะเป็นวงจร OP A-P

2. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่นวิทยุ วงจรรับส่งคลื่นวิทยุนี้เราเคยลองออกแบบและทดสอบดูปรากฏว่าวงจรที่ทดลองออกแบบไม่สามารถติดต่อทางคลื่นวิทยุได้ เนื่องจากสาเหตุหลายประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าเหนี่ยวนำจากการคำนวนและการปฏิบัติจริงแตกต่างกันมาก
2. อุปกรณ์วงจรจูนที่คำนวนออกแบบหาซื้อได้ยากตามท้องตลาด
3. เสถียรภาพทางวงจรไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร
4. มีคลื่นรบกวนมาก

ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงจำเป็นต้องอาศัยวงจรจากนิตยสารภายในและต่างประเทศเป็นตัวช่วยนำ เพราะวงจรต่างๆ นี้ได้ออกแบบและทดสอบเป็นเวลานานๆ จนได้ประสิทธิภาพสูง มีคลื่นรบกวนต่ำและเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

ในการทดลอง เราได้ทดลองรับส่งหลายๆ วงจรจนเหลือวงจรที่พอใช้งานได้จริงๆ 3 วงจร คือ

1. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น UHF (แบบ FM)
2. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น HF (แบบ AM)
3. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น HF (แบบ FM)

สาเหตุที่เรานำเสนอวงจรคลื่นทั้ง3 ก็เพราะเหตุผล คือ คลื่นเหล่านี้เป็นคลื่นที่ใช้ในงานสาธารณะ การใช้ความถี่คลื่น , แรงส่ง จากทั้ง 3 คลื่นไม่จำเป็นต้องขออนุญาติจากกรมไปรษณีย์โทรเลข เราสามารถสรุปผลการทดลองทั้ง 3 ดังนี้

1. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น UHF (แบบ FM) การใช้งานนี้เหมาะสมในระยะ 30-40 เมตร และสามารถใช้งานในลักษณะส่ง DATA หรือข้อมูลที่ BIT RATE สูงๆได้ ในที่นี้ส่งด้วยขนาด BIT RATE ถึง 8 KHZ ซึ่งนับว่าสูงมาก สายอากาศของวงจรคลื่นนี้สั้นมากโดยมีความยาวเพียง 40 CM. ปัญหาที่เกิดในคลื่น UHF นี้คือขนาดของลายปริ้นซ์ที่ออกแบบและสร้างต้องระวังให้มาก เพราะการผิดพลาดของค่า L จะเกิดขึ้นได้ เป็นเหตุให้ไม่สามารถสื่อสารข้อมูลผ่านคลื่นได้ อีกประการคือแรงส่งจากวงจรที่นำเสนอมามีความแรงคลื่นต่ำ (เพียงแค่ 50 MW) เมื่อนำไปทดสอบที่สถานที่ปั้มน้ำจริง พบว่าคลื่นส่งความถี่และข้อมูลมาไม่ได้

2. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น HF แบบ AM เราลองคลื่นนี้และวัดจากสรุปพบปัญหารบกวนเกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากการ Modulate แบบ AM เกิดปัญหามากในการรบกวน แต่หากทดลองในสถานที่โล่งแจ้ง ไม่มีมอเตอร์หรือตัวรบกวนอื่นๆ จะพบว่าสามารถใช้งานสื่อสารข้อมูลได้ดีถึงระยะ 100 เมตร แต่ในการทดลองปั้มน้ำของสถาบัน (ภาควิชาไฟฟ้า) เกิดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนอย่างมาก แม้ว่าเราจะแก้ไขวงจรฟิลเตอร์และวงจรขยายก็ตาม ก็ไม่อาจเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้จึงต้องใช้วงจรที่ Modulate แบบ FM เข้าช่วย

3. วงจรรับส่งข้อมูลคลื่น HF แบบ FM วงจรเครื่องรับ/ส่งนี้เป็นวงจรจริงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานรับส่งและมีประสิทธิภาพดี คลื่นรบกวนต่ำ และยังปรับย่านการส่งและความไว ในการรับได้ ในการทดสอบกับสถานที่จริงใช้งานได้ดี แต่ยังพบปัญหารบกวนของคลื่นที่เกิดจากภาควิชาคมนาคม ซึ่งอาจมารบกวนการทำงานของเครื่องได้ แต่เราแก้ปัญหานี้โดยการปรับวงจร Sen Sing ใหม่ จึงสามารถแก้ปัญหาจุดนี้ไปได้

สุดท้ายนี้ทางกลุ่มคณะผู้จัดทำ ยังเห็นว่าเรื่องการรับส่งข้อมูลคลื่นวิทยุ เพื่อใช้ในงานสาธารณูปโภค ยังเป็นเรื่องใหม่ แม้ว่าจะประสบความสำเร็จในการใช้งานระดับหนึ่ง แต่ยังเป็นการใช้งานย่อยๆ ซึ่งหากพัฒนาต่อๆไป อาจใช้ควบคุมอาคารสูงๆหรือสื่อสารข้อมูลในจุดอันตราย (Hazard Zone) ความสำเร็จของโครงการชุดนี้อยู่ที่การรับส่งข้อมูลในระยะใกล้ๆ และการส่ง BIT RATE ที่ต่ำๆ พบว่าแทบไม่เกิดสัญญาณรบกวนข้างเคียงได้เลย ขณะนี้เครื่องที่จัดทำได้ถูกนำไปติดตั้งใช้งานแล้วที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทางกลุ่มได้ตรวจเช็คกับสถานที่ใช้งานเป็นระยะๆ เพื่อประเมินผลในระยะยาวต่อๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## อุปกรณ์การควบคุมระดับ

ระดับเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งใน 4 ตัวสำคัญในวงการอุตสาหกรรมอันประกอบด้วยการวัดอุณหภูมิ, แรงดันและการไหล ในปัจจุบันการวัดระดับใช้กันทั่ว ๆ ไปถึง 16 วิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสีย อุปกรณ์มีทั้งแบบเชิงกล,แบบไฟฟ้า และแบบอีเล็คทรอนิคส์ ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องวัด 2 ชนิด คือ แบบชี้บอกระดับทั้งของแข็งและของเหลว และแบบที่ใช้ทำการควบคุมระดับได้ เพื่อช่วยให้ในการเลือกมาใช้งานเฉพาะและเพื่อเข้าใจให้ถ่องแท้ในการทำ PROJECT I II ผมใคร่ให้ท่านศึกษาถึงวิธีการวัดระดับแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 1.1 ลูกลอย

ห้องน้ำในบ้านทั้งหมดใช้การควบคุมระดับน้ำแบบลูกลอย ซึ่งเป็นทั้งรูปแบบที่ง่าย และมีจำนวนมากที่สุด ประกอบด้วยลูกลอยที่เคลื่อนได้อย่างง่าย ๆ และที่ระดับสูงจะปิดวาล์วหยุดการส่งน้ำ ราคาอุปกรณ์ต่ำ แต่เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่จึงอาจเสียได้ ชิ้นส่วนที่มักจะเสียบ่อย คือ วาล์วโดยเฉพาะคือ ซีท (seat)

อินสตรูเมนท์อื่นจำนวนมากก็ทำงานโดยหลักการคล้ายกัน แต่จะใช้อุปกรณ์ที่ทันสมัยกว่าแทนวาล์วน้ำ เช่น สวิทช์แม่เหล็ก (Magnetic Switch) สวิทช์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานปิดหรือเปิด อาจใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย มีทั้งแบบที่มีรูที่ยอด ด้านข้างหรือกัน และใช้กับของเหลวเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอุปกร์แบบลูกลอยลูกลอยอาจใช้ชี้บอกระดับได้ ตัวชี้บอกระดับแบบนี้ประกอบขึ้นง่าย ๆ ด้วยการต่อลูกลอยเข้ากับแขนที่หมุนได้เพื่อขับเคลื่อนเข็มชี้ ระบบนี้มีทั้งชนิดสำหรับของเหลวไหลเข้าจากด้านบนหรือด้านข้าง เนื่องจากลูกลอยหมุนเป็นรูปเส้นโค้งของวงกลม (arc)จึงสามารถชี้บอกได้ตลอดความสูงของมัน ในกรณีที่ภาชนะบรรจุกว้างกว่าความสูงเท่านั้น เช่นี้ แท้งค์น้ำมันรถยนต์

แต่เพราะว่าภาชนะบรรจุส่วนมาก ไม่มีรูปทรงแบบนี้ดังนั้นการชี้บอกของลูกลอยจึงบอกระดับบางส่วนของความสูงของภาชนะบรรจุเท่านั้น ถ้าต้องการให้มีชี้บอกที่สูงมากขึ้นไปอีก ต้องใช้แขนยาวและลูกลอยที่หนักขึ้น ข้อเสียนี้สามารถแก้เพียงบางส่วนโดยการถ่วงน้ำหนักลูกลอยเท่านั้น

ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ให้ข้อเสียที่มีส่วนจำกัดมาก เพราะต้องจมอยู่ในของเหลวซึ่งอาจถูกกัดกร่อนหรือทำให้เคลื่อนไม่สะดวกได้ ระบบนี้ถูกจำกัดแค่ใช้งานกับของเหลวที่เข้ากันได้ นอกจากนี้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

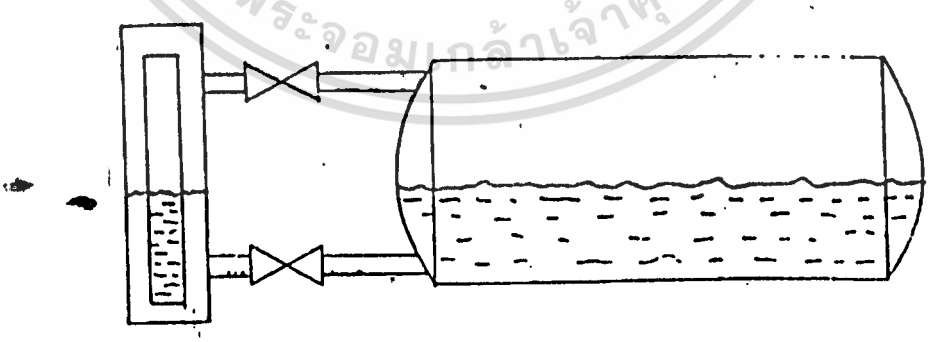
ของเหลวที่ไปด้วยกันได้ นอกจากนี้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพในการใช้ในอุตสาหกรรมเพราะว่าทำให้พวก Germ เติบโตได้

วิธีการชี้บอกนอกจากจะต่อเชื่อมโดยตรงเข้ากับเข็มชี้แล้ว ยังใช้กับโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) หรือคับบลิ้งแบบแม่เหล็กหรือแบบเหนี่ยวนำได้วิธีทั้งสามนี้เหมาะมากสำหรับการชี้บอกระยะไกล โดยเฉพาะสำหรับภาชนะบรรจุที่สูงเกิน 10 เมตร เพราะมิเช่นนั้นจะต้องปีนขึ้นไปดู

ระบบลูกลอยที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น คือ การผลิตในรูปคล้ายแก้วมอง (Sight Glass) ลูกลอยจะกระตุ้นตัวชี้บอกที่ถูกคับเปิ้ลโดยทางแม่เหล็ก ระบบนี้ใช้ในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้ลวดหรือเทปผูกลูกลอยแล้วร้อยผ่านลูกกรอก เพื่อจะอ่านระดับได้บนพื้นดิน

## 1.2 แก้วมองระดับ (Sight Glasses)

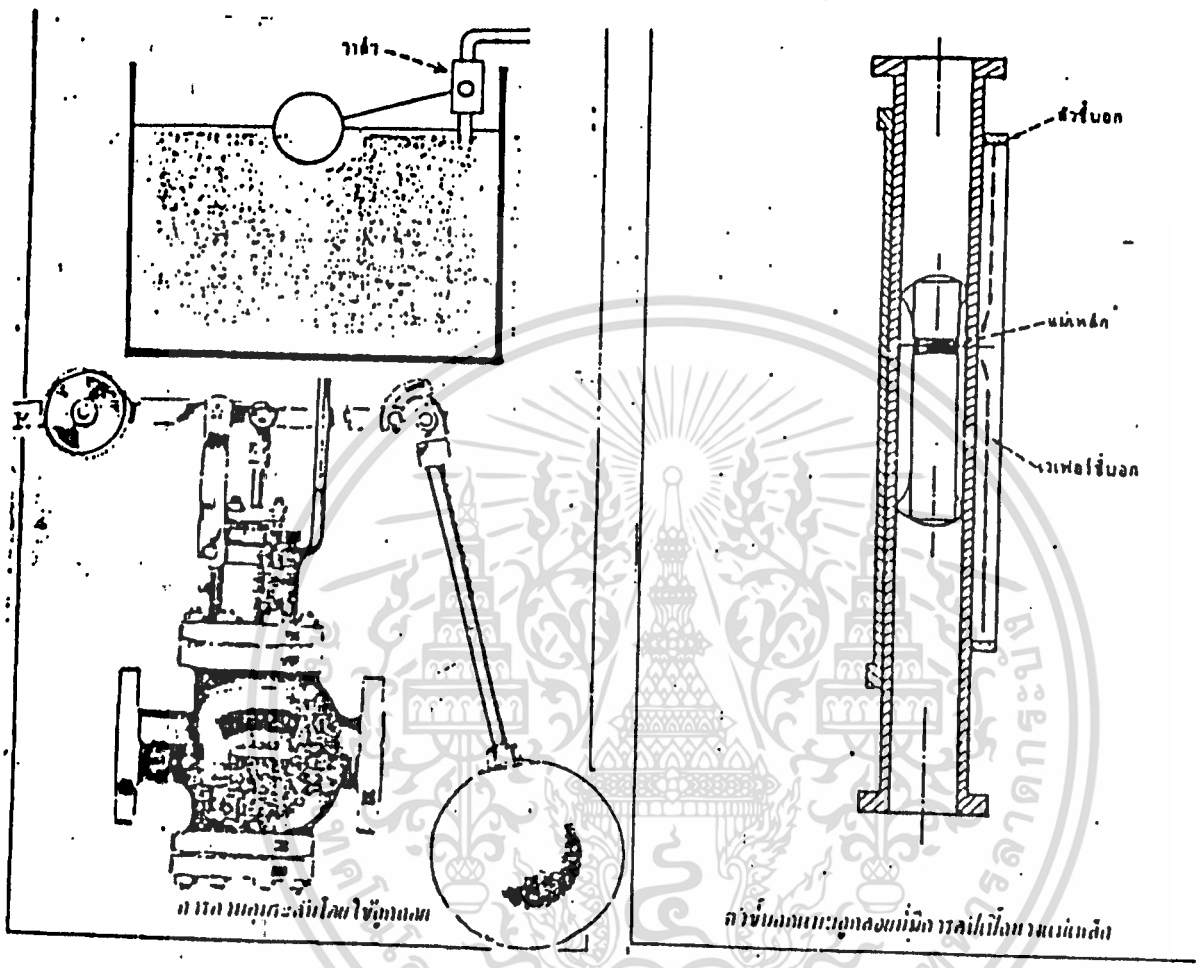
แก้วมองแบบท่อแก้วยังคงใช้อยู่เป็นจำนวนมาก มักติดตั้งเป็นแนวตั้งด้านนอกของแท้งค์และต่อเข้ากับแท้งค์ทางด้านบนและด้านข้าง แก้วมองนี้แม่นยำเท่ากับเครื่องหมายที่สอบเทียบไว้แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้คนคนหนึ่งเฝ้ามอง เพื่อที่จะอ่านค่าและเนื่องจากทำด้วยแก้วจึงแตกง่าย อาจทำให้บรรจุในถังสูญเสียไปได้



การดูระดับโดยใช้กระจกมอง

จาก เหตุผลนี้จึงไม่ใช่แก้วมองวัดสารที่ติดไฟง่าย เป็นพิษหรือกัดกร่อนหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่ที่อุณหภูมิหรือแรงดันเกินกว่าขีดจำกัดของแก้ว การแก้ปัญหานี้ในปัจจุบันอาจทำท่อที่ต่อนอกถังด้วยวัสดุชนิดอื่น เช่น เหล็กสแตนเลส และมีลูกลอยแม่เหล็กเล็ก ๆ บรรจุอยู่ติดกับท่อเหล็กสแตนเลส จะมีท่อแก้วที่มีการปิดกันอากาศอย่างดี ในนี้จะใส่สารแม่เหล็กขนาดเบาที่เลื่อนขึ้นลงตามตำแหน่งลูกลอยแม่เหล็ก ดังนั้น จึงสามารถชี้บอกระดับในถังได้โดยไม่ต้องต่อกันโดยตรงระบบนี้สามารถติดสวิทช์ควบคุมค่าสูงต่ำ (Limit Switch) ซึ่งสามารถปรับตำแหน่งได้สวิทช์นี้จะถูกกระตุ้นโดยการเคลื่อนผ่านของลูกลอยแม่เหล็ก

1.3 เทอร์มิสเตอร์

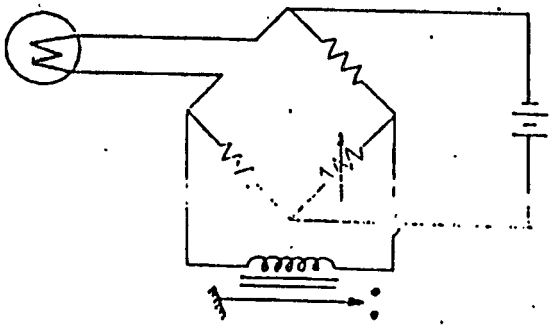
เทอร์มิสเตอร์สามารถใช้เป็นสวิทช์ระดับอย่างง่าย ประกอบด้วยเทอร์มิสเตอร์ที่มีประสิทธิ์ความร้อนเป็นบวกที่ถูกบรรจุในแก้ว เหล็กสแตนเลสหรือทองเหลือง ซึ่งสามารถติดตั้งที่ระดับใดก็ได้ในถัง นอกจากนี้สามารถติดตั้งได้ในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ทั้งนี้เพราะมีความยาวไม่เกิน 40 มม.

ถ้าป้อนไฟ 1 D.C หรือ A.C ที่แรงดันต่ำ ๆ เข้าไป อุปกรณ์จะร้อนขึ้นและจะมีเสถียรภาพที่ระดับหนึ่งของกระแสกับกำลังที่สูญเสีย ถ้าระดับในถังเปลี่ยนไปสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ เทอร์มิสเตอร์จะเปลี่ยนจากอากาศเป็นของเหลว ( หรือกลับกัน ) ถ้าเปลี่ยนจากอากาศเป็นของเหลว ( ขณะที่ระดับสูงขึ้น ) ความร้อนจะกระจายออกเร็วขึ้นทำให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ลดลง จะทำให้อุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ลดลง อุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ต่ำ ทำให้กระแสไหลมากขึ้น กระแสที่เปลี่ยนนี้นำไปใช้ในการควบคุมได้

อุปกรณ์ที่คล้ายคลึงกันจะใช้ท่อนโลหะคู่ (Bimetallic) ซึ่งมีขดลวด (Coil) 12 V พันอยู่ และใช้หลักการของความร้อนที่เกิดจากกระแสเช่นเดียวกัน เมื่อระดับของเหลวลดลงทำให้อุปกรณ์ ไม่ถูกปกคลุมโดยของเหลวอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนทำให้ท่อนโลหะคู่เปิดงเบนซึ่งจะไปควบคุม Microswitch ให้ทำงาน

อินสตรูเมนท์ทั้งสองแบบนี้เป็นอุปกรณ์สำหรับเตือนภัย และไม่ควรจะใช้กับของเหลวที่ติดไฟง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์วัดระดับแบบเทอร์มิสเตอร์

1.4 แบบแสง (Optical)

แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับสัญญาณแบบ Photo-Electric สามารถใช้เป็นตัวควบคุมระดับในเงื่อนไขที่เฉพาะปัญหาอยู่ที่ต้องส่งและรับแสง ทำให้ยากที่จะใช้กับวัสดุที่เป็นผง เพราะเกิดฝุ่นมากซึ่งอาจไปจับที่ช่องส่งและรับแสง ปัญหาเช่นเดียวกันจะเกิดขึ้นถ้าใช้กับของเหลวที่เป็นยาง ในของเหลวเช่นน้ำส้มคั้นจะทำงานได้ดี ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่มีสิ่งสัมผัสกับของเหลว นอกจากช่องกระจกทำให้ไม่มีสิ่งซึ่งยื่นเข้าไปในของเหลว

ได้มีการออกแบบใหม่โดยให้แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับสัญญาณแบบอยู่ในตัวเดียวกัน เมื่อไม่มีวัสดุอยู่แสงจะสะท้อนกลับเข้าตัวรับสัญญาณโดยปลายกรวยของตัวนำแสงแบบผลึก (Quart light conductor) เมื่อส่องแสงนี้ลงในของเหลว แสงจะหักเหกระจายไปในของเหลว อุปกรณ์จะทำงานกับหน่วยควบคุมที่แยกต่างหาก

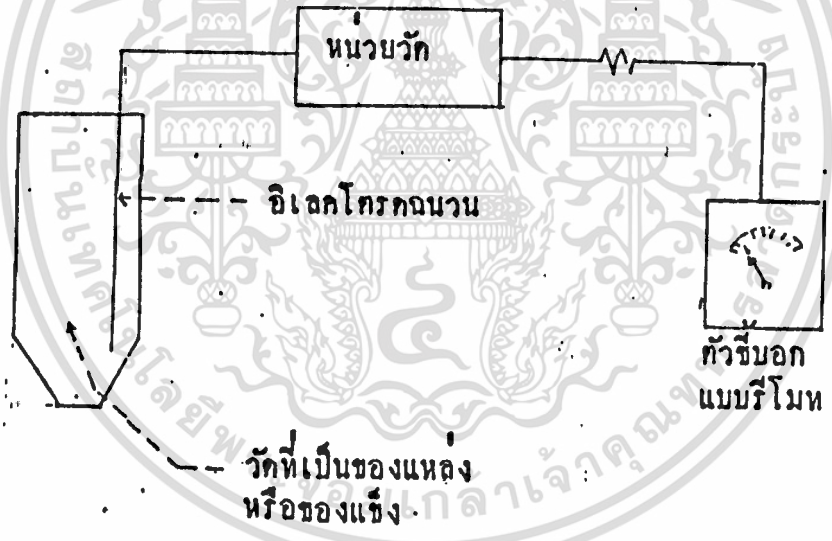
1.5 แบบคะปาซิเต็นซ์ (Capacitance)

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) มีความสามารถที่จะสะสมประจุไฟฟ้า (เมื่อนำแผ่นโลหะสองแผ่นวางขนานกันโดยมีฉนวนกั้นกลาง จะได้เป็นตัวเก็บประจุขนาดของคะปาซิเต็นซ์ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่นโลหะและระยะห่าง นอกจากนี้ถ้ามีวัสดุฉนวน เรียกว่า Dielectric) สอดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะจะทำให้ค่าคะปาซิเต็นซ์เพิ่มสูงขึ้นได้ เมื่อสอดแท่งโลหะเข้าในถังโลหะ โดยแท่งโลหะถูกกั้นจากถึงโลหะถูกกั้นจากถังโลหะด้วยฉนวน และถังโลหะจะถูกต่อลงดิน

เราสามารถแบ่งวัตถุออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ไม่เป็นตัวนำก็ฉนวนฉนวนก็ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซเหลว และพวกผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ตัวนำก็ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พวกสารละลายต่าง ๆ สำหรับของเหลวหรือของแข็งที่เป็นฉนวนอีเล็คโทรดที่ใช้วัดมักทำด้วยท่อ โลหะเปลือยหรือสันโลหะ และวัตถุจะเป็น (Dielectric) สำหรับของเหลวที่เป็นตัวนำจะใช้แท่งหรือเส้นโลหะหุ้มฉนวน ตัวฉน มักใช้ Polypro-pylene ซึ่งจะเป็นตัว Dielectric ในตัวเก็บประจุอีเล็คคทรดจะถูกติดตั้งในแนวตั้งหรือเกือบเป็นแนวตั้งและมีความยาวครอบคุลมถึงพิสัย Range ที่จะชี้บอกระดับที่เป็นเม็ดหุ่นชั้น นอกจากนี้ยังใช้กับถังรูปต่าง ๆ ได้โดยการเลือกอีเล็คโทรดให้เหมาะสมเท่านั้น ข้อเสียอันเดียวของแบบนี้ คือ ผู้ผลิตอุปกรณ์จะเป็นผู้เลือกอีเล็คโทรดไม่ใช่ผู้ใช้ ดังนั้น ต้องใช้ข้อมูลแก่ผู้ผลิตอุปกรณ์อย่างละเอียด

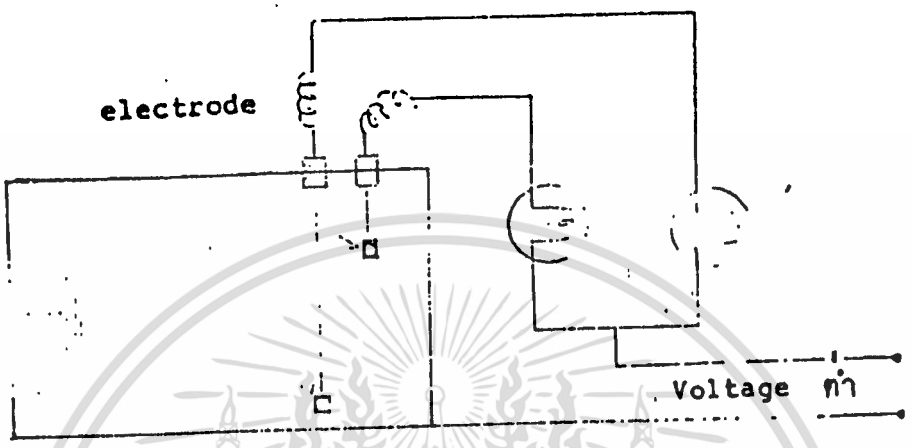



รูปวัดระดับแบบคาปาซิเต็นซ์

ข้อดีของระบบนี้ คือ ราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอีเล็คโทรนิคส์หรือไฟฟ้าแบบอื่น เนื่องจากเป็นแบบอีเล็คโทรนิคส์ จึงไม่ทำให้เกิดฮีสเตอร์ซีส (Hysteresis) หรือเกิดโหลด (over load) อุปกรณ์ชนิดนี้ทั้งแบบความปลอดภัยแท้จริง (Intrinsically safe) และแบบกันเพลิงสามารถสร้างได้ง่าย รวมตลอดถึงแบบทนแรงดันและทนอุณหภูมิสูงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การนำไฟฟ้า (Conductivity)




รูปวัดระดับแบบนำไฟฟ้า

อินสตรูเมนท์ที่วัดโดยวิธีนี้ ใช้สำหรับการควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ซึ่งระดับไม่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมากนัก เท่านั้น ใช้มากในสารละลาย เช่น น้ำเสีย เป็นต้น

แบบนี้เป็นเครื่องแบบอีเล็คโทรนิคส์ที่ง่ายและเชื่อถือได้ อีเล็คโทรดวัดระดับจะติดตั้งบนหัวของท่ออากาศความยาวนี้จะถูกตัดเพื่อให้ปลาย (Tip) อยู่ที่ระดับที่ต้องการควบคุมปกติแล้วจะใช้กราวน์อีเล็คโทรด(Ground Electrode) ที่ยาวกว่ายกเว้นท่อโลหะที่เป็นกราวน์นี้อยู่ในของเหลวเรียบร้อยแล้ว ในการทำงานจะป้อนสัญญาณ A.C แรงเคลื่อนต่ำเข้าสู่อีเล็คโทรดวัดระดับ(Level Electrode) เมื่อของเหลวที่เป็นตัวนำวัดวงจรระหว่างอีเล็คโทรดสู่กราวน์ หรือสู่กราวน์อีเล็คโทรด รีเลย์จะทำงานโดยตรง หรือโดยผ่านวงจรควบคุมตามตัวอย่างในรูป เราใช้อีเล็คโทรดตรวจระดับสองตัน อันหนึ่งสำหรับระดับต่ำอีกอันหนึ่งสำหรับระดับสูง ซึ่งจะใช้ควบคุมปั๊ม ระบบเช่นนี้เมื่อใช้กับจำนวนอีเล็คโทรดที่มีความยาวต่างกันหลาย ๆ อันสามารถทำเป็นฟังค์ชั่นต่าง ๆ อย่างได้ผล เช่น สวิทช์สำหรับควบคุมลำดับการเปิดปิดปั๊ม (Pumpsequence) หรือการควบคุมความเร็วมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมนี้มีข้อดี 3 อย่างคือ

1. ราคาต่ำ
2. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่
3. วงจรอีเล็คทรนิคส์เป็นแบบง่าย ๆ และทนทาน

ข้อเสีย คือ ใช้กับของเหลวและของแข็งที่เปียกชื้นบางชนิดเท่านั้น นอกจากนั้นยังไม่สามารถชี้บอกระดับได้

1.7 แบบแรงดัน (Pressure)

แรงดันที่ก้นภาชนะบรรจุ (Container) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับของของเหลว เราสามารถสร้างระบบวัดนี้โดยใช้ Pressure Transducer แบบไดอะแฟรม หรือไดอะแฟรมแค็ปซูลติดตั้งที่ก้นถังหรือข้างถัง ในกรณีที่ไม่สามารถเข้าถึงก้นถัง เช่น ถังที่ฝังอยู่ใต้ดินถังน้ำบาดาลที่สถานีสูบน้ำประปา อาจจะหย่อน Transducer จุมลงในน้ำจนอยู่ที่ระดับต่ำสุดที่จะวัด Transducer นี้มักจะโยงเชื่อมสู่อากาศผ่านท่อเพื่อให้ระดับที่อ่านไม่ถูกกระทบกระเทือนโดยแรงดันบรรยากาศ

Differential Transformer จะถูกประกอบเป็นส่วนหนึ่งภายใน Trans ducer วัดแรงดัน แกนของ Transformer จะขยับตำแหน่งไปมาโดยไดอะแฟรม Differential Transformer นี้ถูกกระตุ้นโดยแรงดันไฟฟ้าขนาดต่ำและสัญญาณเอ้าพุทจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกน Core เทียบกับ Transformer ดังนั้นสัญญาณเอ้าพุทที่เป็นไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันหรือกับระดับ Transmitter ที่ติดตั้งไว้ต่างหากสามารถส่งสัญญาณไกลออกไปเป็นไมล์ ๆ ได้โดยสายเคเบิ้ล

Transducer ประกอบด้วยไดอะแฟรมที่มี Strain Gage หรือวงจรบริดจ์เชื่อมติดอยู่เพื่อรับการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงดันของของเหลว เนื่องจากการเคลื่อนระยะของไดอะแฟรมน้อยมากจึงไม่ทำให้เกิดความผิดพลาด เนื่องจากตะกอนต่าง ๆ เมื่อใช้ในแม่น้ำหรือท่อประปา ในระดับอื่น แรงที่เกิดขึ้นบนเบลโลส์ (Bellows) อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ถูกส่งผ่านระบบของคานสู่แฟลับเปอร์น็อซเซิลและรีเลย์ควบคุมทำให้ได้เอ้าพุท 3-15 Psi ที่แปรตามระดับของของเหลวตามต้องการ แรงดันนั้นอาจป้อนเข้าสู่ระบบที่บรรจุด้วยน้ำมัน และอ่านระดับได้โดยเกจวัดแรงดันมาตรฐานได้ หรือส่งเป็นระบบลม Pneumatic ระบบนี้สามารถทำให้ปลอดภัยอย่างแท้จริงได้ สำหรับติดตั้งในที่ที่ระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิดง่ายปกติจะมีความแม่นยำ 1-2 % ใช้วัดระดับของน้ำมัน ก๊าซเหลว ของเหลวที่กัดกร่อน ฯลฯ ได้ การวัดแบบแรงดันแตกต่างสามารถทำได้ในภาชนะที่มีแรงดัน

ระบบนี้มีข้อเสียคือ สามารถวัดได้แต่ของเหลว ราคาแพงกว่าแบบคะปาซิเต็นซ์ที่มีความแม่นยำเท่ากันและ Transducer มี Maximum Overload Pressure ซึ่งต้องไม่ให้แรงดันในถังเกินแรงดันนี้

ระบบนี้ยังมี Pressure Switch อีกหลาย ๆ ชนิดซึ่งใช้ควบคุมระดับแบบเป็นจุด ๆ สำหรับวัตถุที่เป็นผงหรือเป็นเม็ด อาจติดตั้งข้าง Hopper หรือ แขวนด้วยเชือก และจะใช้จำนวนมากเท่าใดก็ได้

สวิทช์นี้มักจะประกอบด้วยไดอะแฟรมรับแรงดัน ต่อเข้ากับไมโครสวิทช์ บางที่ใช้วัตถุต่าง ๆ เช่น Neoprene, PTFE, Siliceone, Nylon และ Nitrile Rubber คลุมไดอะแฟรมไว้เพื่อใช้กับวัสดุต่าง ๆ ได้บางชนิด สามารถปรับความไวแรงดันที่รับได้ บางชนิดสามารถวัดได้ ตั้งแต่ค่าประมาณ 10-15 กรัม จนถึง 400-500 กรัม อุปกรณ์สามารถขดเขยแรงดันได้เพื่อใช้กับภาชนะที่มีแรงดันสูง สวิทช์นี้ไม่ค่อยแม่นยำเท่าใดนัก เพราะวัสดุผ่านมันก่อนที่จะมีการเปิดปิดสวิทช์ ข้อเสียอื่นคือ ของเหลวที่หยาบมักจะทำให้ผิวเคลือบบนไดอะแฟรมสึก

## 1.8 ตัวแทนที่ของเหลว (Displacers)

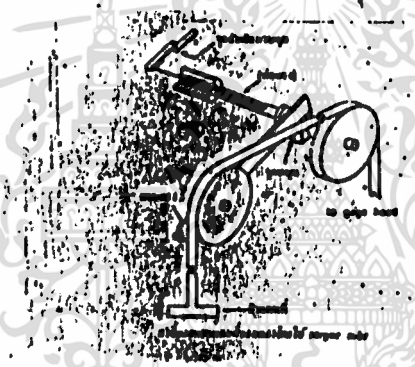
ระบบนี้ใช้ลูกลอยยาวที่ให้แรงดันขึ้นบน Upward มากขึ้นและมากขึ้น ขณะที่ระดับของของเหลวเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะเป็นแบบการลอยตัว Buoyant แต่ลูกลอยไม่จำเป็นต้องลอยจริง ๆ โดยปกติจะต่อเข้ากับระบบ Torque tube ปลายเปิดจะเชื่อมไว้กับท่อนกลมที่ต่อเข้ากับลูกลอย ดังนั้น แรงดันขึ้นของลูกลอยจะถูกแปลงเป็นการหมุนของท่อนกลมและ Torque Tube การเคลื่อนที่ของปลายอิสระของท่อสามารถเปลี่ยนไปเป็นการส่งสัญญาณใด ๆ ที่ต้องการได้ ทั้งแบบไฟฟ้า แบบลม และแบไฮดรอลิค โดยการใช้ Transducer ที่เหมาะสม

ข้อจำกัดของระบบมีดังนี้คือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่อาจติดขัด ระบบมีพิสัยของการวัดจำกัดอาจมีปัญหาเนื่องจากการไหลแบบรุนแรง Turbulence สามารถใช้กับของของเหลวได้เท่านั้น ข้อดีของแบบนี้คือมีเสถียรภาพทั้งในแรงดันและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิสูงและมีความแม่นยำดี Tesonant ของ Piezoelectric Crystal ที่ติดตั้งใน Transducer ซึ่งมีความถี่เพียงสิบ ๆ กิโลเฮิทซ์เท่านั้น พัลส์ของพลังงานที่ส่งออกมาจะกระทบกับวัตถุ และพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับสู่แหล่งส่งรับ เวลาที่ส่งผ่านและรับสัญญาณจะสามารถใช้หาระยะทางที่เดินทางในตัวกลางหนึ่งได้ ซึ่งเวลานี้สามารถวัดและแสดงออกในรูปของระยะทาง

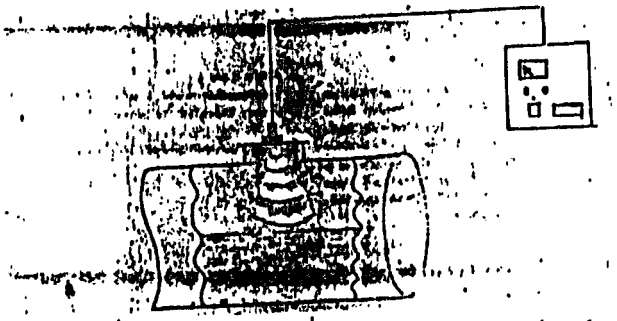
แบบคลื่นเหนือเสียงนี้มีขีดจำกัด คือ ระบบนี้อาจใช้กับของเหลวของแข็งที่เป็นผง เป็นเม็ด กัดกร่อนและผิวระหว่างของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ 2 ชนิด อย่างไรก็ดีต้องติดตั้ง Transducer ไว้ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง เหนือหรือใต้ผิวเพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณสะท้อนกลับที่ Ansducer อย่างถูกต้อง ถ้าเป็นของแข็งหรือผงคลื่นที่สะท้อนกลับจะมีความเข้มพอ ทำให้ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงทิศทางเข้มงวดมากนัก และไม่จำเป็นว่าผิดของวัตถุจำเป็นต้องเรียบด้วย



1.9 แบบคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonics)

แบบคลื่นเหนือเสียงจะให้ความแม่นยำเหมือนกับเรด้าร์ (Redar) แต่ไม่ยุ่งยากเท่าและทำงานด้วยความถี่ต่างกัน ในกรณี Radar เสาอากาศ Tadar ส่ง Pulse ที่ถูก Modulator ที่ความถี่เป็นสิบ ๆ MHZ เท่านั้น Pulse ของพลัง งานที่ส่งออกมาจะกระทบกับวัตถุ และพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับสู่แหล่งส่งกับ Reciver เวลาที่ส่งผ่านและรับสัญญาณจะสามารถใช้หาระยะทางที่เดินทางในตัวกลางหนึ่งได้ ซึ่งเวลานี้สามารถวัดและแสดงออกในรูปของระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวชี้บอกแบบคลื่นเหนือเสียงที่ทางานคล้ายเรด้าร์ Radar

ระบบอาจจะแยกตัวรับและส่งต่างหาก หรืออาจจะรวมอยู่ในตัวเดียวกัน บางระบบส่งสัญญาณจากกันภายนะผ่านตัวกลางสู่ผิวแล้วสะท้อนกลับ บางระบบก็ส่งผ่านอากาศกระทบผิวของเหลว (ของแข็ง) แล้วสะท้อนกลับ แบบที่ส่งสัญญาณผ่านตัวกลางนั้นอุณหภูมิ และแรงดันของตัวกลางมีผลต่อความเร็วภาควิ่งของ Pulse ดังนั้นจึงจาเป็นต้องปรับเทียบที่ Site

แบบคลื่นเหนือเสียงนี้มีขีดจากัดคือ ระบบนี้อาจใช้กับของเหลวของแข็งที่เป็นผล เป็นเม็ด กัดกร่อนและผิวระหว่างของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ 2 ชนิด อย่างไรก็ดีต้องติดตั้ง Trausducer ไว้ที่ตาแหน่งที่ถูกต้องเหนือหรือใต้ผิวเพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณสะท้อนกลับที่ Transducer อย่างถูกต้อง ถ้าเป็นของแข็งหรือผลคลื่นที่สะท้อนกลับจะมีความแข็งพอ ทาให้ไม่จาเป็นต้องคานึงถึงทิศทาง เข้มงวดมากนักและไม่จาเป็นว่าผิวของวัตถุจาเป็นต้องเรียบด้วยของเหลวที่ไหลแบบปั่นป่วนก็ไม่สามารถ สะท้อนพลังงานกลับสู่ตัวรับได้ตลอดเวลา ในกรณีนี้ควรติดตั้งท่อตั้งไว้เพื่อให้แน่ใจว่าของเหลวผิวเรียบ

ในเกือบทุก ๆ ระบบ จะส่งสัญญาณมากกว่าหนึ่ง Pluse/sec ทาให้อ่านระดับอย่างต่อเนื่องได้ เวลาที่ล่วงไประหว่าง Pluse ที่ถูกส่ง และรับจะวัดได้โดยวิธีต่อไปนี้คือ ใช้ออสซิสเรเตอร์ Oscillator ที่มี Stable และวงจร Counter ซึ่งจะถูกเปลี่ยนสภาพโดยคลื่นส่ง และถูกเปลี่ยนสภาพกลับโดยคลื่นรับจานวนรอบของการ Oscillator จะเป็นแปรผันโดยตรงกับระยะทางระหว่าง Transducer และผิวของวัตถุ การอ่านค่าอาจใช้ Instrynebt แบบ moving coil หรือแบบ digital ได้

ข้อดีมาก ๆ คือให้ความปลอดภัย ทันสมัยมาก และจากัดสาหรับการใช้งานพิเศษเท่านั้น

## 1.10 อุปกรณ์แผ่รังสี Radiation Devices

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

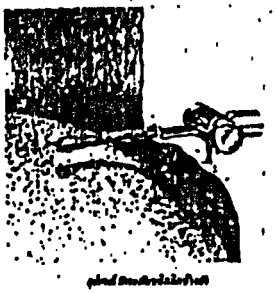
อันตรายที่เกิดขึ้นจากระบบนี้มีอยู่น้อยที่สุด ถึงแม้ว่าระบบนี้จะมีราคาแพงที่สุด แต่ข้อดีคือ คลื่นรังสีวิทยุนี้สามารถส่งผ่านผนังภาชนะได้โดยไม่ต้องมีช่วงว่างในภาชนะบรรจุเลย จึงไม่จำเป็นต้องเปิดส่วนใดส่วนหนึ่งของภาชนะบรรจุ

มักใช้ Cobalt-60 , Cesium 137 หรือ Radium 226 เป็นแหล่งรังสีแกมม่าติดตั้งแหล่งกำเนิดรังสีข้างหนึ่งของผนัง และติดตั้งชุดของท่อ Geiger miller บนผนังด้านตรงข้าม ขณะที่รังสีแกมม่าผ่านตัวกลาง ความเข้มจะค่อยลงซึ่งของเหลวหรือของแข็งจะทำให้ความเข้มลดลงมากกว่าอากาศ ดังนั้นถ้าวัตถุในภาชนะบรรจุเพิ่มขึ้น สัญญาณการแผ่รังสีที่รับโดยท่อ Geiger-Miller จะค่อย ๆ ลดลง O/P ที่เป็นอัตรา Pluse จะลดลงด้วยถ้าวัดอัตรา Pluse นี้จะทราบระดับตามต้องการระบบนี้ไม่ค่อยแม่นยำนัก มักใช้เป็นตัวควบคุม ระดับที่มีท่อ Geiger- Miller ตัวเดียว ถ้าต้องการให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นก็ใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมม่าเป็นท่อนยาว ราคาก็เพิ่มขึ้นด้วย

1.11 ตัวสั่น Vibrators

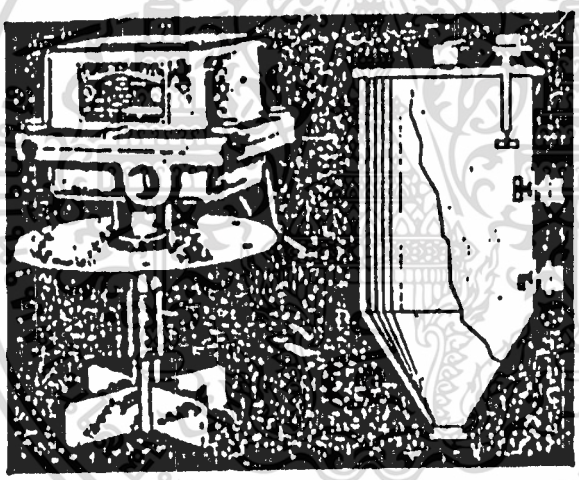
ตัวควบคุมระดับชนิดนี้ประกอบด้วย Head และ Boss ซึ่งติดตั้งเข้ากับเหล็กสองขา Tuning Fork ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลสหรืออะลูมินั่ม ใช้สำหรับวัสดุที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือผงเท่านั้น ในการทำงานตัวรับสัญญาณที่เป็นเหล็กสองขานี้จะสั่นที่ความถี่รีโซแนนซ์เมื่ออยู่ในอากาศเมื่อถูกปกคลุมด้วยผง การสั่นจะหยุดหรือค่อย ๆ ลดลงเมื่อฝุ่นลดลงต่ำกว่าระดับเหล็กสองขาจะสั่นอีก การเปลี่ยนสภาพนี้จะถูกตรวจจับทางอิเล็คทรอนิคส์และไปกระตุ้นรีเลย์ได้ ควรจะติดตั้งอุปกรณ์ตัวสั่นนี้ที่ด้านข้างของภาชนะบรรจุ ในแนวราบที่ระดับที่ต้องการวัดหรือควบคุมแต่การติดตั้งวิธีนี้อาจจะเสียหายได้ เนื่องจากแรงดันของวัตถุหรือแรงกระแทกของวัตถุที่ตกลงมา ดังนั้นจึงมักจะใช้เป็นตัวเตือน Alarm สำหรับระดับสูง High level alarm และสำหรับวัตถุที่มีน้ำหนักจำเพาะต่ำ เช่น เม็ดพลาสติก เป็นต้น ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งก็คือ ถ้าวัสดุจับเกาะที่ขาทั้งสองข้างของตัววัดจะทำให้หยุดสั่นซึ่งไม่สามารถใช้ทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์วัดระดับชนิดติดข้างถัง

1.12 แบบใบพาย Paddles



อุปกรณ์ใบพายสำหรับการวัดระดับของแข็ง

อุปกรณ์ใบพายสำหรับการวัดระดับของแข็ง คล้ายกับแบบตัวสั่นอุปกรณ์แบบใบพายนี้จะหยุดการหมุนเมื่อวัสดุขึ้นมาถึงระดับมัน

ตัวตรวจวัดนี้ประกอบด้วยหัวซึ่งติดตั้ง เกียร์ซิงโครนัสมอเตอร์ Synchronous motor และรีเลย์ควบคุมอยู่ภายใน ใบพายจะหมุนในท่ออย่างช้า ๆ เมื่อวัตถุดิบขวางการหมุนแรงบิดที่เพิ่มขึ้นจะถูกตรวจจับ และวงจรควบคุมจะหยุดมอเตอร์ และให้สัญญาณเอ๊าพุท เมื่อวัตถุมีระดับลดลง วงจรควบคุมจะกลับอยู่สถานะเริ่มต้นใหม่ และใบพายจะหมุนอีก อุปกรณ์ใบพายนี้สามารถติดตั้งที่สูงหรือต่ำในถังทำให้สามารถควบคุมระดับสูงหรือต่ำได้อุปกรณ์เหล่านี้จะรวมพวกคลัทช์ไว้เพื่อป้องกันมอเตอร์และเกียร์ในกรณีช่องโหลดที่มีลักษณะกระชาก Surge load บนใบพาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมแบบใบพายนี้ ใช้กับวัสดุที่เป็นเม็ดหรือผง เท่านั้น และเนื่องจากบางส่วนเป็นอุปกรณ์ทางเครื่องกล ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้จึงมักจะเสียบ่อย ๆ วัสดุที่เป็นของแข็งมักทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เพราะฝุ่นมักเข้าระหว่างซีลและแบริ่ง ทำให้แรงบิด Torque เพิ่มมากขึ้นอาจทำให้มอเตอร์หยุดได้ในกรณีที่ไม่มีวัสดุ

เมื่อติดตั้งที่ข้างถัง มักจะติดตั้งเครื่องป้องกันไว้บนใบพายเพื่อป้องกันการเสียหายเนื่องจากวัสดุตกลงมากระทบถูกใบพาย จำนวนใบจะถูกกำหนดตามชนิดของวัสดุที่จะวัด

ในการนำ FLOATLESS ไปประยุกต์ใช้ทางด้านอื่น ๆ

เราสามารถนำเอา FLOATLESS นี้ไปควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นที่เราเห็นกันอยู่ทั่วไปปกติแล้วเมื่อน้ำในถังหมดแล้วเราต้องเปลี่ยนถังน้ำใหม่ เพื่อที่จะได้มีน้ำสำหรับไว้คุ้มต่อไปทำให้เสียเวลาเปลี่ยนถังแล้วต้องออกแรงยกถังน้ำขนาด 20 ลิตร ซึ่งน้ำหนักของน้ำพอที่จะทำให้เกิดอาการปวดหลังได้

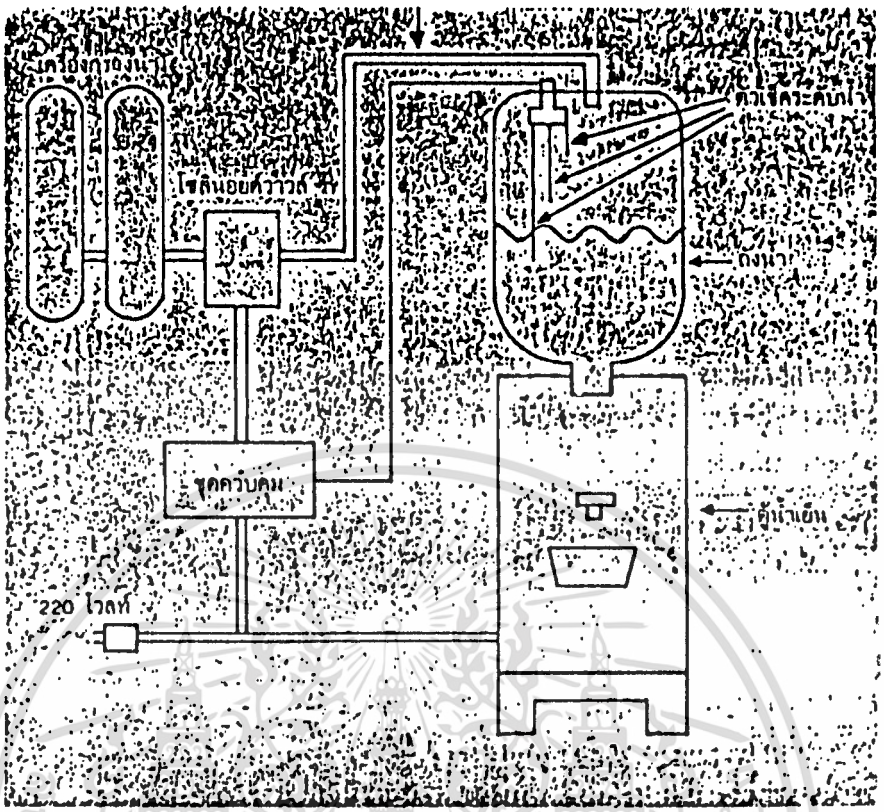
คุณสมบัติของเครื่อง

1. เป็นเครื่องเติมน้ำอัตโนมัติ ใช้กับตู้น้ำเย็นทั่ว ๆ ไป
2. ใช้ได้กับตู้น้ำเย็นขนาดบรรจุน้ำ 20 ลิตร
3. สามารถนำไปติดตั้งกับตู้น้ำเย็นได้สะดวก
4. ใช้กับไฟฟ้า 220 v.

หลักการทำงาน

เราจะนำน้ำที่สะอาดแล้ว เช่น น้ำฝนที่บรรจุในแท็งค์น้ำหรือน้ำบาดาลที่อยู่บนแท็งค์น้ำหรือน้ำประปาก็ได้โดยต้องต่อผ่านโซลินอยด์วาวล์ซึ่งเป็นตัวปิดเปิดน้ำสู่ถังเก็บน้ำ โดยที่ถังน้ำที่ติดมากับตู้ทำน้ำเย็นเราจะต่อสายไฟเส้นเล็ก ๆ เข้ากับแท่ง ELECTHOD เพื่อเป็นตัวเช็คระดับน้ำกรณีที่น้ำในถังลดลงถึงระดับน้ำที่เราตั้งไว้จะทำให้เครื่องควบคุมระดับน้ำส่งแรงไฟ 220 โวลต์ไปทำให้โซลินอยด์วาวล์ทำงานปล่อยให้น้ำจากท่อที่ต่อเข้ามาไหลลงสู่ถังน้ำเย็นได้จนระดับน้ำที่ไหลเข้ามาสูงถึงระดับที่เราตั้งไว้ก็จะส่งผลให้เครื่องควบคุมการเปิดปิดน้ำตัดแรงไฟฟ้า 220 โวลต์ที่ส่งเข้าโซลินอยด์วาวล์ทำให้โซลินอยด์วาวล์ปิดน้ำที่ไหลเข้าถังพักน้ำเย็น พอน้ำลดลงถึงระดับที่ตั้งไว้โซลินอยด์ก็จะปล่อยให้น้ำเข้าสู่ถังอีกจนถึงระดับที่ตั้งไว้โซลินอยด์ก็ปิดน้ำอีกเป็นเช่นนี้ตลอดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2 แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องเปิด-ปิดน้ำอัตโนมัติ

การประกอบถังน้ำเย็น

นำถังน้ำเย็นที่มีอยู่เดิมกับตู้น้ำเย็นทำการเจาะรูด้านถังให้มีขนาดโต พอที่จะนำแท่ง ELECTHODE ใส่เข้าไปได้โดยแท่ง ELECTHODE มีความยาวต่างกัน 3 ระดับ ตามรูปที่ 2 หลังจากนั้นนำสายไฟต่อจากแท่ง ELECTHODE ต่อไปยังชุดควบคุมถังน้ำยึดติดกับตู้เย็น โดยใช้กาวติดกระจกเป็นตัวยึดไม่ให้ถังน้ำเคลื่อนที่และป้องกันน้ำในถังที่รั่วออกมา เจาะรูสำหรับต่อท่อน้ำและต่อท่อน้ำไปยังโซลินอยด์วาวล์ทำการนำไปใช้งาน

เมื่อทำการติดตั้งเสร็จ ก็นำไปต่อกับท่อน้ำที่ส่งมาจากก๊อกน้ำถ้าน้ำนั้นไม่สะอาดก็ต้องผ่านเครื่องกรองน้ำอีกทีก็ได้ เมื่อเสียบปลั๊กไฟโซลินอยด์จะเปิดให้น้ำเข้าไปในถังทันทีกรณีที่น้ำเข้ามามีแรงดันมากก็ควรใช้ก๊อกน้ำเป็นประตูสำหรับลดความดันของน้ำก่อนปล่อยเข้าสู่โซลินอยด์วาวล์เพื่อให้โซลินอยด์วาวล์ปิดน้ำได้สนิทจริง ๆ เมื่อโซลินอยด์วาวล์ถูกควบคุมให้ปิด สังเกตุเมื่อน้ำเพิ่มระดับถึงจุดที่ตั้งได้โซลินอยด์วาวล์ก็จะปิดให้น้ำ ลองทดสอบโดยการเปิดก๊อกน้ำที่ตู้น้ำเย็นทิ้งจนระดับน้ำในถังลดระดับถึงจุดต่ำสุดที่ตั้งไว้โซลินอยด์ก็จะเปิดให้น้ำเข้าไปในถังอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MC145026
# MC145027
# MC145028
# SC41342
# SC41343
# SC41344

## Encoder and Decoder Pairs
### CMOS

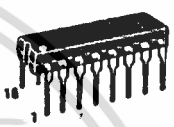
These devices are designed to be used as encoder/decoder pairs in remote control applications.

The MC145026 encodes nine lines of information and serially sends this information upon receipt of a transmit enable ($\overline{TE}$) signal. The nine lines may be encoded with trinary data (low, high, or open) or binary data (low or high). The words are transmitted twice per encoding sequence to increase security.

The MC145027 decoder receives the serial stream and interpets five of the trinary digits as an address code. Thus, 243 addresses are possible. If binary data is used at the encoder, 32 addresses are possible. The remaining serial information is interpeted as four bits of binary data. The valid transmission output (VT) goes high on the MC145027 when two conditions are met. First, two addresses must be consecutively received (in one encoding sequence) which both match the local address. Second, the 4-bits of data must match the last valid data received. The active VT indicates that the information at the data output pins has been updated.

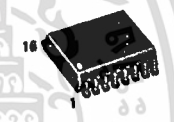
The MC145028 decoder treats all nine trinary digits as an address which allows 19,683 codes. If binary data is encoded, 512 codes are possible. The valid transmission output (VT) goes high on the MC145028 when two addresses are consecutively received (in one encoding sequence) which both match the local address.

- Operating Temperature Range: –40° to 85°C
- Very-Low Standby Current for the Encoder: 300 nA Maximum @ 25°C
- Interfaces with RF, Ultrasonic, or Infrared Modulators and Demodulators
- RC Oscillator, No Crystal Required
- High External Component Tolerance; Can Use ±5% Components
- Internal Power-On Reset Forces All Decoder Outputs Low
- For Infrared Applications, See Applications Note AN1016
- Operating Voltage Range: 4.5 to 18 V
- Low-Voltage Versions Available —
  - SC41342: 2.5 to 18 V Version of the MC145026
  - SC41343: 2.8 to 10 V Version of the MC145027
  - SC41344: 2.8 to 10 V Version of the MC145028



P SUFFIX
PLASTIC DIP
CASE 648

D SUFFIX
SOG
CASE 751B

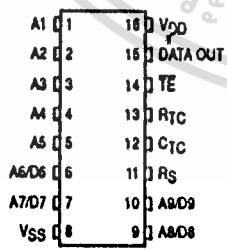


DW SUFFIX
SOG
CASE 751G

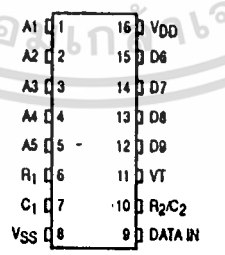
**ORDERING INFORMATION**

| | |
|---|---|
| MC145026P, SC41342P | Plastic DIP |
| MC145026D, SC41342D | SOG Package |
| MC145027P, SC41343P | Plastic DIP |
| MC145027DW, SC41343DW | SOG Package |
| MC145028P, SC41344P | Plastic DIP |
| MC145028DW, SC41344DW | SOG Package |

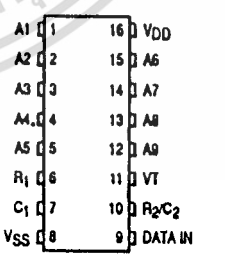
**PIN ASSIGNMENTS**




MC145026
SC41342
ENCODERS




MC145027
SC41343
DECODERS




MC145028
SC41344
DECODERS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

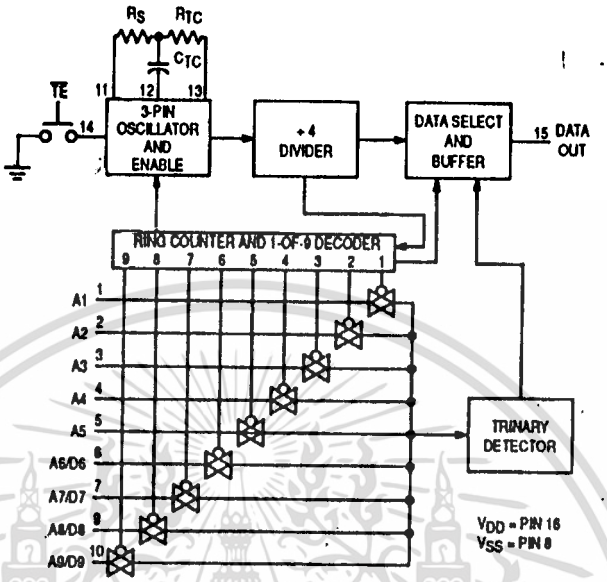



Figure 1. MC145026 Encoder Block Diagram

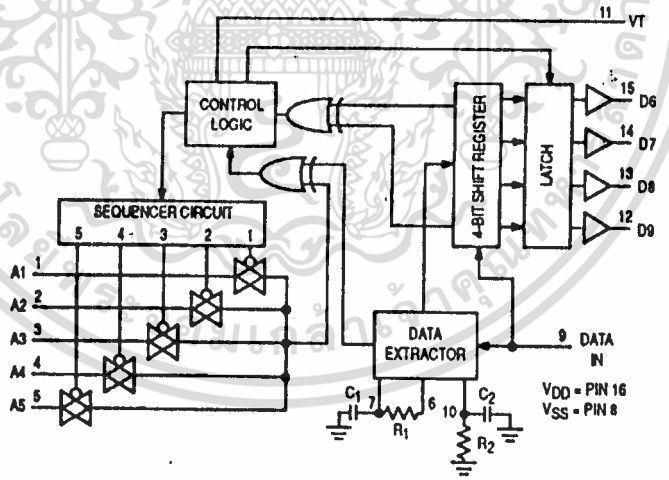



Figure 2. MC145027 Decoder Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

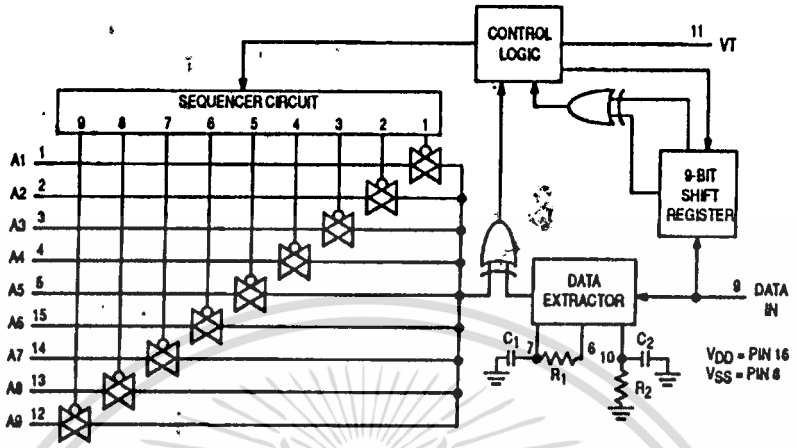



Figure 3. MC145028 Decoder Block Diagram

**MAXIMUM RATINGS*** (Voltage Referenced to $V_{SS}$)

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|---|---|---|---|
| $V_{DD}$ | DC Supply Voltage (except SC41343, SC41344) | −0.5 to +18 | V |
| $V_{DD}$ | DC Supply Voltage (SC41343, SC41344 only) | −0.5 to +10 | V |
| $V_{in}$ | DC Input Voltage | −0.5 to $V_{DD}$+0.5 | V |
| $V_{out}$ | DC Output Voltage | −0.5 to $V_{DD}$+0.5 | V |
| $I_{in}$ | DC Input Current, per Pin | ±10 | mA |
| $I_{out}$ | DC Output Current, per Pin | ±10 | mA |
| $P_D$ | Power Dissipation, per Package | 500 | mW |
| $T_{stg}$ | Storage Temperature | −65 to +150 | °C |
| $T_L$ | Lead Temperature, 1 mm from Case for 10 Seconds | 260 | °C |

* Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation should be restricted to the limits in the Electrical Characteristics tables or Pin Descriptions section.

This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, $V_{in}$ and $V_{out}$ should be constrained to the range $V_{SS} \le (V_{in}$ or $V_{out}) \le V_{DD}$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS — MC145026, MC145027, MC145028, and SC41342* (Voltage Referenced to $V_{SS}$)**

| Symbol | Characteristic | $V_{DD}$ V | Guaranteed Limit | | | | | | Unit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | −40°C | | 25°C | | +85°C | | |
| | | | Min | Max | Min | Max | Min | Max | |
| $V_{OL}$ | Low-Level Output Voltage ($V_{in}$ = $V_{DD}$ or 0) | 5.0 | — | 0.05 | — | 0.05 | — | 0.05 | V |
| | | 10 | — | 0.05 | — | 0.05 | — | 0.05 | |
| | | 15 | — | 0.05 | — | 0.05 | — | 0.05 | |
| $V_{OH}$ | High-Level Output Voltage ($V_{in}$ = 0 or $V_{DD}$) | 5.0 | 4.95 | — | 4.95 | — | 4.95 | — | V |
| | | 10 | 9.95 | — | 9.95 | — | 9.95 | — | |
| | | 15 | 14.95 | — | 14.95 | — | 14.95 | — | |
| $V_{IL}$ | Low-Level Input Voltage | | | | | | | | V |
| | ($V_{out}$ = 4.5 or 0.5 V) | 5.0 | — | 1.5 | — | 1.5 | — | 1.5 | |
| | ($V_{out}$ = 9.0 or 1.0 V) | 10 | — | 3.0 | — | 3.0 | — | 3.0 | |
| | ($V_{out}$ = 13.5 or 1.5 V) | 15 | — | 4.0 | — | 4.0 | — | 4.0 | |
| $V_{IH}$ | High-Level Input Voltage | | | | | | | | V |
| | ($V_{out}$ = 0.5 or 4.5 V) | 5.0 | 3.5 | — | 3.5 | — | 3.5 | — | |
| | ($V_{out}$ = 1.0 or 9.0 V) | 10 | 7.0 | — | 7.0 | — | 7.0 | — | |
| | ($V_{out}$ = 1.5 or 13.5 V) | 15 | 11 | — | 11 | — | 11 | — | |
| $I_{OH}$ | High-Level Output Current | | | | | | | | mA |
| | ($V_{out}$ = 2.5 V) | 5.0 | −2.5 | — | −2.1 | — | −1.7 | — | |
| | ($V_{out}$ = 4.6 V) | 5.0 | −0.52 | — | −0.44 | — | −0.36 | — | |
| | ($V_{out}$ = 9.5 V) | 10 | −1.3 | — | −1.1 | — | −0.9 | — | |
| | ($V_{out}$ = 13.5 V) | 15 | −3.6 | — | −3.0 | — | −2.4 | — | |
| $I_{OL}$ | Low-Level Output Current | | | | | | | | mA |
| | ($V_{out}$ = 0.4 V) | 5.0 | 0.52 | — | 0.44 | — | 0.36 | — | |
| | ($V_{out}$ = 0.5 V) | 10 | 1.3 | — | 1.1 | — | 0.9 | — | |
| | ($V_{out}$ = 1.5 V) | 15 | 3.6 | — | 3.0 | — | 2.4 | — | |
| $I_{in}$ | Input Current — $\overline{TE}$ (MC145026 and SC41342, Pullup Device) | 5.0 | — | — | 3.0 | 11 | — | — | µA |
| | | 10 | — | — | 16 | 60 | — | — | |
| | | 15 | — | — | 35 | 120 | — | — | |
| $I_{in}$ | Input Current $R_S$ (MC145026 and SC41342), Data In (MC145027, MC145028) | 15 | — | ±0.3 | — | ±0.3 | — | ±1.0 | µA |
| $I_{in}$ | Input Current | | | | | | | | µA |
| | A1-A5, A6/D6–A9/D9 (MC145026 and SC41342), | 5.0 | — | — | — | ±110 | — | — | |
| | A1-A5 (MC145027), | 10 | — | — | — | ±500 | — | — | |
| | A1-A9 (MC145028) | 15 | — | — | — | ±1000 | — | — | |
| $C_{in}$ | Input Capacitance ($V_{in}$ = 0) | — | — | — | — | 7.5 | — | — | pF |
| $I_{DD}$ | Quiescent Current — MC145026 and SC41342 | 5.0 | — | — | — | 0.1 | — | — | µA |
| | | 10 | — | — | — | 0.2 | — | — | |
| | | 15 | — | — | — | 0.3 | — | — | |
| $I_{DD}$ | Quiescent Current — MC145027, MC145028 | 5.0 | — | — | — | 50 | — | — | µA |
| | | 10 | — | — | — | 100 | — | — | |
| | | 15 | — | — | — | 150 | — | — | |
| $I_{dd}$ | Dynamic Supply Current — MC145026 and SC41342 ($f_C$ = 20 kHz) | 5.0 | — | — | — | 200 | — | — | µA |
| | | 10 | — | — | — | 400 | — | — | |
| | | 15 | — | — | — | 600 | — | — | |
| $I_{dd}$ | Dynamic Supply Current — MC145027, MC145028 ($f_C$ = 20 kHz) | 5.0 | — | — | — | 400 | — | — | µA |
| | | 10 | — | — | — | 800 | — | — | |
| | | 15 | — | — | — | 1200 | — | — | |

*Also see next Electrical Characteristics table for 2.5 V specifications.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS — SC41342** (Voltage Referenced to $V_{SS}$)

| Symbol | Characteristic | $V_{DD}$ V | Guaranteed Limit | | | | | | Unit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | −40°C | | 25°C | | +85°C | | |
| | | | Min | Max | Min | Max | Min | Max | |
| $V_{OL}$ | Low-Level Output Voltage ($V_{in}$ = 0 V or $V_{DD}$) | 2.5 | — | 0.05 | — | 0.05 | — | 0.05 | V |
| $V_{OH}$ | High-Level Output Voltage ($V_{in}$ = 0 V or $V_{DD}$) | 2.5 | 2.45 | — | 2.45 | — | 2.45 | — | V |
| $V_{IL}$ | Low-Level Input Voltage ($V_{out}$ = 0.5 V or 2.0 V) | 2.5 | — | 0.3 | — | 0.3 | — | 0.3 | V |
| $V_{IH}$ | High-Level Input Voltage ($V_{out}$ = 0.5 V or 2.0 V) | 2.5 | 2.2 | — | 2.2 | — | 2.2 | — | V |
| $I_{OH}$ | High-Level Output Current ($V_{out}$ = 1.25 V) | 2.5 | 0.28 | — | 0.25 | — | 0.2 | — | mA |
| $I_{OL}$ | Low-Level Output Current ($V_{out}$ = 0.4 V) | 2.5 | 0.22 | — | 0.2 | — | 0.16 | — | mA |
| $I_{in}$ | Input Current (TE — Pullup Device) | 2.5 | — | — | 0.09 | 1.8 | — | — | µA |
| $I_{in}$ | Input Current (A1-A5, A6/D6-A9/D9) | 2.5 | — | — | — | ±25 | — | — | µA |
| $I_{DD}$ | Quiescent Current | 2.5 | — | — | — | 0.05 | — | — | µA |
| $I_{dd}$ | Dynamic Supply Current ($f_c$ = 20 kHz) | 2.5 | — | — | — | 40 | — | — | µA |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 4.

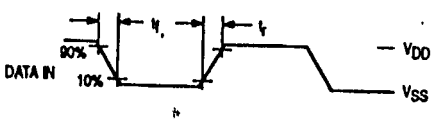



Figure 5.

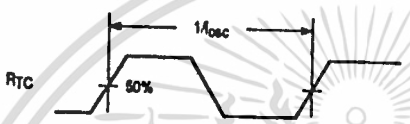



Figure 6.

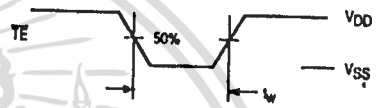
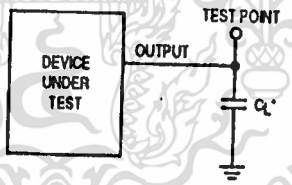



Figure 7.




*INCLUDES ALL PROBE AND JIG CAPACITANCE.

Figure 8. Test Circuit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OPERATING CHARACTERISTICS

### MC145026

The encoder serially transmits trinary data as defined by the state of the A1 through A5 and A6/D6 through A9/D9 input pins. These pins may be in either of three states (low, high, or open) allowing 19,683 possible codes. The transmit sequence is initiated by a low level on the $\overline{TE}$ input pin. Each time the $\overline{TE}$ input is forced low, the encoder outputs two identical data words. Between the two data words, no signal is sent for three data periods. If the $\overline{TE}$ input is kept low, the encoder continuously transmits the data word. See Figure 10.

Upon power-up the MC145026 can continuously transmit data as long as $\overline{TE}$ remains low. The device can transmit two-word sequences by pulsing $\overline{TE}$ low. However, no application should be designed to rely upon the first data word transmitted after power-up, because this first word is invalid data.

Each transmitted trinary digit is encoded into pulses (See Figure 11). A logic zero (low) is encoded as two consecutive short pulses, a logic one (high) as two consecutive long pulses, and an open (high-impedance) as a long pulse followed by a short pulse. The input state is determined by using a weak "output" device to try to force each input first low, then high. If only a high state results from the two tests, the input is assumed to be hardwired to $V_{DD}$. If only a low state is obtained, the input is assumed to be hardwired to $V_{SS}$. If both a high and a low can be forced at an input, an open is assumed and is encoded as such. The "high" and "low" levels are 70% and 30% of the supply voltage as shown in the Electrical Characteristics Table. The weak "output" device sinks/sources up to 110 μA at a 5 V supply level, 500 μA at 10 V, and 1 mA at 15 V.

The $\overline{TE}$ input has an internal pullup device so that a simple switch may be used to force the input low. While $\overline{TE}$ is high, the encoder is completely disabled, the oscillator is inhibited, and the current drain is reduced to quiescent current. When $\overline{TE}$ is brought low, the oscillator is started, and the transmit sequence begins. The inputs are then sequentially selected, and determinations are made as to the input logic states. This information is serially transmitted via the Data Out pin.

### MC145027

This decoder receives the serial data from the encoder and outputs the data, if it is valid. The transmitted data, consisting of two identical words, is examined bit by bit during reception. The first five trinary digits are assumed to be the address. If the received address matches the local address, next four (data) bits are internally stored, but are not transferred to the output data latch. As the second encoded word is received, the address must again match. If a match occurs, the new data bits are checked against the previously stored data bits. If the two nibbles of data (four bits each) match, the data is transferred to the output data latch by VT and remains until new data replaces it. At the same time, the VT output pin is brought high and remains high until an error is received or until no input signal is received for four data periods. See Figure 10.

Although the address information may be encoded in trinary, the data information must be either a one or a zero. A trinary (open) data line is decoded as a logic one.

### MC145028

This decoder operates in the same manner as the MC145027 except that nine address lines are used and no data output is available. The VT output is used to indicate that a valid address has been received. For transmission security, two identical transmitted words must be consecutively received before a valid transmission output (VT) signal is issued.

The MC145028 allows 19,683 addresses when trinary levels are used. 512 addresses are possible when binary levels are used.

## PIN DESCRIPTIONS

### MC145026 ENCODER

**A1 through A5, A6/D6 through A9/D9 (Pins 1 through 7, 9, and 10)**

These address/data inputs are encoded and the data is sent serially from the encoder via the data out pin.

**$R_S$, $C_{TC}$, $R_{TC}$ (Pins 11, 12, and 13)**

These pins are part of the oscillator section of the encoder. See Figure 9.

If an external signal source is used instead of the internal oscillator, it should be connected to the $R_S$ input and the $R_{TC}$ and $C_{TC}$ pins should be left open.

**$\overline{TE}$ (Pin 14)**

This active-low transmit enable input initiates transmission when forced low. An internal pullup device keeps this input normally high. The pullup current is specified in the Electrical Characteristics table.

**Data Out (Pin 15)**

This is the output of the encoder that serially presents the encoded data word.

**$V_{SS}$ (Pin 8)**

The most-negative supply potential. This pin is usually ground.

**$V_{DD}$ (Pin 16)**

The most-positive power supply pin.

### MC145027 AND MC145028 DECODERS

**A1 through A5 (Pins 1 through 5) — MC145027**
**A1 through A9 (Pins 1 through 5, 15, 14, 13, and 12) — MC145028**

These are the local address inputs. The states of these pins must match the appropriate encoder inputs for the VT pin to go high. The local address may be encoded with trinary or binary data.

**D6 through D9 (Pins 15, 14, 13, and 12) – MC145027 ONLY**

These outputs present the binary information that is on encoder inputs A6/D6 through A9/D9. Only binary data is acknowledged; a trinary open at the MC145026 encoder is decoded as a high level (logic 1).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

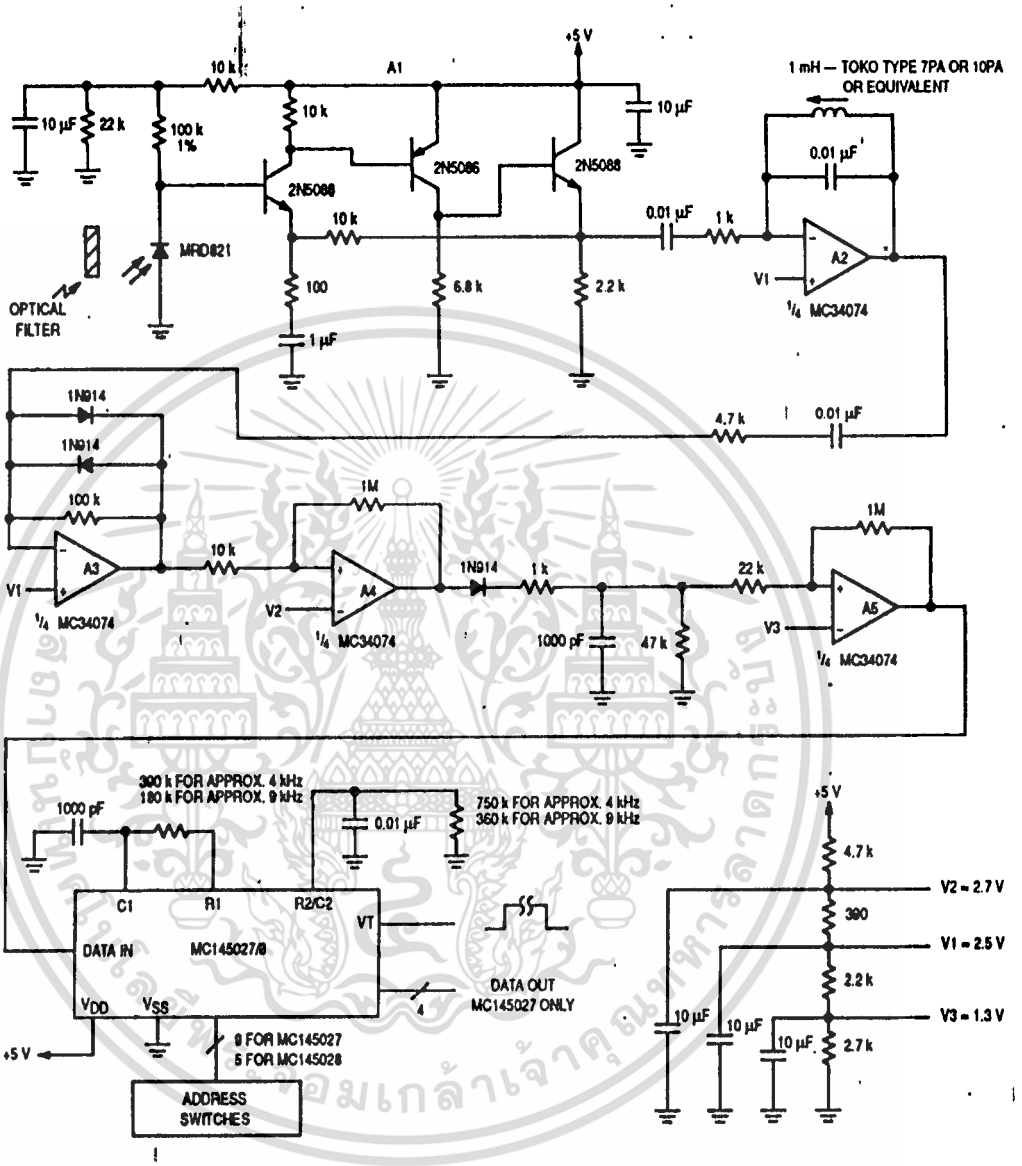



Figure 18. Infrared Receiver



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor Corporation

# LM158/LM258/LM358, LM158A/LM258A/LM358A, LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers

## General Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard +5 $V_{DC}$ power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional ±15 $V_{DC}$ power supplies.

## Unique Characteristics

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

## Advantages

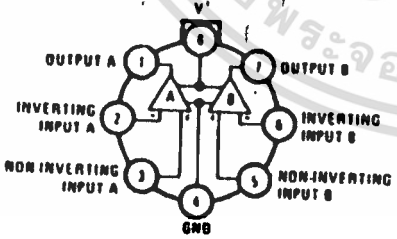
- Eliminates need for dual supplies
- Two internally compensated op amps in a single package
- Allows directly sensing near GND and $V_{OUT}$ also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation
- Pin-out same as LM1558/LM1458 dual operational amplifier

## Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large dc voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
  - Single supply 3 $V_{DC}$ to 32 $V_{DC}$
  - or dual supplies ±1.5 $V_{DC}$ to ±16 $V_{DC}$
- Very low supply current drain (500 μA)—essentially independent of supply voltage (1 mW/op amp at +5 $V_{DC}$)
- Low input biasing current 45 $nA_{DC}$ (temperature compensated)
- Low input offset voltage 2 $mV_{DC}$ and offset current 5 $nA_{DC}$
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0 $V_{DC}$ to $V^+$ − 1.5 $V_{DC}$

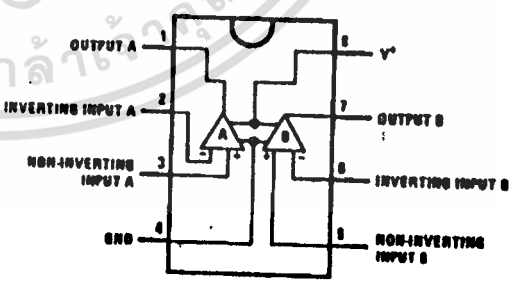
## Connection Diagrams (Top Views)

**Metal Can Package**




TL/H/7787-1

**Order Number LM158AH, LM158H, LM258AH, LM258H, LM358AH or LM358H**
**See NS Package Number H08C**




TL/H/7787-2

**Order Number LM158J, LM158AJ or LM358J**
**See NS Package Number J08A**
**Order Number LM358M, LM358AM or LM2904M**
**See NS Package Number M08A**
**Order Number LM358AN, LM358N or LM2904N**
**See NS Package Number N08E**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Absolute Maximum Ratings

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

(Note 9)

| | LM158/LM258/LM358<br>LM158A/LM258A/LM358A | LM2904 |
|---|---|---|
| Supply Voltage, $V^+$ | 32 $V_{DC}$ or ±16 $V_{DC}$ | 26 $V_{DC}$ or ±13 $V_{DC}$ |
| Differential Input Voltage | 32 $V_{DC}$ | 26 $V_{DC}$ |
| Input Voltage | −0.3 $V_{DC}$ to +32 $V_{DC}$ | −0.3 $V_{DC}$ to +26 $V_{DC}$ |
| Power Dissipation (Note 1) | | |
| Molded DIP (LM358N) | 830 mW | 830 mW |
| Metal Can (LM158H/LM258H/LM358H) | 550 mW | |
| Small Outline Package | 530 mW | 530 mW |
| Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) (Note 2) $V^- \leq 15\ V_{DC}$ and $T_A = 25°C$ | Continuous | Continuous |
| Input Current ($V_{IN} < -0.3\ V_{DC}$) (Note 3) | 50 mA | 50 mA |

| | LM158/LM258/LM358<br>LM158A/LM258A/LM358A | LM2904 |
|---|---|---|
| Operating Temperature Range | | |
| LM358 | 0°C to +70°C | −40°C to +85°C |
| LM258 | −25°C to +85°C | |
| LM158 | −55°C to +125°C | |
| Storage Temperature Range | −65°C to +150°C | −65°C to +150°C |
| Lead Temperature (Soldering, 10 seconds) DIP | 260°C | 260°C |
| ESD rating to be determined. | | |
| Lead Temperature (Soldering, 10 seconds) | 300°C | 300°C |
| Soldering Information | | |
| Dual-In-Line Package | | |
| Soldering (10 seconds) | 260°C | 260°C |
| Small Outline Package | | |
| Vapor Phase (60 seconds) | 215°C | 215°C |
| Infrared (15 seconds) | 220°C | 220°C |

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

## Electrical Characteristics $V^- = -5.0\ V_{DC}$, $T_A = 25°C$, unless otherwise stated

| Parameter | Conditions | LM158A | | | LM258A | | | LM358A | | | LM158/LM258 | | | LM358 | | | LM2904 | | | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Input Offset Voltage | (Note 5) | | ±1 | ±2 | | ±1 | ±3 | | ±2 | ±3 | | ±2 | ±5 | | ±2 | ±7 | | ±2 | ±7 | $mV_{DC}$ |
| Input Bias Current | $I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$, (Note 6) | | 20 | 50 | | 40 | 80 | | 45 | 100 | | 45 | 150 | | 45 | 250 | | 45 | 250 | $nA_{DC}$ |
| Input Offset Current | $I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$ | | ±2 | ±10 | | ±2 | ±15 | | ±5 | ±30 | | ±3 | ±30 | | ±5 | ±50 | | ±5 | ±50 | $nA_{DC}$ |
| Input Common-Mode Voltage Range | $V^+ = 30\ V_{DC}$, (Note 7) (LM2904, $V^+ = 26V$) | 0 | | $V^- - 1.5$ | 0 | | $V^- - 1.5$ | 0 | | $V^- - 1.5$ | 0 | | $V^- - 1.5$ | 0 | | $V^+ - 1.5$ | 0 | | $V^+ - 1.5$ | $V_{DC}$ |
| Supply Current | $R_L = \infty$, $V^+ = 30V$ (LM2904 $V^+ = 26V$) | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | $mA_{DC}$ |
| | $R_L = \infty$ on all Op Amps Over Full Temperature Range | | 0.7 | 1.2 | | 0.7 | 1.2 | | 0.7 | 1.2 | | 0.7 | 1.2 | | 0.7 | 1.2 | | 0.7 | 1.2 | $mA_{DC}$ |

## Electrical Characteristics (Continued) $V^+ = +5.0\ V_{DC}$, Note 4, unless otherwise stated

| Parameter | Conditions | LM158A | | | LM258A | | | LM358A | | | LM158/LM258 | | | LM358 | | | LM2904 | | | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Large Signal Voltage Gain | $V^+ = 15\ V_{DC}$<br>$R_L \geq 2\ k\Omega$, (For $V_O = 1\ V_{DC}$ to $11\ V_{DC}$) | 50 | 100 | | 50 | 100 | | 25 | 100 | | 50 | 100 | | 25 | 100 | | 25 | 100 | | V/mV |
| Common-Mode Rejection Ratio | DC,<br>$V_{CM} = 0V$ to $V^+ - 1.5\ V_{DC}$ | 70 | 85 | | 70 | 85 | | 65 | 85 | | 70 | 85 | | 65 | 70 | | 50 | | 70 | dB |
| Power Supply Rejection Ratio | DC, $V^+ = 5\ V_{DC}$ to $30\ V_{DC}$<br>(LM2904, $V^+ = 5\ V_{DC}$ to $26\ V_{DC}$), $T_A = 25°C$ | 65 | 100 | | 65 | 100 | | 65 | 100 | | 65 | 100 | | 65 | 100 | | 50 | 100 | | dB |
| Amplifier-to-Amplifier Coupling | $f = 1$ kHz to 20 kHz, $T_A = 25°C$<br>(Input Referred), (Note 8) | | −120 | | | −120 | | | −120 | | | −120 | | | −120 | | | −120 | | dB |
| Output Current Source | $V_{IN}^+ = 1\ V_{DC}$,<br>$V_{IN}^- = 0\ V_{DC}$,<br>$V^+ = 15\ V_{DC}$,<br>$V_O = 2\ V_{DC}$, $T_A = 25°C$ | 20 | 40 | | 20 | 40 | | 20 | 40 | | 20 | 40 | | 20 | 40 | | 20 | 40 | | $mA_{DC}$ |
| Sink | $V_{IN}^- = 1\ V_{DC}$, $V_{IN}^+ = 0\ V_{DC}$<br>$V^+ = 15\ V_{DC}$, $T_A = 25°C$,<br>$V_O = 2\ V_{DC}$ | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | $mA_{DC}$ |
| | $V_{IN}^- = 1\ V_{DC}$,<br>$V_{IN}^+ = 0\ V_{DC}$<br>$T_A = 25°C$, $V_O = 200\ mV_{DC}$,<br>$V^+ = 15\ V_{DC}$ | 12 | 50 | | 12 | 50 | | 12 | 50 | | 12 | 50 | | 12 | 50 | | 12 | 50 | | $\mu A_{DC}$ |
| Short Circuit to Ground | $T_A = 25°C$, (Note 2),<br>$V^+ = 15\ V_{DC}$ | | 40 | 60 | | 40 | 60 | | 40 | 60 | | 40 | 60 | | 40 | 60 | | 40 | 60 | $mA_{DC}$ |
| Input Offset Voltage | (Note 5) | | | ±4 | | | ±4 | | | ±5 | | | ±7 | | | ±9 | | | ±10 | $mV_{DC}$ |
| Input Offset Voltage Drift | $R_S = 0\Omega$ | | 7 | 15 | | 7 | 15 | | 7 | 20 | | 7 | | | 7 | | | 7 | | $\mu V/°C$ |
| Input Offset Current | $I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ | | | ±30 | | | ±30 | | | ±75 | | | ±100 | | | ±150 | | ±45 | ±200 | $nA_{DC}$ |
| Input Offset Current Drift | $R_S = 0\Omega$ | | 10 | 200 | | 10 | 200 | | 10 | 300 | | 10 | | | 10 | | | 10 | | $pA_{DC}/°C$ |
| Input Bias Current | $I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$ | | 40 | 100 | | 40 | 100 | | 40 | 200 | | 40 | 300 | | 40 | 500 | | 40 | 500 | $nA_{DC}$ |

## Electrical Characteristics (Continued) $V^+ = +5.0\ V_{DC}$, Note 4, unless otherwise stated

| Parameter | Conditions | LM158A | | | LM258A | | | LM358A | | | LM158/LM258 | | | LM358 | | | LM2904 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Input Common-Mode Voltage Range | $V^+ = 30\ V_{DC}$, (Note 7) (LM2904, $V^+ = 26\ V_{DC}$) | 0 | | $V^+ - 2$ | 0 | | $V^+ - 2$ | 0 | | $V^+ - 2$ | 0 | | $V^+ - 2$ | 0 | | $V^+ - 2$ | 0 | | $V^+ - 2$ | $V_{DC}$ |
| Large Signal Voltage Gain | $V^+ = +15\ V_{DC}$ ($V_O = 1\ V_{DC}$ to $11\ V_{DC}$) $R_L \geq 2\ k\Omega$ | 25 | | | 25 | | | 15 | | | 25 | | | 15 | | | 15 | | | V/mV |
| Output Voltage Swing | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $V_{OH}$ | $V^+ = +30\ V_{DC}$, $R_L = 2\ k\Omega$ | 26 | | | 26 | | | 26 | | | 26 | | | 26 | | | 22 | | | $V_{DC}$ |
| | $R_L \geq 10\ k\Omega$ | 27 | 28 | | 27 | 28 | | 27 | 28 | | 27 | 28 | | 27 | 28 | | 23 | 24 | | $V_{DC}$ |
| | (LM2904, $V^+ = 26\ V_{DC}$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $V_{OL}$ | $V^+ = 5\ V_{DC}$, $R_L \geq 10\ k\Omega$ | | 5 | 20 | | 5 | 20 | | 5 | 20 | | 5 | 20 | | 5 | 20 | | 5 | 100 | $mV_{DC}$ |
| Output Current | $V_O = 2\ V_{DC}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Source | $V_{IN}^+ = +1\ V_{DC}$, $V_{IN}^- = 0\ V_{DC}$, $V^+ = 15\ V_{DC}$ | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | 10 | 20 | | $mA_{DC}$ |
| Sink | $V_{IN}^- = +1\ V_{DC}$, $V_{IN}^+ = 0\ V_{DC}$, $V^+ = 15\ V_{DC}$ | 10 | 15 | | 5 | 8 | | 5 | 8 | | 5 | 8 | | 5 | 8 | | 5 | 8 | | $mA_{DC}$ |

**Note 1:** For operating at high temperatures, the LM358/LM358A, LM2904 must be derated based on a +125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 120°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM258/LM258A and LM158/LM158A can be derated based on a +150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of both amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.

**Note 2:** Short circuits from the output to $V^+$ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of $V^+$. At values of supply voltage in excess of +15 $V_{DC}$, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

**Note 3:** The input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the $V^+$ voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than −0.3 $V_{DC}$ (at 25°C).

**Note 4:** These specifications are limited to $-55°C \leq T_A \leq +125°C$ for the LM158/LM158A. With the LM258/LM258A, all temperature specifications are limited to $-25°C \leq T_A \leq +85°C$, the LM358/LM358A temperature specifications are limited to $0°C \geq T_A \leq +70°C$, and the LM2904 specifications are limited to $-40°C \leq T_A \leq +85°C$.

**Note 5:** $V_O = 1.4\ V_{DC}$, $R_S = 0\Omega$ with $V^+$ from 5 $V_{DC}$ to 30 $V_{DC}$; and over the full input common-mode range (0 $V_{DC}$ to $V^+ - 1.5\ V_{DC}$) at 25°C. For LM2904, $V^+$ from 5 $V_{DC}$ to 26 $V_{DC}$.

**Note 6:** The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

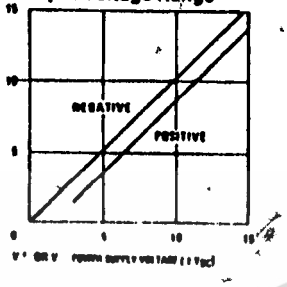
**Note 7:** The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V (at 25°C). The upper end of the common-mode voltage range is $V^+ - 1.5V$ (at 25°C), but either or both inputs can go to +32 $V_{DC}$ without damage (+26 $V_{DC}$ for LM2904), independent of the magnitude of $V^+$.

**Note 8:** Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

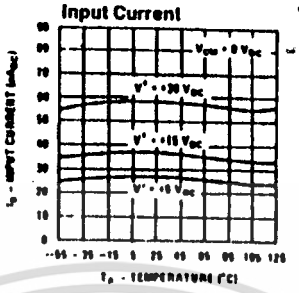
**Note 9:** Refer to RETS158AX for LM158A military specifications and to RETS158X for LM158 military specifications.

## Typical Performance Characteristics

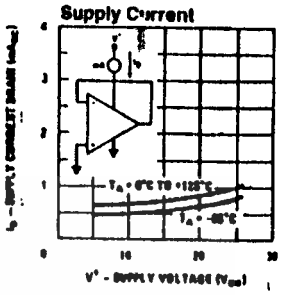
Input Voltage Range



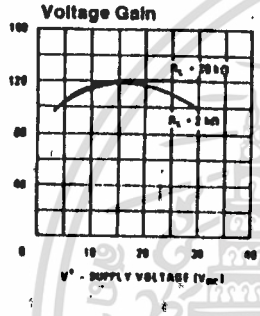

Input Current



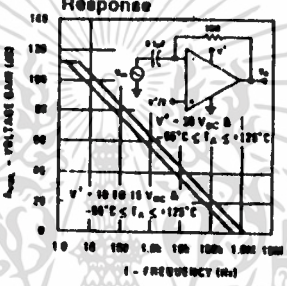
Supply Current



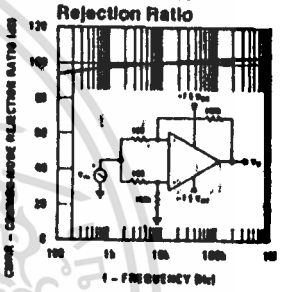
Voltage Gain



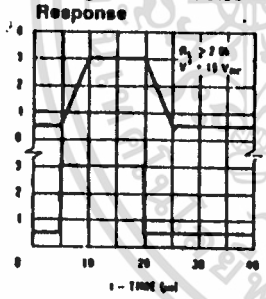
Open Loop Frequency Response



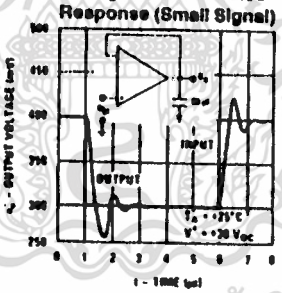
Common-Mode Rejection Ratio



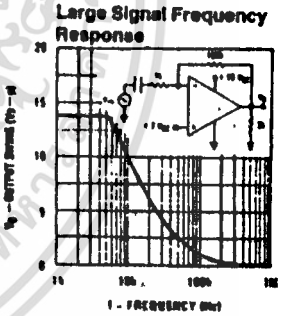
Voltage Follower Pulse Response



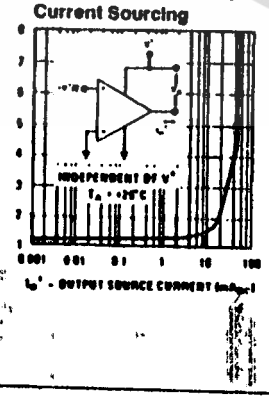
Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)



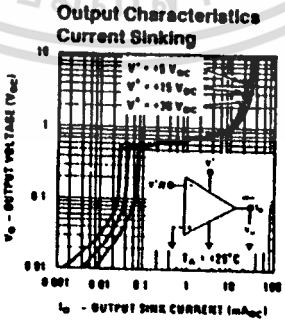
Large Signal Frequency Response



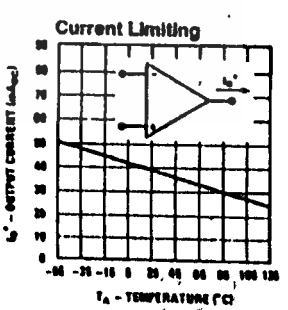
Output Characteristics Current Sourcing



Output Characteristics Current Sinking



Current Limiting



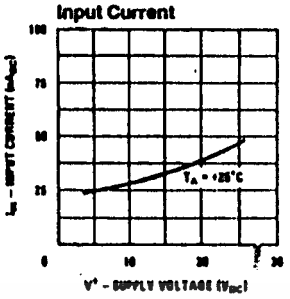
TL/H/7783-4



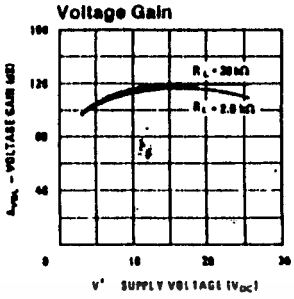
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Typical Performance Characteristics (Continued) (LM2902 only)

Input Current




Voltage Gain




TL/H/7787–5

## Application Hints

The LM158 series are op-amps which operate with only a single power supply voltage, have true-differential inputs, and remain in the linear mode with an input common-mode voltage of 0 $V_{DC}$. These amplifiers operate over a wide range of power supply voltage with little change in performance characteristics. At 25°C amplifier operation is possible down to a minimum supply voltage of 2.3 $V_{DC}$.

Precautions should be taken to insure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a test socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Large differential input voltages can be easily accomodated and, as input differential voltage protection diodes are not needed, no large input currents result from large differential input voltages. The differential input voltage may be larger than $V^+$ without damaging the device. Protection should be provided to prevent the input voltages from going negative more than −0.3 $V_{DC}$ (at 25°C). An input clamp diode with a resistor to the IC input terminal can be used.

To reduce the power supply current drain, the amplifiers have a class A output stage for small signal levels which converts to class B in a large signal mode. This allows the amplifiers to both source and sink large output currents. Therefore both NPN and PNP external current boost transistors can be used to extend the power capability of the basic amplifiers. The output voltage needs to raise approximately 1 diode drop above ground to bias the on-chip vertical PNP transistor for output current sinking applications.

For ac applications, where the load is capacitively coupled to the output of the amplifier, a resistor should be used, from the output of the amplifier to ground to increase the class A bias current and prevent crossover distortion. Where the load is directly coupled, as in dc applications, there is no crossover distortion.

Capacitive loads which are applied directly to the output of the amplifier reduce the loop stability margin. Values of 50 pF can be accomodated using the worst-case non-inverting unity gain connection. Large closed loop gains or resistive isolation should be used if larger load capacitance must be driven by the amplifier.

The bias network of the LM158 establishes a drain current which is independent of the magnitude of the power supply voltage over the range of 3 $V_{DC}$ to 30 $V_{DC}$.

Output short circuits either to ground or to the positive power supply should be of short time duration. Units can be destroyed, not as a result of the short circuit current causing metal fusing, but rather due to the large increase in IC chip dissipation which will cause eventual failure due to excessive function temperatures. Putting direct short-circuits on more than one amplifier at a time will increase the total IC power dissipation to destructive levels, if not properly protected with external dissipation limiting resistors in series with the output leads of the amplifiers. The larger value of output source current which is available at 25°C provides a larger output current capability at elevated temperatures (see typical performance characteristics) than a standard IC op amp.

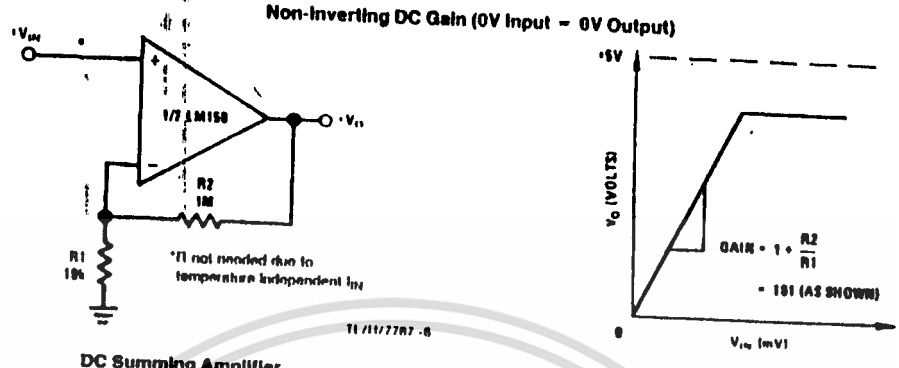
The circuits presented in the section on typical applications emphasize operation on only a single power supply voltage. If complementary power supplies are available, all of the standard op amp circuits can be used. In general, introducing a pseudo-ground (a bias voltage reference of $V^+/2$) will allow operation above and below this value in single power supply systems. Many application circuits are shown which take advantage of the wide input common-mode voltage range which includes ground. In most cases, input biasing is not required and input voltages which range to ground can easily be accommodated.



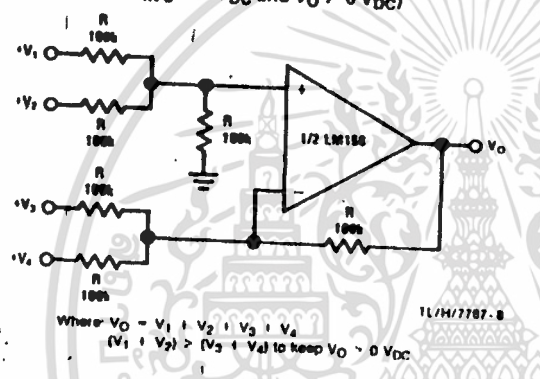
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Typical Single-Supply Applications ($V^+ = 5.0\ V_{DC}$)

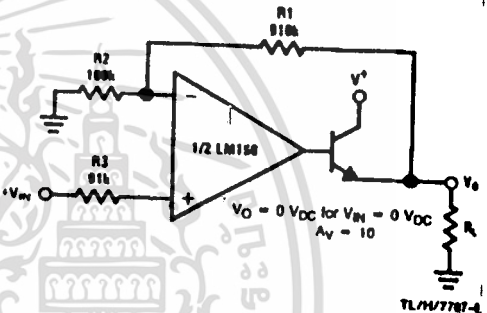
### Non-Inverting DC Gain (0V Input = 0V Output)



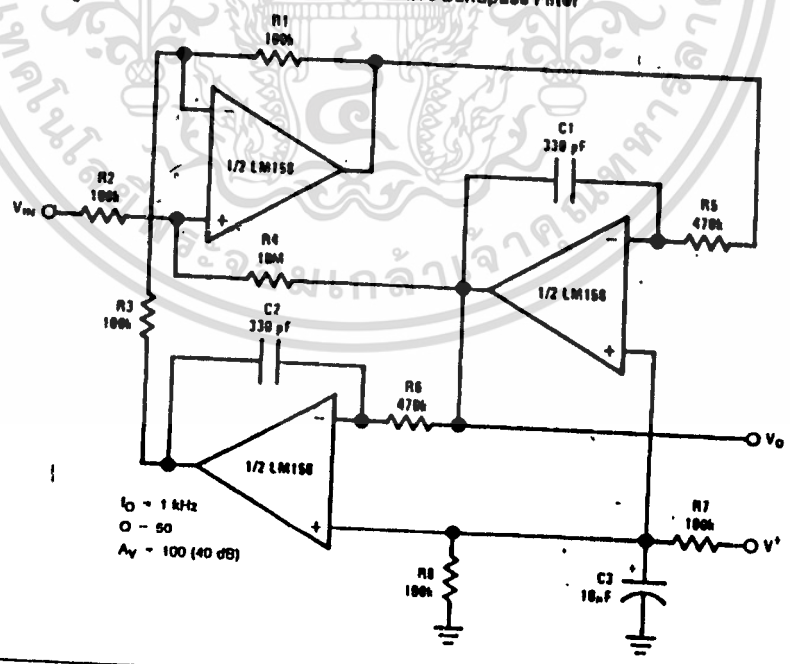

### DC Summing Amplifier ($V_{IN}$'s ≥ 0 $V_{DC}$ and $V_O$ ≥ 0 $V_{DC}$)




### Power Amplifier




### "Bi-QUAD" RC Active Bandpass Filter

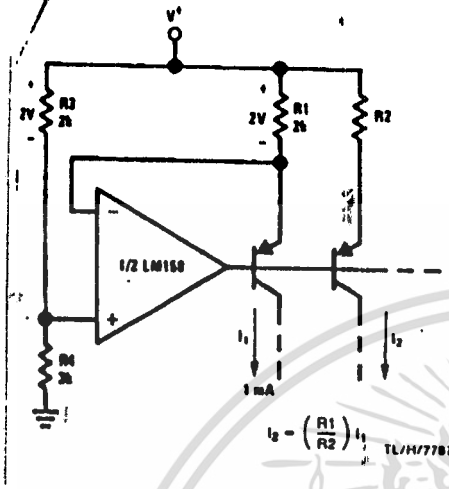





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Single-Supply Applications ($V^+ = 5.0\ V_{DC}$) (Continued)

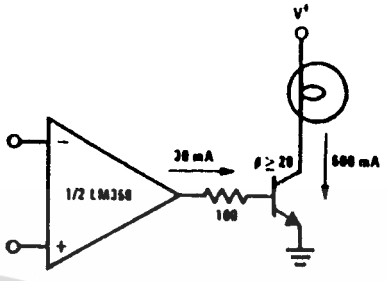
### Fixed Current Sources




$I_2 = \left(\frac{R1}{R2}\right) I_1$

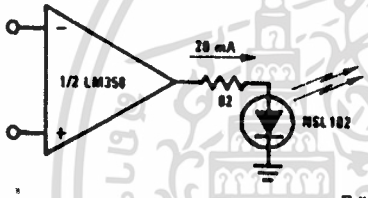
TL/H/7787-11

### Lamp Driver



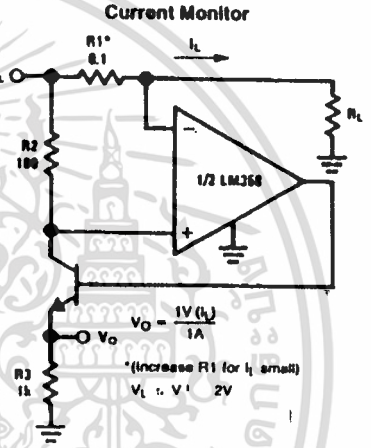

TL/H/7787-12

### LED Driver



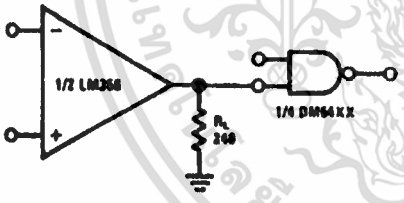

TL/H/7787-13

### Current Monitor



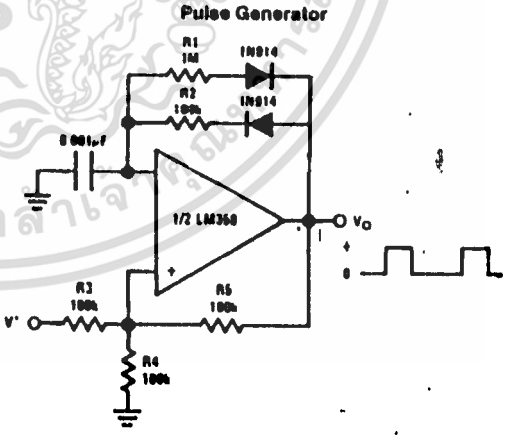

TL/H/7787-14

### Driving TTL



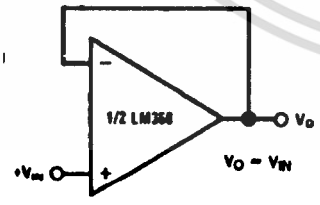

TL/H/7787-15

### Pulse Generator




TL/H/7787-16

### Voltage Follower



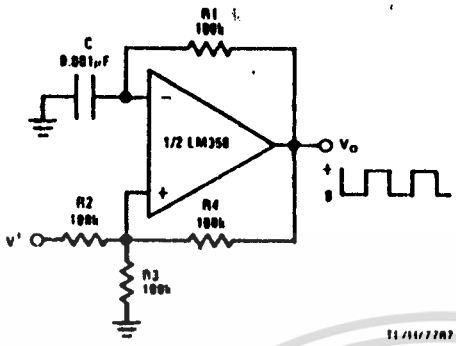

TL/H/7787-17



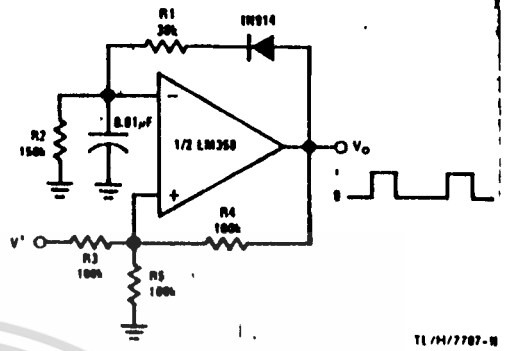
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Typical Single-Supply Applications ($V^+$ = 5.0 $V_{DC}$) (Continued)

**Squarewave Oscillator**



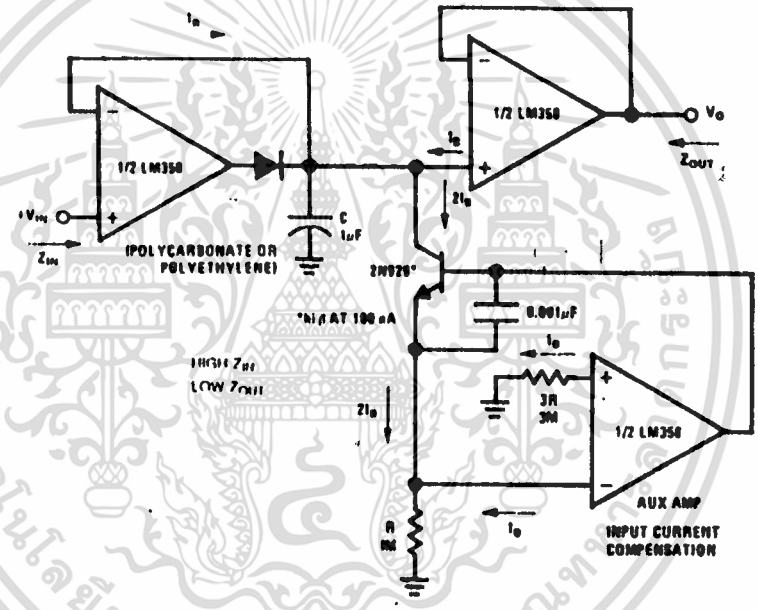

**Pulse Generator**




TL/H/7787-18

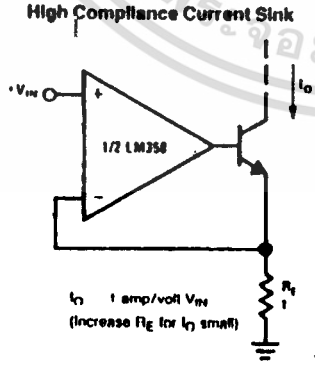
TL/H/7787-19

**Low Drift Peak Detector**



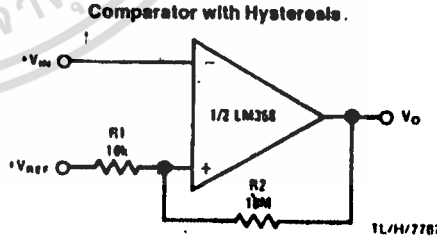

TL/H/7787-20

**High Compliance Current Sink**




TL/H/7787-21

**Comparator with Hysteresis**



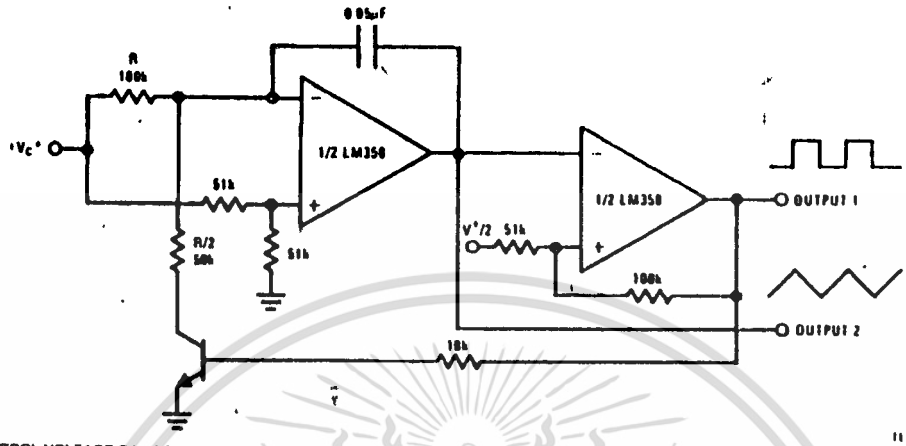

TL/H/7787-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

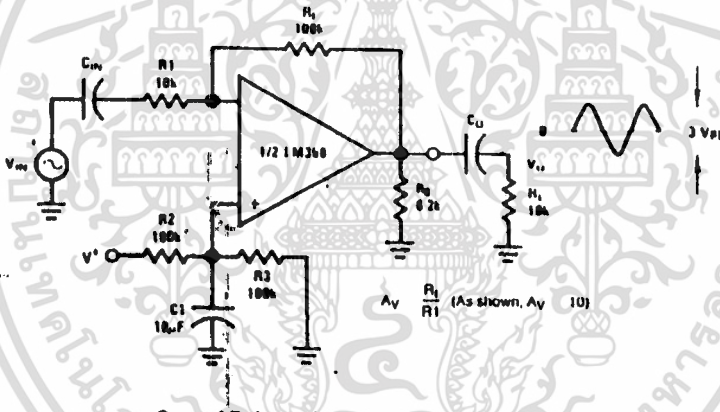
## Single-Supply Applications ($V^+$ = 5.0 $V_{DC}$) (Continued)

**Voltage Controlled Oscillator (VCO)**

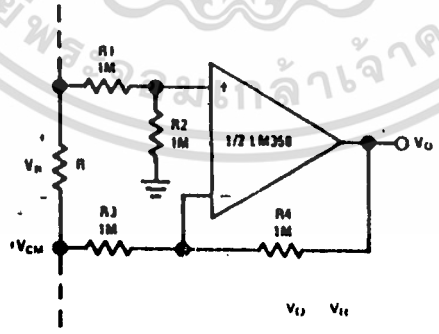



*WIDE CONTROL VOLTAGE RANGE: 0 $V_{DC} \leq V_C \leq 2$ ($V^+$ − 1.5V $_{DC}$)

**AC Coupled Inverting Amplifier**




**Ground Referencing a Differential Input Signal**

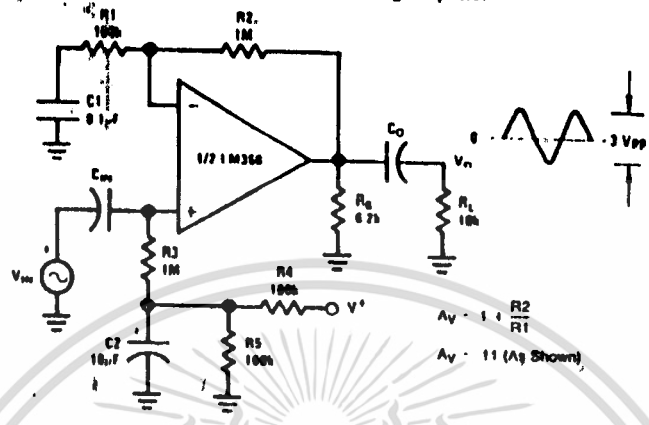





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

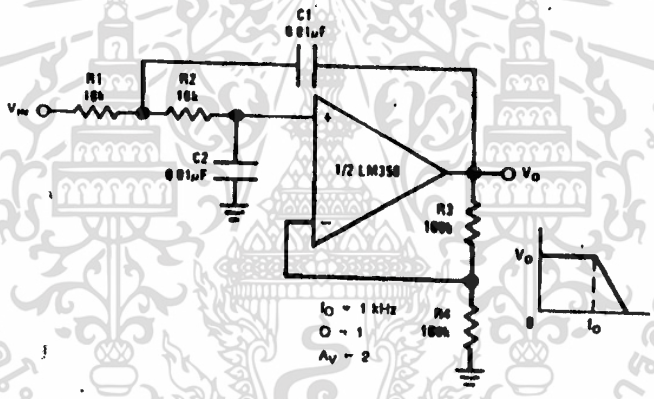
## Typical Single-Supply Applications ($V^+$ = 5.0 $V_{DC}$) (Continued)

**AC Coupled Non-inverting Amplifier**



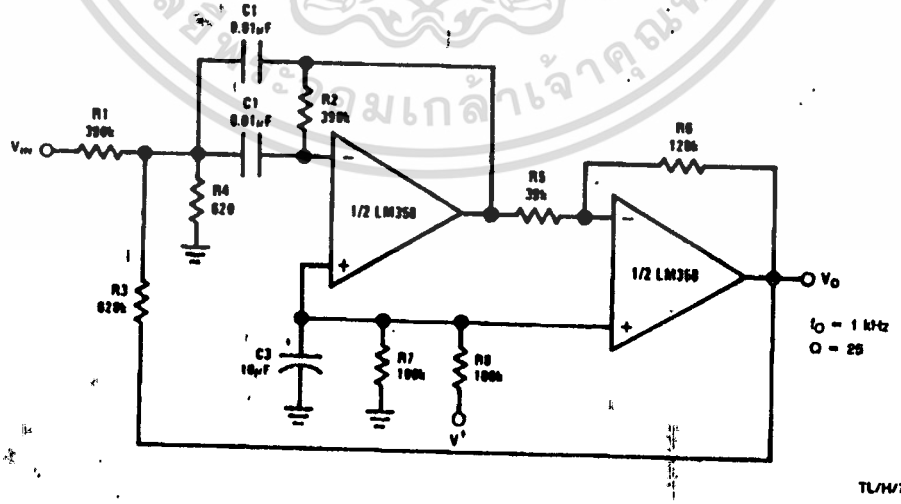

TL/H/7787–26

**DC Coupled Low-Pass RC Active Filter**




TL/H/7787–27

**Bandpass Active Filter**



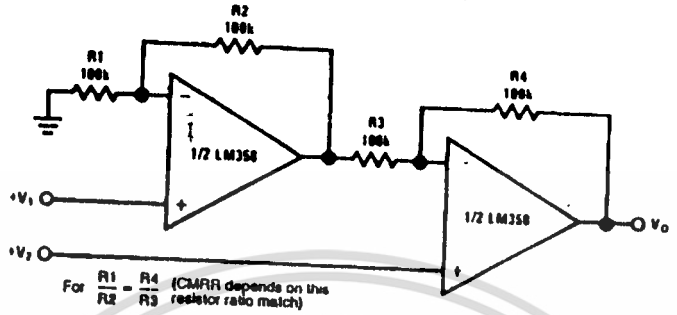

TL/H/7787–28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Single-Supply Applications ($V^+$ = 5.0 $V_{DC}$) (Continued)

**High Input Z, DC Differential Amplifier**

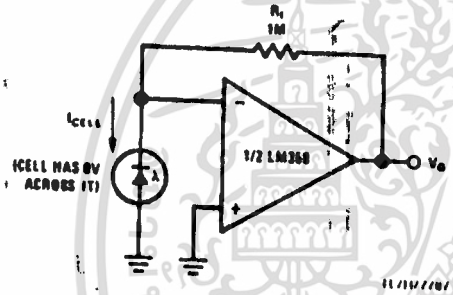



For $\frac{R1}{R2} = \frac{R4}{R3}$ (CMRR depends on this resistor ratio match)

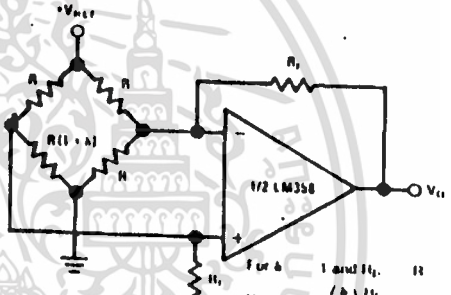
$V_O = 1 + \frac{R4}{R3}(V_2 - V_1)$

As Shown: $V_O = 2(V_2 - V_1)$

**Photo Voltaic-Cell Amplifier**



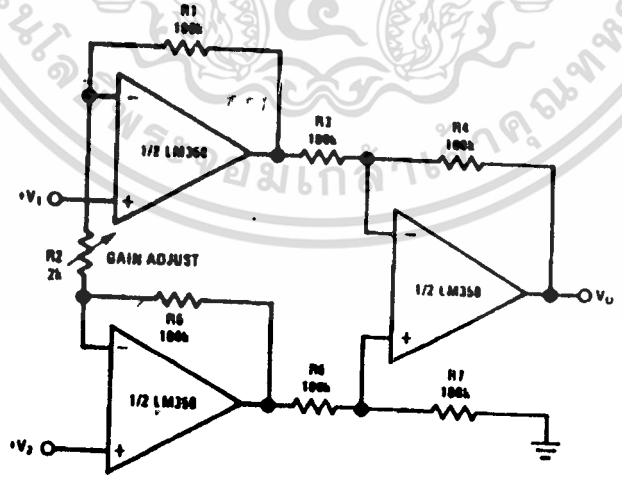

**Bridge Current Amplifier**




For Δ = 1 and $R_1$ = R

$V_O = V_{REF}\left(\frac{\Delta}{2}\right)\frac{R_1}{R}$

**High Input Z Adjustable-Gain DC Instrumentation Amplifier**




If R1 = R5 & R3 = R4 = R6 = R7 (CMRR depends on match)

$V_O = 1 + \frac{2R1}{R2}(V_2 - V_1)$

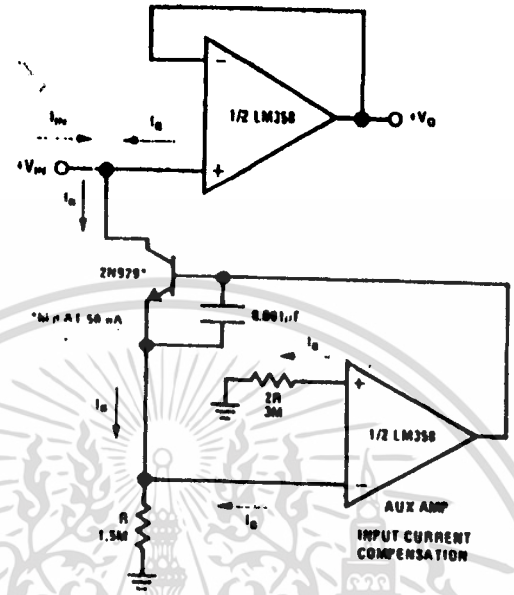
As shown $V_O = 101(V_2 - V_1)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

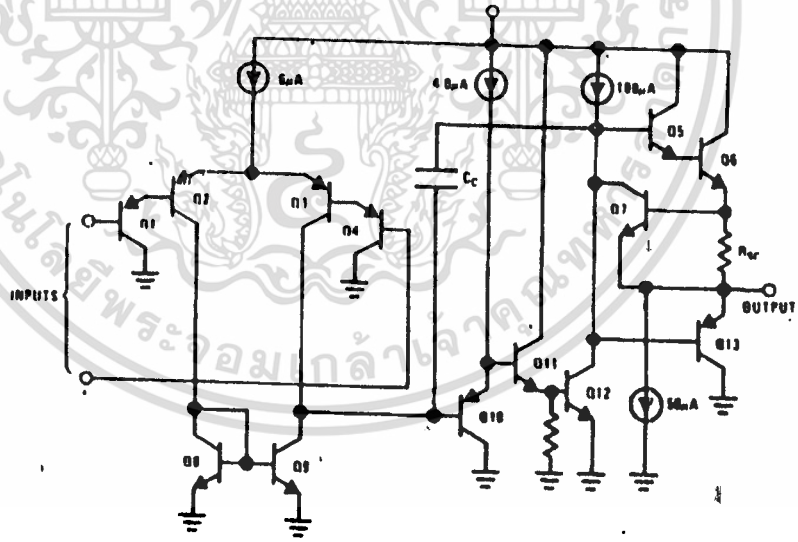
## Typical Single-Supply Applications ($V^+$ = 5.0 $V_{DC}$) (Continued)

**Using Symmetrical Amplifiers to Reduce Input Current (General Concept)**




TL/H/7787-32

## Schematic Diagram (Each Amplifier)




TL/H/7787-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# หนังสืออ้างอิง


รศ. ยืน ภู่วร่วรรณ, "ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็คทรอนิคส์เล่ม 3 , ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด , 2521

วัชระ เลิศพิระยะสุวัฒน์, "การใช้งานบิ๊มแมกเนติก" , วารสารเทคนิคเครื่องกลไฟฟ้า-อุตสาหกรรม , ฉบับ 84 , 2535 , หน้า 77-80

กองบรรณาธิการวารสารอิเล็คทรอนิคส์สมัครเล่น , "10 โครงการงานมหัศจรรย์ของ 555" วารสารอิเล็คทรอนิคส์สมัครเล่น , ฉบับที่ 15,2535, หน้า 50-51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้