

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

วงจรรขยายกำลังที่มีพื้นฐานอยู่บนการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์

**PWM BASED POWER AMPLIFIER**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายกำลังที่มีพื้นฐานอยู่บนการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์

**PWM BASED POWER AMPLIFIER**

โดย

นายพอใจ จาตุรงค์กุล 47010497

นางสาวศศิธร เหลลาหนด 47010752

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

ผศ.ดร. จีรสุดา โกษิยาภรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วจรขยายกำลังที่มีพื้นฐานอยู่บนการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์

**PWM BASED POWER AMPLIFIER**

ผู้จัดทำ

1. นายพอใจ จาตุรงค์กุล 47010497

2. นางสาวศศิธร เหลาหนด 47010752

.....*ปราโมทย์*..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน)

.....*Ronnyapon*..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. จีรุตดา โกษียาภรณ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรขยายกำลังที่มีพื้นฐานอยู่บนการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์  
PWM BASED POWER AMPLIFIER

โดย นายพอใจ จาตุรงค์กุล 47010497  
นางสาวศศิธร เหลาหนด 47010752

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน  
ผศ.ดร. จีรสุดา โกมัยภรณ์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอวงจรรขยายกำลังคลาสดีฟูลบริดจ์แบบลููปปิด และมีส่วนของวงจรรอไอคิวไลเซอร์แบบแอนะล็อก ที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณอินพุต โดยวงจรรขยายที่นำเสนอ ประกอบไปด้วย วงจรมอดูเลตที่อาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบความกว้างพัลส์ ส่วนที่ 2 เป็นภาคขับสัญญาณ ซึ่งมีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ปรับกำลังขยายสัญญาณให้สูงขึ้นและส่วนสุดท้าย คือ ส่วนของวงจรรองความถี่ เพื่อกรองสัญญาณกลับคืนมาแล้วนำไปจ่ายให้กับลำโพงต่อไป

### ABSTRACT

This project proposes a closed loop, full bridge class D power amplifier including an equalizer which is used to adjust the input signal. The proposed power amplifier is composed of a pulse width modulation circuit, the second part is a driver circuit which has full bridge transistor structure to amplify signal. The last part is a filter circuit employed to filter the signal back which is fed to speakers.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน จาก รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน และ ศศ.ดร. จีระสุดา โกมัยภรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลโครงการมาโดยตลอดจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณามา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้

ขอขอบคุณ คุณปานวิทย์ ชูวะนุติ และเพื่อนๆพี่ๆในภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยแก้ไขปัญหา ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุพการี ซึ่งคอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องแก่ผู้จัดทำเสมอมาจนโครงการนี้สำเร็จลงได้

คณะผู้จัดทำ

นายพอใจ

จาดุรงค์กุล

นางสาวศศิธร เหลาหวอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ  | I    |
| สารบัญ  | II   |
| สารบัญรูป   | V    |
| สารบัญตาราง   | VIII |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการของโครงการ                          | 1    |
| 1.2 แนวคิดที่ใช้ในการทำโครงการ                              | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ  | 1    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ                                     | 3    |
| 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน                   | 3    |
| 2.1.1 ประเภทของวงจรขยายกำลังงาน                             | 3    |
| 2.1.2 คุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน                          | 9    |
| 2.2 วงจรขยายกำลังงานเสียงคลาสดี                             | 12   |
| 2.2.1 ประเภทการต่อทรานซิสเตอร์ในภาคขยายกำลังคลาสดี          | 13   |
| 2.3 สาเหตุหลักในการทำงานที่ไม่สมบูรณ์แบบของคลาสดี           | 14   |
| 2.4 การมอดูเลตความกว้างพัลส์                                | 22   |
| 2.4.1 หลักการของการมอดูเลตสัญญาณแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ | 24   |
| 2.4.2 การอิมพัลส์ของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์          | 25   |
| 2.4.3 การสร้างรูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์              | 26   |
| 2.4.4 สมการของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                | 28   |
| 2.5 ระบบอิกวอไลเซอร์  | 31   |
| 2.5.1 ชนิดของอิกวอไลเซอร์                                   | 32   |
| 2.6 หลักการของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (Power Supply)              | 34   |
| 2.6.1 การเลือกหม้อแปลง (Transformer Specifications)         | 34   |
| 2.6.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)                            | 34   |
| 2.6.3 วงจรกรองกระแส (Filter)                                | 36   |
| 2.6.4 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulators)             | 36   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง  | 41   |
| 3.1 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม  | 41   |
| 3.2 วงจรยกระดับสัญญาณ (Level Shift)  | 43   |
| 3.3 วงจรดีเลย์ (Delay)   | 45   |
| 3.4 วงจรขับกระแส   | 46   |
| 3.5 วงจรลดทอนระดับสัญญาณ (Attenuator)                                      | 46   |
| 3.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)                               | 47   |
| 3.7 วงจรอีควอไลเซอร์ (Equalizer)   | 48   |
| 3.8 วงจรปรับระดับเสียงหลัก (Main Volume) และวงจรจำกัดระดับแรงดัน (Limiter) | 51   |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง  | 52   |
| 4.1 การทดลองสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์         | 52   |
| 4.2 การทดลองวัดสเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                   | 53   |
| 4.3 กราฟคุณสมบัติของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                         | 54   |
| 4.4 การทดลองวงจรมอดูเลตสัญญาณ  | 55   |
| 4.5 การทดลองวงจรดีเลย์   | 55   |
| 4.6 การทดลองวงจรขับกระแส   | 57   |
| 4.7 การทดลองวงจรถอดทอนระดับสัญญาณ  | 59   |
| 4.7.1 การทดลองลดทอนระดับสัญญาณผ่านไดโอด                                    | 59   |
| 4.7.2 การทดลองวงจรมอดูเลตสัญญาณผลต่าง                                      | 60   |
| 4.8 การทดลองวงจรมอดูเลตความถี่ต่ำผ่าน                                      | 60   |
| 4.8.1 การทดลองวัดสัญญาณเมื่อผ่านวงจรมอดูเลตความถี่ต่ำผ่าน                  | 60   |
| 4.8.2 การทดลองวัดสัญญาณทั้งหมดผ่านวงจรมอดูเลตความถี่ต่ำผ่าน                | 60   |
| 4.8.3 กราฟคุณสมบัติของวงจรมอดูเลตความถี่ต่ำผ่าน                            | 62   |
| 4.9 การทดลองวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion)       | 64   |
| 4.10 การทดลองวงจรมอดูเลตสัญญาณ   | 65   |
| 4.10.1 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลางต่างๆ                                     | 65   |
| 4.10.1.1 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 100 Hz                                 | 65   |
| 4.10.1.2 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 340 Hz                                 | 66   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.10.1.3 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 1 kHz           | 67   |
| 4.10.1.4 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 3.4 kHz         | 68   |
| 4.10.1.5 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 10 kHz          | 69   |
| 4.11 การคำนวณหาค่า Q (Quality factor)               | 71   |
| 4.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจร                | 71   |
| 4.13 การวัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output Impedance) | 72   |
| 4.14 การวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)    | 72   |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล                          | 73   |
| 5.1 บทวิจารณ์                                       | 73   |
| 5.2 บทสรุป  | 73   |
| กิตติกรรมประกาศ                                     | 74   |
| เอกสารอ้างอิง                                       | 75   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องขยายเสียงโดยอาศัยการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์                            | 2    |
| รูปที่ 2.1 แผนภาพการจำแนกประเภทของวงจรขยายกำลังงาน  | 3    |
| รูปที่ 2.2 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ขยายกำลังคลาสเอ                                       | 4    |
| รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวงจรขยายกำลังคลาสเอ  | 5    |
| รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ขยายกำลังแบบคลาสบี                              | 6    |
| รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรขยายกำลังคลาสบี  | 6    |
| รูปที่ 2.6 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานช่วงบวก เพื่อให้ขยายกำลังแบบคลาสเอบี             | 7    |
| รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการขยายกำลังงานแบบสวิตชิง   | 7    |
| รูปที่ 2.8 การต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge) ในการขยายกำลังคลาสดี   | 13   |
| รูปที่ 2.9 การต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge) ในการขยายกำลังคลาสดี   | 14   |
| รูปที่ 2.10 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ที่เพิ่มตรงขอบขาของพัลส์  | 15   |
| รูปที่ 2.11 ผลจากการทำงานไม่เป็นตามอุดมคติของทรานซิสเตอร์ ทำให้เกิดกระแสชูททรู  | 16   |
| รูปที่ 2.12 การไหลของกระแสเมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์  | 16   |
| รูปที่ 2.13 ความผันผวนของแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง เมื่อเกิดการผลักกำลังงานกลับคืนแหล่งจ่าย                                | 17   |
| รูปที่ 2.14 การไหลของกระแสเมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฟูลบริดจ์  | 17   |
| รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์มอสเฟตแบบปลดพาหะชนิดเอ็น (n-channel depletion-type MOSFET)                | 18   |
| รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบสัญญาณพัลส์อินพุตกับสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจากรวมขยายกำลัง   | 18   |
| รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างของเอ็นชาแนลมอสเฟต   | 19   |
| รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์มอสเฟตแบบปลดพาหะชนิดเอ็น   | 19   |
| รูปที่ 2.19 ตำแหน่งของ $R_{G(int)}$ ภายในทรานซิสเตอร์   | 21   |
| รูปที่ 2.20 ผลกระทบจากประจุที่ไหลย้อนกลับเพื่อกลับคืนสภาพเดิม (Reverse recovery charge) ของบอดีไดโอดภายในทรานซิสเตอร์มอสเฟต | 21   |
| รูปที่ 2.21 ผลของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเกิดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า   | 22   |
| รูปที่ 2.22 รูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์  | 23   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 1 | 24   |
| รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 2 | 25   |
| รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 3 | 25   |
| รูปที่ 2.26 การอิมิตัวของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์            | 25   |
| รูปที่ 2.27 วงจรเปรียบเทียบอย่างง่าย                               | 26   |
| รูปที่ 2.28 การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแชนเปลิ่ง                  | 27   |
| รูปที่ 2.29 บล็อกไดอะแกรมการสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง      | 27   |
| รูปที่ 2.30 การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง                   | 27   |
| รูปที่ 2.31 รูปขบวนสัญญาณพัลส์                                     | 28   |
| รูปที่ 2.32 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณ PWM                              | 30   |
| รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมและการทำงานของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง           | 34   |
| รูปที่ 2.34 วงจรบริดจ์ไดโอด  | 35   |
| รูปที่ 2.35 วงจรบริดจ์ไดโอดเมื่ออินพุตมีกระแสต้านบนเป็นบวก         | 35   |
| รูปที่ 2.36 วงจรบริดจ์ไดโอด เมื่ออินพุตมีกระแสต้านล่างเป็นบวก      | 35   |
| รูปที่ 2.37 สัญญาณ Full wave rectified                             | 36   |
| รูปที่ 2.38 การเพิ่มตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการ Charge และ Discharge | 36   |
| รูปที่ 2.39 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน           | 38   |
| รูปที่ 2.40 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน           | 38   |
| รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน           | 39   |
| รูปที่ 2.42 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่หยุด           | 40   |
| รูปที่ 3.1 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม                               | 41   |
| รูปที่ 3.2 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม                                    | 43   |
| รูปที่ 3.3 วงจรยกระดับสัญญาณ                                       | 43   |
| รูปที่ 3.4 วงจรยกระดับสัญญาณกรณีทรานซิสเตอร์สถานะออฟ               | 44   |
| รูปที่ 3.5 วงจรยกระดับสัญญาณกรณีทรานซิสเตอร์สถานะออน               | 44   |
| รูปที่ 3.6 วงจรดีเลย์  | 45   |
| รูปที่ 3.7 วงจรขับกระแส  | 46   |
| รูปที่ 3.8 วงจรลดทอนระดับสัญญาณและขยายสัญญาณผลต่าง                 | 47   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)                                    | 48 |
| รูปที่ 3.10 วงจร ใจเรเตอร์ที่นำมาใช้แทนจลวดเหนียวหนา                                   | 48 |
| รูปที่ 3.11 วงจร ใจเรเตอร์ที่ใช้สร้างอิกวอไลเซอร์ 1 แบนด์                              | 49 |
| รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง   | 50 |
| รูปที่ 3.13 วงจรอิกวอไลเซอร์ 5 แบนด์   | 50 |
| รูปที่ 3.14 วงจรปรับระดับเสียงหลักและวงจรจำกัดระดับแรงดัน                              | 51 |
| รูปที่ 4.1 สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                           | 52 |
| รูปที่ 4.2 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์เปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์                      | 53 |
| รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                                   | 54 |
| รูปที่ 4.4 กราฟคุณสมบัติของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์                              | 54 |
| รูปที่ 4.5 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรระดับสัญญาณ                     | 55 |
| รูปที่ 4.6 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรดีเลย์                          | 56 |
| รูปที่ 4.7 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรดีเลย์                          | 56 |
| รูปที่ 4.8 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ก่อนและหลังผ่านวงจรขับกระแสแบบฮาล์ฟบริดจ์    | 57 |
| รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตวัดแบบฮาล์ฟบริดจ์ 2 ช่องสัญญาณ                                | 58 |
| รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตวัดแบบฟูลบริดจ์  | 58 |
| รูปที่ 4.11 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ก่อนและหลังผ่านไดโอด                        | 59 |
| รูปที่ 4.12 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ก่อนและหลังผ่านวงจรขยายสัญญาณผลต่าง         | 60 |
| รูปที่ 4.13 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน               | 61 |
| รูปที่ 4.14 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเทียบกับอินพุต | 61 |
| รูปที่ 4.15 กราฟคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน                                     | 63 |
| รูปที่ 4.16 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 100 Hz  | 65 |
| รูปที่ 4.17 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 340 Hz  | 66 |
| รูปที่ 4.18 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 1 kHz   | 67 |
| รูปที่ 4.19 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 3.4 kHz   | 68 |
| รูปที่ 4.20 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่กลาง 10 kHz  | 69 |
| รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการวัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์  | 72 |
| รูปที่ 4.22 ตัวอย่างการวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์  | 72 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของวงจรถายกำลังกลาสต่างๆ   | 10   |
| ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ และแบบฟูลบริดจ์           | 14   |
| ตารางที่ 2.3 แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO  | 33   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าระดับสัญญาณที่ค่าความถี่ต่างๆ  | 62   |
| ตารางที่ 4.2 ขนาดสัญญาณที่ความถี่ค่าต่างๆเมื่อทดลองวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม                  | 64   |
| ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายสูงสุดที่แต่ละความถี่   | 69   |
| ตารางที่ 4.4 ช่วงแบนด์วิดท์และความกว้างแบนด์วิดท์ที่แต่ละความถี่                                 | 70   |
| ตารางที่ 4.5 ขนาดสัญญาณที่แต่ละความถี่เมื่อปรับให้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ความถี่นั้นๆมีค่าต่ำสุด | 70   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

วงจรขยายกำลังงานเสียง เป็นวงจรสำคัญที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และหลากหลายประเภท จึงอาจถือได้ว่าวงจรขยายกำลังงานเสียงนั้นมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันเป็นอย่างมาก การขยายกำลังงานเสียงจึงมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ เช่น เครื่องเสียงแบบพกพา เครื่องเสียงดีครยนต์ เครื่องเสียงภายในบ้าน หรือเครื่องเสียงกลางแจ้ง เป็นต้น และเนื่องจากความต้องการมีปริมาณมาก จึงมีการแข่งขันระหว่างผู้ผลิตเพื่อพัฒนาเทคนิคในการขยายกำลังงานเสียงให้มีประสิทธิภาพสูง คุณภาพเสียงดี และราคาถูก

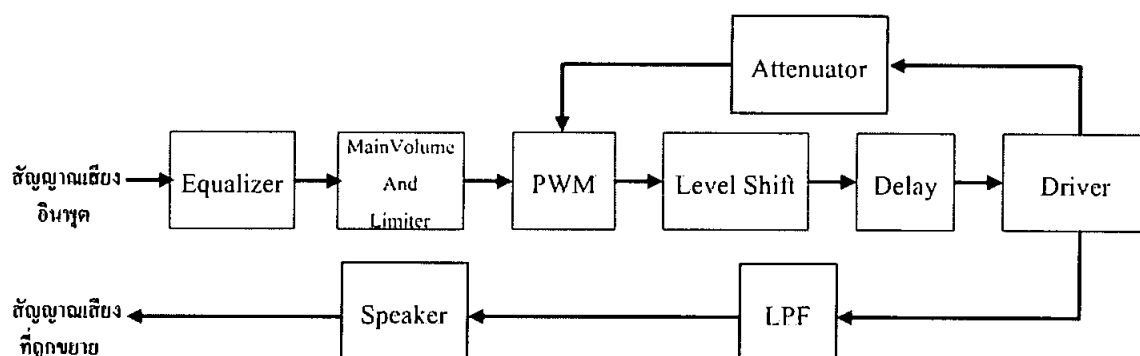
การพัฒนาวงจรขยายกำลังงานเสียงได้มีมาอย่างต่อเนื่อง โดยแบ่งประเภทตามเทคนิคในการขยายเสียงเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ แบบลิเนียร์ (Linear) และแบบสวิตซิ่ง (Switching) ซึ่งในแต่ละกลุ่มก็จะมีเทคนิคการขยายกำลังอีกหลากหลายจำแนกเป็นคลาส (Class) ซึ่งเทคนิคต่างๆก็เหมาะกับงานต่างประเภทกัน

#### 1.2 แนวคิดที่ใช้ในการทำโครงการ

การสร้างวงจรขยายกำลังงานเสียงคลาสดี ได้รับความนิยมในการนำมาใช้กับงานหลายประเภทมากขึ้นเนื่องจากข้อดีต่างๆ เช่น มีการใช้กระแสจากแหล่งจ่ายน้อย กำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนมีค่าต่ำ ทำให้มีประสิทธิภาพสูง และต้องการแผ่กระจายความร้อน (Heat sink) ขนาดเล็ก จึงมีราคาถูก ทั้งนี้ในการทำโครงการได้นำการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์ (Pulse width modulation (PWM)) มาใช้ร่วมกับการขยายกำลังงานเสียงคลาสดีในส่วนของ การแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้ได้นำเสนอวงจรขยายกำลังคลาสดีฟูลบริดจ์แบบลูปปิด โดยมีส่วนของวงจรอิกควอไลเซอร์แบบแอนะล็อกที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณอินพุต และในส่วนของวงจรขยาย ประกอบไปด้วยวงจรมอดูเลตที่อาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบความกว้างพัลส์ จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการมอดูเลตจะถูกขยายกำลังสัญญาณให้สูงขึ้นด้วยส่วนของภาคขับสัญญาณ ซึ่งมีโครงสร้างแบบฟูลบริดจ์ จากนั้นเมื่อพัลส์ถูกขยายกำลัง ข่าวสารที่เป็นองค์ประกอบของพัลส์ก็จะถูกขยายกำลังด้วย จึงนำสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการขยายกำลัง ไปผ่านวงจรกรองความถี่ เพื่อกรองสัญญาณกลับคืนมาเส้า้นำไปจ่ายให้กับลำโพงต่อไป มีบล็อกไคอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องขยายเสียงซึ่งอาศัยการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์



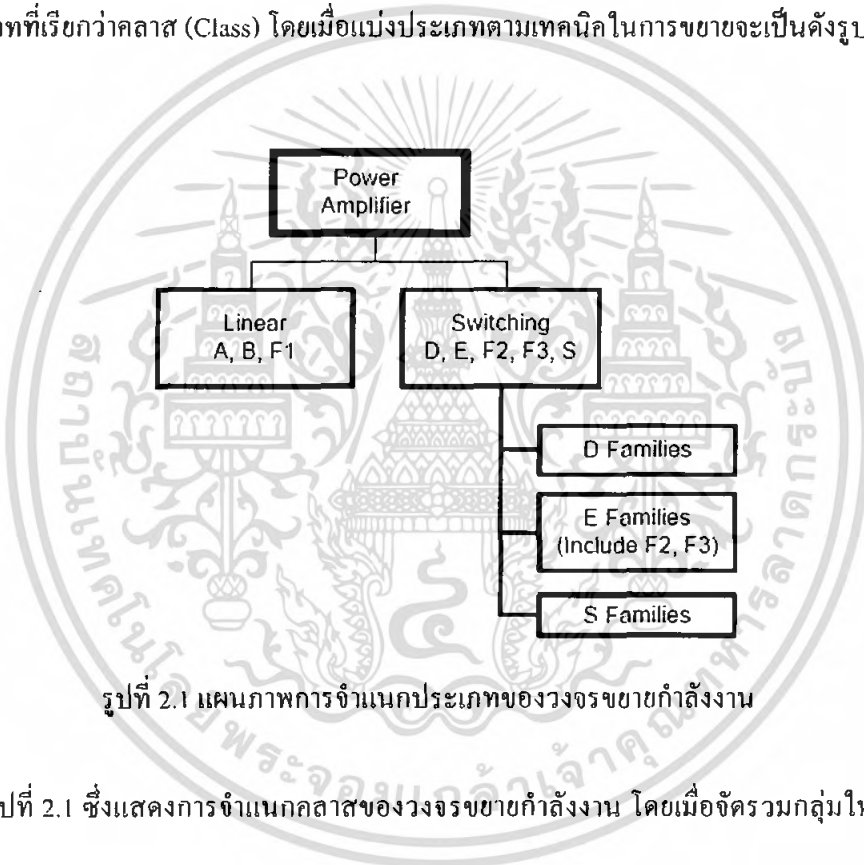
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน

#### 2.1.1 ประเภทของวงจรขยายกำลังงาน

วงจรขยายกำลังงาน เป็นวงจรที่ใช้ขยายกำลังงานของสัญญาณ ซึ่งถ้าแบ่งตามประเภทสัญญาณที่นำมาขยายจะแบ่งเป็นวงจรขยายกำลังความถี่เสียง (Audio frequency amplifier: AF-Amp.) คือขยายสัญญาณในความถี่ที่หูคนได้ยิน จะอยู่ในช่วง 0-22 kHz และวงจรขยายกำลังความถี่คลื่นวิทยุ (Radio frequency amplifier: RF-Amp.) ซึ่งขยายสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่เสียง หรือถ้าแบ่งตามเทคนิคที่ใช้ในการขยายกำลัง ก็จะแบ่งเป็นประเภทที่เรียกว่าคลาส (Class) โดยเมื่อแบ่งประเภทตามเทคนิคในการขยายจะเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพการจำแนกประเภทของวงจรขยายกำลังงาน

จากรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงการจำแนกคลาสของวงจรขยายกำลังงาน โดยเมื่อจัดรวมกลุ่มใหญ่ๆจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ

1. วงจรขยายกำลังแบบเชิงเส้น (Linear) เป็นวงจรขยายกำลังที่มีอัตราส่วนกำลังงานของสัญญาณที่ผ่านการขยายเป็นสัดส่วน โดยตรงกับแรงดันของสัญญาณอินพุต ทรานซิสเตอร์จะทำการขยายสัญญาณอินพุตที่อยู่ในบริเวณแอคทีฟ (Active region) และจะทำการขยายกำลังตลอดเวลาที่มีสัญญาณอินพุตเข้ามา ตัวอย่างคลาสที่ใช้หลักการนี้ เช่น คลาสเอ, บี, และคลาสเอบี โดยแต่ละคลาสจะต่างกันที่จุดการทำงาน (Quiescent operating point : Q point) บนกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้ช่วงเวลาที่จ่ายกระแสคอลเลกเตอร์เอาต์พุตต่อเวลาที่มีสัญญาณอินพุตต่างกัน โดยจะแสดงตัวอย่างคลาสเอ บี และเอบี ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การขยายกำลังแบบคลาสเอ (Class A)

ในรูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งจุดไบอัสทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทำการขยายกำลังแบบคลาสเอ ซึ่งจะไบอัสทรานซิสเตอร์ที่จุดกึ่งกลางช่วงที่ทำงานในโหมดแอกทีฟ บนเส้นภาระของสัญญาณกระแสลับ (Ac load line) เพื่อให้สัญญาณอินพุตทั้งหมดอยู่ภายในบริเวณแอกทีฟ และในรูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างวงจรขยายกำลังแบบคลาสเอ ซึ่งมีการต่อแรงดันไบอัสที่ขาเบส เพื่อให้วงจรทำงานตามกราฟรูปที่ 2.2 ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 2.2 และวงจรในรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาการสูญเสียกำลังงานจะพบว่ามีการสูญเสียกำลังงานเกิดขึ้นสองส่วน ส่วนแรกเกิดจากการไบอัสแรงดันทรานซิสเตอร์ให้มีจุดทำงานดังกราฟรูป 2.2 ทำให้เกิดกระแสเอาต์พุตคอลเลกเตอร์จากการไบอัส ( $I_{CO}$ ) แม้ขณะที่ยังไม่ได้ป้อนสัญญาณอินพุต ซึ่งกระแส  $I_{CO}$  นี้จะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ลงกราวด์ ไม่ผ่านสู่อโหลดเนื่องจากตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะไม่ยอมให้กระแสที่เป็นไฟตรง (DC current) ไหลผ่าน เกิดเป็นความสูญเสียกำลังงานขึ้นและความสูญเสียส่วนที่สองเกิดจกขณะทรานซิสเตอร์ทำการขยายสัญญาณอินพุต ทรานซิสเตอร์จะทำงานในบริเวณแอกทีฟตลอดช่วงของสัญญาณอินพุต ซึ่งดูจากรูปที่ 2.2 พบว่าในขณะที่ทรานซิสเตอร์จ่ายกระแสคอลเลกเตอร์ ( $i_c$ ) ทรานซิสเตอร์ก็มีแรงดันตกคร่อมขาคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ด้วย ซึ่งจากสมการกำลังงาน (2.1) แสดงให้เห็นว่าเกิดกำลังงานขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นกำลังงานที่สูญเสียเป็นความร้อนที่ทรานซิสเตอร์ โดยเมื่อคำนวณการสูญเสียทั้งสองแบบแล้ว คลาสเอมีประสิทธิภาพสูงสุดจากการคำนวณตามทฤษฎีเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์

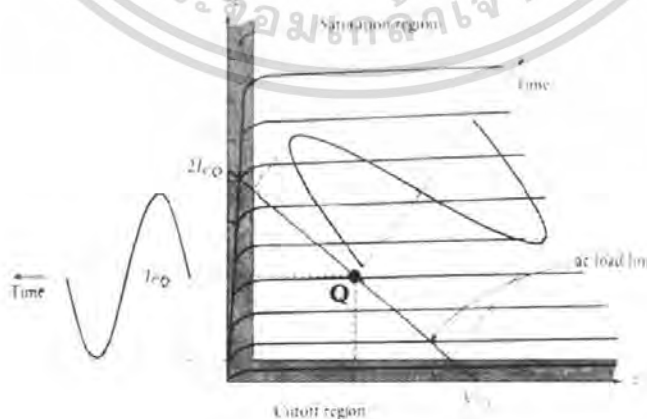
$$P_d = V_{rr} \times i_{rr} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P_d$  คือกำลังงานที่สูญเสียของทรานซิสเตอร์

$V_{rr}$  คือแรงดันตกคร่อมระหว่างขาคอลเลกเตอร์และขาอิมิตเตอร์

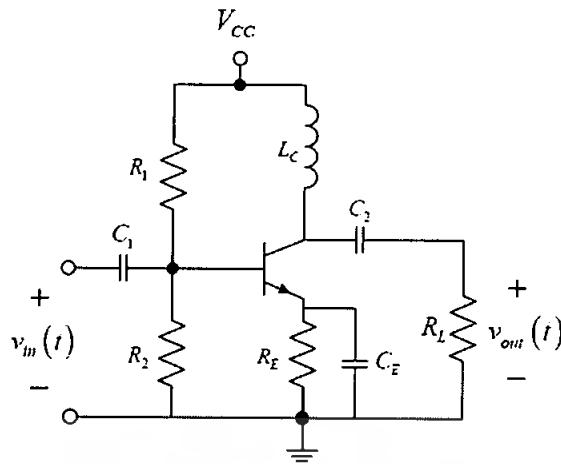
เมื่อใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

$i_{rr}$  คือกระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์สู่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟพิกัดลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ขยายกำลังแบบคลาสเอ

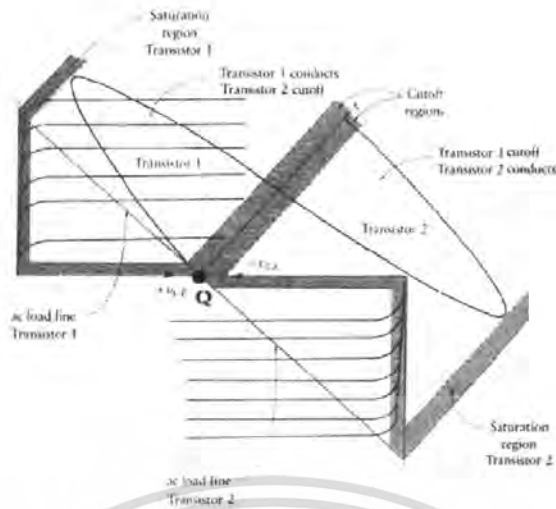
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



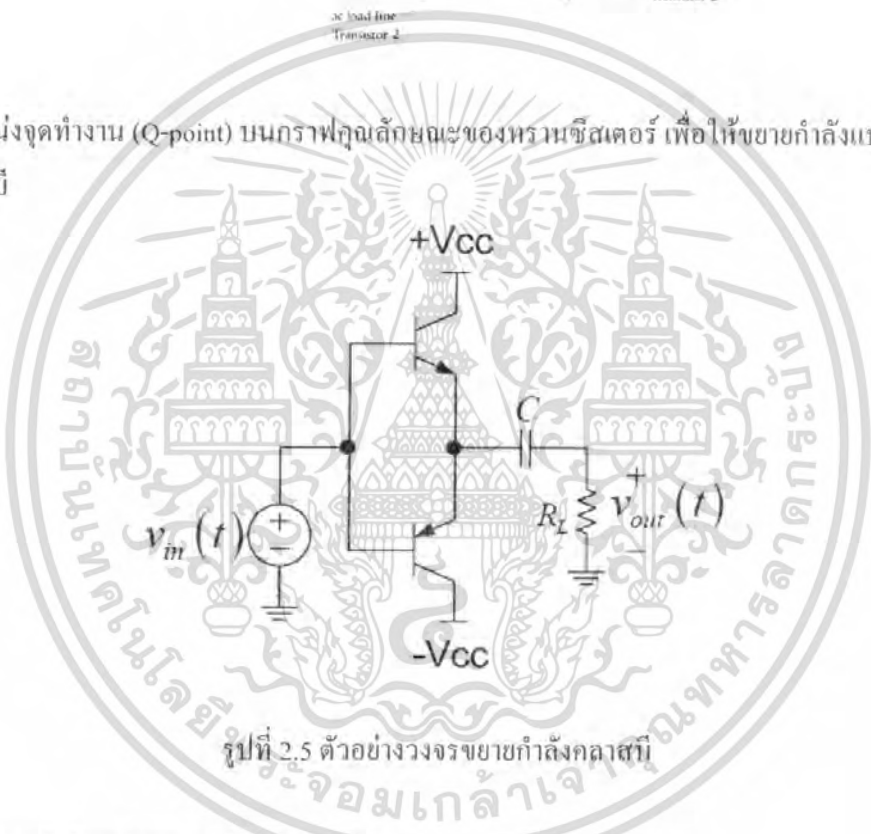
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวงจรขยายกำลังคลาสเอ

- การขยายกำลังแบบคลาสบี (Class B)

ในรูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งจุดไบอัสทรานซิสเตอร์เพื่อทำการขยายกำลังแบบคลาสบี ซึ่งมีจุดทำงาน (Q-point) อยู่บริเวณคัทออฟ (Cutoff region) ดังนั้นถ้าป้อนสัญญาณอินพุตรูปไซน์ที่ไม่มีแรงดันไฟตรง แล้วใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวก็จะทำงานได้ครึ่งลูกคลื่น จึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวทำงานสลับกันแบบพุช-พูล (Push-Pull) โดยทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งจะทำการขยายกำลังเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแรงดันช่วงบวก และอีกตัวจะขยายกำลังเมื่ออินพุตเป็นแรงดันช่วงลบ แล้วรวมกันเป็นสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งวงจรตัวอย่างคลาสบีแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยจะไม่มีกรไบอัสแรงดันที่ขาสเบสเหมือนคลาสเอ ดังนั้นช่วงเวลาที่ไม่มีสัญญาณอินพุต จะไม่เกิดการสูญเสียกำลังจากกระแสคอลเลกเตอร์ไบอัส ( $I_{CQ}$ ) แต่เมื่อป้อนอินพุตสู่ทรานซิสเตอร์ สัญญาณอินพุตจะอยู่บริเวณแอกทีฟตลอดช่วงครึ่งลูกคลื่น ซึ่งจากรูปที่ 2.4 พบว่าในขณะที่ทรานซิสเตอร์จ่ายกระแสคอลเลกเตอร์ ( $i_C$ ) ทรานซิสเตอร์ก็มีแรงดันตกคร่อมขาคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ด้วย ซึ่งจากสมการกำลังงานที่ (2.1) แสดงให้เห็นว่าเกิดกำลังงานขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นกำลังงานที่สูญเสียเป็นความร้อนที่ทรานซิสเตอร์ โดยช่วงเวลาที่ทำงานในโหมดแอกทีฟนี้เป็นเพียงช่วงเวลาคึ่งลูกคลื่นของสัญญาณอินพุต และเมื่อคำนวณประสิทธิภาพของคลาสบี ตามทฤษฎีจะเท่ากับ 78.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ขยายกำลังแบบคลาสบี

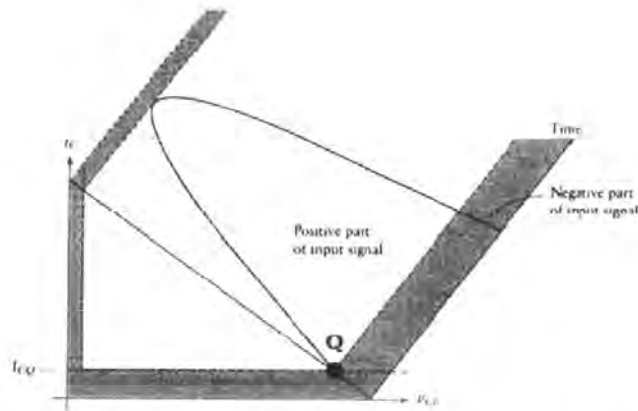


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรขยายกำลังคลาสบี

- การขยายกำลังแบบคลาสเอบี (Class AB)

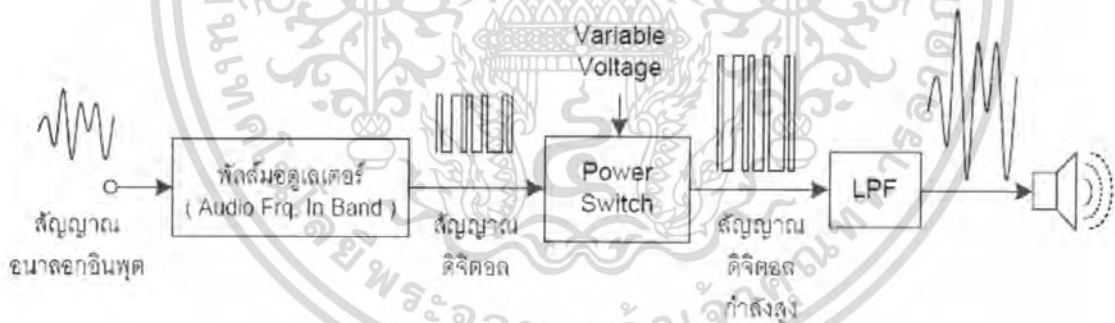
คลาสบีจะมีช่วงหนึ่งที่ทรานซิสเตอร์ทำงานบริเวณคัทออฟ ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้น ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) กับสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นคลาสเอบีจึงเลื่อนจุดการทำงานบนกราฟคุณลักษณะทรานซิสเตอร์ (Q-point) โดยไบอัสให้อยู่เหนือบริเวณคัทออฟเล็กน้อย ดังเช่นรูปที่ 2.6 ก็จะไม่เกิดความผิดเพี้ยนนี้ แต่จะทำให้เกิดการสูญเสียจากกระแสคอลเลกเตอร์จากการไบอัส ( $I_{CQ}$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของคลาสเอบีจึงน้อยกว่าคลาสบีเล็กน้อย แต่ก็ยังคงมากกว่าคลาสเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งจุดทำงาน (Q-point) บนกราฟพิกัดลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานช่วงบวก เพื่อให้ขยายกำลังแบบคลาสเอมี

2. วงจรขยายกำลังแบบสวิตชิง (Switching) การขยายกำลังแบบนี้ทรานซิสเตอร์จะมีจุดทำงานอยู่ในบริเวณคัทออฟและบริเวณอิมิตัวของทรานซิสเตอร์ โดยกลางสที่ใช้หลักการนี้ประกอบด้วยสองกลุ่มคือกลุ่มคลาสดี และกลุ่มคลาสอี โดยกลุ่มคลาสดีและกลุ่มคลาสอีจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่จำนวนทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการขยายกำลัง กล่าวคือกลุ่มคลาสดีจะใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวทำงานคู่กัน ส่วนกลุ่มคลาสอีจะใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งขั้นตอนการขยายกำลังงานแบบสวิตชิง โดยทั่วไปแสดงได้ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการขยายกำลังงานแบบสวิตชิง

เริ่มจากป้อนสัญญาณแอนะล็อกอินพุตที่เป็นข่าวสารเข้าสู่การมอดูเลตพัลส์ ที่ให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์มีองค์ประกอบทางความถี่ของข่าวสารเดิม รวมอยู่กับองค์ประกอบทางความถี่สูงของพัลส์ จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการมอดูเลตจะถูกขยายกำลังด้วยเพาเวอร์สวิตช์ (Power Switch) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นทรานซิสเตอร์ที่จ่ายกำลังได้สูงและการสลับการทำงานระหว่างช่วงอิมิตัวและช่วงคัทออฟมีความเร็วสูง เช่น ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต (MOSFET) และเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นี้จะมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงเป็นแรงดันไฟตรงที่ควบคุมอัตราขยายกำลัง ซึ่งการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงจะขึ้นอยู่กับความต้องการอัตราขยายและค่าความทนแรงดันสูงสุดของทรานซิสเตอร์ จากนั้นเมื่อพัลส์ถูกขยายกำลัง ข่าวสารที่เป็นองค์ประกอบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัลส์ที่จะถูกขยายกำลังด้วย จึงนำสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการขยายกำลังไปผ่านวงจรกรองความถี่ เพื่อกรองเฉพาะความถี่ข่าวสารกลับคืนมา ก็จะได้สัญญาณข่าวสารเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่มีกำลังงานสูงขึ้น

ข้อดีของการทำงานแบบสวิตชิง มีดังต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเทียบกับการขยายกำลังแบบเชิงเส้น เนื่องจากการต่อทรานซิสเตอร์ให้ทำการขยายแบบสวิตชิง จะเป็นการใช้งานทรานซิสเตอร์แทนสวิทช์ คือใช้โหมดอิมิตัวแทนการเปิดสวิทช์ และใช้โหมดคัทออฟแทนการปิดสวิทช์ และทรานซิสเตอร์จะไม่มีกระแสแรงดันที่ขาเบส ดังนั้นถ้าไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตก็จะไม่มีการจ่ายกระแสคอลเลคเตอร์ จึงไม่มีการสูญเสียจากกระแสคอลเลคเตอร์ไบอัส ( $I_{CQ}$ ) และเมื่อป้อนอินพุตให้ทรานซิสเตอร์จะมีความทำงานสลับระหว่างบริเวณอิมิตัว (Saturation region) และบริเวณคัทออฟ (Cutoff region) ของกราฟคุณลักษณะทรานซิสเตอร์ โดยในแต่ละบริเวณการทำงานจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านและแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ดังนี้

โหมดอิมิตัว หรือ โหมดออน (On) แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์จะเข้าใกล้ศูนย์ ขณะที่กระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงผ่านทรานซิสเตอร์สู่โหลดมีค่าสูงสุด

โหมดคัทออฟ หรือ โหมดออฟ (Off) แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์สูงสุด ขณะที่กระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงผ่านทรานซิสเตอร์สู่โหลดมีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้นเมื่อคำนวณการสูญเสียกำลังงานที่ทรานซิสเตอร์ตามสมการ (2.1) จะมีค่ากำลังงานสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์เป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก เพราะมีเวลาเพียงขณะที่ทรานซิสเตอร์เปลี่ยนสถานะเท่านั้น ที่แรงดันและกระแสมีค่าพร้อมกันแล้วทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงาน ซึ่งเวลาในช่วงเปลี่ยนสถานะระหว่างสองโหมดนี้จะเป็นเวลาส่วนที่น้อยมาๆ เมื่อเทียบกับเวลาที่ทำงานในโหมดอิมิตัวหรือโหมดคัทออฟ (ถ้าเป็นการสวิตชิงตามอุดมคติจะไม่มีเวลาช่วงเปลี่ยนสถานะนี้) ดังนั้นการสูญเสียกำลังงานเป็นความร้อนจึงต่ำมาก และเมื่อการสูญเสียเป็นความร้อนต่ำ ประสิทธิภาพก็จะมีค่าสูง ซึ่งถ้าทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นอุดมคติจะมีประสิทธิภาพเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีตัวแปรจากการไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียกำลัง ซึ่งประสิทธิภาพนี้เป็นข้อได้เปรียบที่ชัดเจนของการขยายกำลังแบบสวิตชิง เมื่อเปรียบเทียบกับ การขยายกำลังแบบเชิงเส้น

- ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการออสซิลเลตต่ำ เนื่องจากทรานซิสเตอร์จะทำงานในโหมดที่มีแกนขยายสูงเมื่ออิมิตัว และต่ำมาก (ใกล้เคียงศูนย์) เมื่อเป็นโหมดคัทออฟ ดังนั้นจึงมีช่วงเวลาเพียงเล็กน้อยที่จะทำงานในโหมดแอกทีฟ ซึ่งช่วงเวลาที่ทำงานโหมดแอกทีฟเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการออสซิลเลตในวงจรขยายกำลังแบบเชิงเส้น

2.1.2 คุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน

จุดประสงค์ในการออกแบบวงจรขยายกำลังงานทุกๆประเภท ต้องการให้เป็นดังต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากจะส่งผลกับวงจรภาคจ่ายไฟเลี้ยง เพราะถ้าวงจรขยายกำลังมีประสิทธิภาพสูง การใช้พลังงานจะเป็นไปอย่างคุ้มค่า ดังนั้นเมื่อต้องการกำลังที่เท่ากัน วงจรที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าจะใช้กำลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงน้อยกว่า การออกแบบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจึงทำได้ง่ายกว่า ราคาจะถูก และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือถ้าวงจรมีประสิทธิภาพสูงจะมีการสูญเสียกำลังงานเป็นความร้อนต่ำ จึงส่งผลต่อการระบายความร้อนโดยใช้แผ่นระบายความร้อน (Heatsink) ขนาดเล็ก ซึ่งแผ่นระบายความร้อนนับเป็นอุปกรณ์อีกชิ้นที่มีราคาแพง เมื่อต้องระบายความร้อนต่ำก็จะใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดเล็ก จึงประหยัดราคาในส่วนนี้ได้ และประสิทธิภาพในการขยายกำลังงานจะมีนิยามอยู่ 3 แบบดังนี้

- การวัดประสิทธิภาพที่ขั้วแตรน (Drain) หรือขาคอลเลกเตอร์ (Collector) เป็นประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังในจุดที่ให้สัญญาณเอาต์พุต จำนวนได้ตามสมการ (2.2)

$$\eta = \frac{P_{RF(out)}}{P_{DC(in)}} \times 100 \tag{2.2}$$

เมื่อ  $\eta$  คือประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลัง (เปอร์เซ็นต์)  
 $P_{RF(out)}$  คือกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านการขยายกำลัง (วัตต์)  
 $P_{DC(in)}$  คือกำลังงานที่แหล่งจ่ายไฟป้อนให้วงจรขยายกำลัง (วัตต์)

- การวัดประสิทธิภาพของวงจรเมื่อรวมการคำนวณกำลังงานสัญญาณอินพุต ในกรณีที่สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ภาคการขยายกำลังมีกำลังงานสูง กำลังงานของสัญญาณอินพุตจะถือเป็นกำลังงานสูญเสียที่ต้องจ่ายให้กับวงจรขยายกำลังด้วย การวัดประสิทธิภาพดังนิยามในสมการที่ (2.2) จึงไม่สมเหตุผล ดังนั้นจึงควรคำนวณโดยลบกำลังงานอินพุตที่ถือเป็นกำลังที่ต้องสูญเสียให้วงจรออกจากกำลังงานเอาต์พุต ดังสมการ (2.3)

$$\eta = \frac{P_{RF(out)} - P_{RF(in)}}{P_{DC(in)}} \times 100 \tag{2.3}$$

เมื่อ  $P_{RF(in)}$  คือกำลังงานของสัญญาณอินพุต (วัตต์)

- การวัดประสิทธิภาพโดยรวม (Overall efficiency) เป็นค่าประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรขยายกำลังทั้งระบบ โดยรวมทุกภาคการขยาย ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่ใช้ตัดสินวงจรขยายกำลังได้ดีที่สุด และคำนวณได้ตามสมการ (2.4)

$$\eta = \frac{P_{RF(out)}}{(P_{DC(in)} + P_{RF(in)})} \times 100 \quad (2.4)$$

ซึ่งค่าประสิทธิภาพของวงจรการขยายกำลังแบบต่างๆมีค่าโดยประมาณดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังคลาสต่างๆ

| ประเภทของคลาส                 | ประสิทธิภาพสูงสุดตามทฤษฎี ( $\eta_{max}$ ) | ค่าประมาณประสิทธิภาพเมื่อใช้งานจริง |
|-------------------------------|--|-------------------------------------|
| <b>เชิงเส้น (Linear)</b>      |  |                                     |
| คลาส A                        | 50%  | 40%                                 |
| คลาส B                        | 78.5%                                      | 65%                                 |
| คลาส AB                       | $50\% < \eta < 78.5\%$                     | 60%                                 |
| <b>แบบสวิตชิง (Switching)</b> | 100%                                       | 95%                                 |
| คลาส D, กลุ่มคลาส E           |  |                                     |

2. ค่าตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure: NF) ต่ำ เนื่องจากสัญญาณรบกวนรวมทั้งหมดที่ปรากฏออกมาที่เอาต์พุตของวงจรขยายกำลัง ( $n_{T_0}(t)$ ) ประกอบด้วยสองส่วนคือ สัญญาณรบกวนเอาต์พุตที่เกิดจากการขยายกำลังสัญญาณรบกวนอินพุต ( $n_{S_0}(t)$ ) และสัญญาณรบกวนเอาต์พุตที่เกิดจากวงจรขยายกำลังเอง ดังนั้นค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนจึงเป็นค่าที่บอกว่าระบบหรือการขยายกำลังนั้นมีการก่อกำเนิดสัญญาณรบกวนจากภายในตัวเครื่องขยาย ออกมาปนกับสัญญาณที่ต้องการมากหรือน้อยอย่างไร โดยคำนวณได้ตามสมการ (2.5)

$$NF = \frac{\overline{n_{T_0}^2(t)}}{\overline{n_{S_0}^2(t)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\overline{n_{T_0}^2(t)}$  เป็นกำลังเฉลี่ยรวมทั้งหมดของสัญญาณรบกวนที่ปรากฏออกมาที่เอาต์พุตของเครื่องขยายสัญญาณ

$\overline{n_{S_0}^2(t)}$  เป็นกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่เป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณรบกวน เอาต์พุตซึ่งเกิดจากการขยายสัญญาณรบกวนอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสามารถพิสูจน์ได้ง่ายต่อการวัดค่าเป็นดังสมการ (2.6)

$$NF = \frac{\left[ \frac{S}{N} \right]_i}{\left[ \frac{S}{N} \right]_o} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\left[ \frac{S}{N} \right]_i$  คือค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณอินพุต  
 $\left[ \frac{S}{N} \right]_o$  คือค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณที่ผ่านการขยาย

โดยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio: SNR)  $\left[ \frac{S}{N} \right]$  เป็นค่าที่บอกความแตกต่างของกำลังงานข่าวสารที่ต้องการ กับกำลังงานของสัญญาณรบกวน โดยถ้ามีค่ามากจะดีเพราะแสดงว่าสัญญาณข่าวสารมีกำลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานของสัญญาณรบกวน และจะคำนวณค่าได้ตามสมการ (2.7)

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{s^2(t)}}{n^2(t)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\frac{S}{N}$  คือค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน  
 $\overline{s^2(t)}$  คือค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณข่าวสาร  
 $n^2(t)$  คือค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน

ค่าเอสเอ็นอาร์ปกติมักนิยมแสดงค่าในหน่วยเดซิเบล (Decibel : dB) คำนวณได้ตามสมการ (2.8)

$$\frac{S}{N} \Big|_{dB} = 10 \log \left( \frac{\overline{s^2(t)}}{n^2(t)} \right) \quad (2.8)$$

**3. ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion: THD)** ค่า เป็นค่าที่บอกว่าเมื่อนำสัญญาณไซน์รูปสมบูรณ (Pure sinusoidal wave) ป้อนเข้าสู่การขยายกำลังงานแล้วมีความถี่ของสัญญาณอื่นที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่ข่าวสาร หรือเรียกว่าความถี่ฮาร์โมนิกเกิดขึ้นที่เอาต์พุตหรือไม่ เพราะสัญญาณฮาร์โมนิกเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ เนื่องจากเมื่อรวมกับข่าวสารเดิมจะทำให้รูปสัญญาณผิดไป ค่า THD คำนวณได้ตามสมการ (2.9) หรือคำนวณตามสมการ (2.9) แล้วคูณ 100 เพื่อทำเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} c_n^2}{c_1^2} \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $c_1$  คือค่าแอมพลิจูดของสัญญาณข่าวสาร  
 $c_n$  คือค่าแอมพลิจูดของสัญญาณฮาร์มอนิกที่  $n$  ของสัญญาณข่าวสาร

**4. มีแบนด์วิดท์และอัตราการขยายกำลังเหมาะสมกับประเภทงาน** เนื่องจากวงจรขยายกำลังใช้กับงานหลายประเภท ซึ่งมีความถี่ที่ต้องการขยายแตกต่างกัน เช่น การขยายกำลังงานสำหรับเครื่องเสียง ก็ต้องขยายเสียงในช่วงความถี่ที่หูคนได้ยิน (ประมาณ 10 Hz ถึง 25 kHz) หรือถ้าเป็นเครื่องขยายกำลังเพื่อส่งข่าวสารไปในช่องสัญญาณ ก็ต้องการขยายกำลังของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตมา ซึ่งส่วนมากจะเป็นความถี่สูงกว่าความถี่เสียง ดังนั้นการขยายกำลังต้องคำนึงถึงผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ของวงจรด้วยว่า วงจรขยายกำลังจะต้องมีผลตอบสนองที่ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน หรือต้องไม่ตัดองค์ประกอบทางความถี่ของข่าวสาร เพื่อให้สัญญาณภายหลังการขยายเหมือนเดิม ส่วนความถี่นอกย่านที่ต้องการขยายกำลังก็เปรียบเสมือนสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงไม่ควรขยายความถี่ที่อยู่นอกแบนด์วิดท์ของสัญญาณข่าวสาร

**5. ราคาถูกเมื่อเทียบกับคุณภาพที่ได้** เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ เพื่อความคุ้มค่าของผู้ซื้อและความสามารถในการแข่งขันกับวงจรขยายเสียงที่มีอยู่แล้ว โดยราคาเป็นผลจากเทคนิคที่ใช้ในการขยายกำลัง รวมถึงการเลือกคุณภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร และขั้นตอนในการสร้างทั้งหมด เช่น ถ้าออกแบบให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะน้อย แผ่นระบายความร้อนที่มีราคาแพงก็จะใช้ไม่มาก ราคาก็จะถูกลง เป็นต้น ซึ่งราคากับคุณภาพจะเป็นตัวชี้วัดคุณค่าและความนิยมของวงจรขยายกำลังนั้นๆ กล่าวคือ ถ้ามีสองวงจรที่คุณภาพเท่ากัน วงจรที่ราคาถูกก็จะได้ความนิยมมากกว่า

จากคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงานเสียงต่างๆเหล่านี้ ต้องคำนึงถึงลำดับความสำคัญในการออกแบบให้เหมาะสมกับแต่ละประเภทงาน เพราะบางงานอาจไม่จำเป็นต้องใช้คุณภาพดีมาก เพราะจะทำให้ราคาแพงเกินกว่าความจำเป็น ดังนั้นวงจรขยายกำลังจึงมีจำหน่ายหลายคุณภาพและหลากหลายราคา

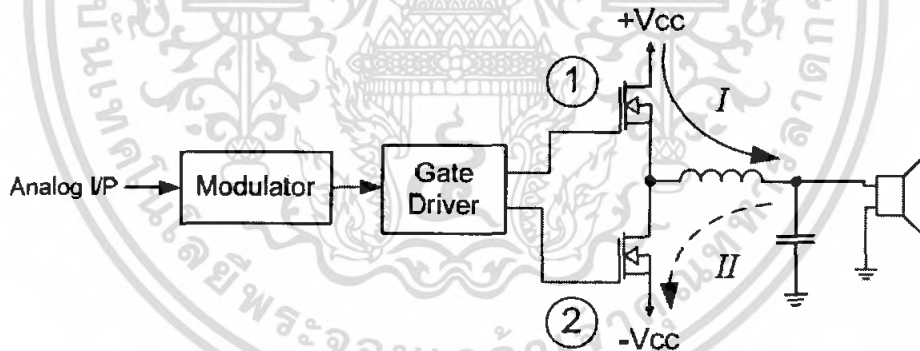
## 2.2 วงจรขยายกำลังงานเสียงคลาสดี

คลาสดีเป็นคลาสที่ขยายกำลังด้วยเทคนิคสวิตชิ่ง แต่ในเฉพาะคลาสดีเท่านั้นที่การทำงานในส่วนเพาเวอร์สวิตช์จะใช้ทรานซิสเตอร์จำนวนสองตัวต่อร่วมกันและทำงานเป็นคู่ โดยมีเฟสการทำงานต่างกัน  $180^\circ$  ซึ่งอาจมีคู่เดียวหรือสองคู่ก็ได้ดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 แต่กลุ่มคลาสดีจะทำงานด้วยทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว

### 2.2.1 ประเภทการต่อทรานซิสเตอร์ในภาคขยายกำลังคลาสดี

การขยายกำลังคลาสดีมีรูปแบบในการต่อทรานซิสเตอร์สองรูปแบบ คล้ายกับคลาสเอบี คือ รูปแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-bridge) และรูปแบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge)

- แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-bridge) เป็นการต่อทรานซิสเตอร์ทำงานร่วมกันเพียงคู่เดียวดังรูปที่ 2.8 (จะสมมุติหมายเลขทรานซิสเตอร์ประกอบคำอธิบายตามรูปที่ 2.8) โดยทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะมีโหมดการทำงานตรงข้ามกัน กล่าวคือถ้าทรานซิสเตอร์ (1) อยู่ในโหมดลออน (เปรียบเสมือนปิดวงจร (Short circuit) ระหว่างขาเดรนและขาซอร์ทของทรานซิสเตอร์) ทรานซิสเตอร์ (2) ก็จะอยู่ในโหมดออฟ (เปรียบเสมือนเปิดวงจร (Open circuit) ระหว่างขาเดรนและขาซอร์ทของทรานซิสเตอร์) ทำให้กระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมอสเฟตด้านบวก ( $+V_{CC}$ ) ออกสู่ขั้วโหลดเหนี่ยวนำและโหลดแล้วลงสู่กราวด์ แสดงดังกระแส  $I$  ในรูปที่ 2.8 ในทางตรงข้ามถ้าทรานซิสเตอร์ (1) อยู่ในโหมดออฟ ทรานซิสเตอร์ (2) ก็จะอยู่ในโหมดลออน ทำให้กระแสไหลจากกราวด์ผ่านโหลดสู่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมอสเฟตด้านลบ ( $-V_{CC}$ ) แสดงดังกระแส  $II$  ในรูปที่ 2.8 และจะเปลี่ยนโหมดสลับกันไปมาตามสัญญาณพัลส์ที่ควบคุมที่ขาเกตจากวงจรถับขาเกต (Gate Driver) กระแสก็จะมีทิศสลับระหว่าง  $I$  และ  $II$  การต่อแบบนี้ต้องคำนึงถึงแหล่งจ่ายกระแสไฟเลี้ยง ที่ต้องทนต่อพลังงานที่จะถูกผลักกลับออกมาจากวงจรถยาย เพราะเมื่อเอาต์พุตของวงจรถยายทำงานที่ความถี่ต่ำจะส่งผลทำให้แรงดันไฟเลี้ยงเกิดความผันผวนหรือเรียกว่าเกิดการผลักกำลังงานกลับคืนแหล่งจ่าย (Power supply pumping) และการต่อแบบฮาล์ฟบริดจ์นี้ต้องการการต่อสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) เพื่อเพิ่มคุณภาพสัญญาณเอาต์พุต

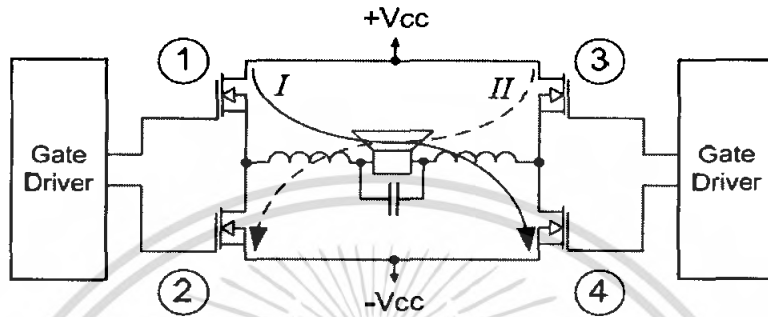


รูปที่ 2.8 การต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge) ในการขยายกำลังคลาสดี

- แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge) เป็นการต่อทรานซิสเตอร์สองคู่ หรือเป็นการต่อแบบฮาล์ฟบริดจ์สองส่วนรวมกันดังรูปที่ 2.9 (จะสมมุติหมายเลขทรานซิสเตอร์ประกอบคำอธิบายตามรูปที่ 2.9) โดยการทำงานจะทำงานร่วมกันระหว่างฮาล์ฟบริดจ์ทั้งสองฝั่งคือ ในช่วงเวลาเดียวกันจะมีทรานซิสเตอร์ทำงานโหมดเดียวกัน 2 คู่ คือคู่ทรานซิสเตอร์ (1),(4) กับคู่ทรานซิสเตอร์ (2),(3) โดยสองคู่นี้จะมีโหมดตรงข้ามกัน กล่าวคือถ้าทรานซิสเตอร์ (1),(4) อยู่ในโหมดลออน ทรานซิสเตอร์ (2),(3) ก็จะอยู่ในโหมดออฟ ทำให้กระแสมีทิศการไหลผ่านโหลดดังกระแส  $I$  ในรูปที่ 2.9 ในทางตรงข้ามถ้าทรานซิสเตอร์ (1),(4) อยู่ในโหมดออฟ ทรานซิสเตอร์ (2),(3) ก็จะอยู่ในโหมดลออน ทำให้กระแสมีทิศการไหลผ่านโหลดดังกระแส  $II$  ในรูปที่ 2.9 และจะเปลี่ยนโหมดสลับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปตามสัญญาณพัลส์ที่ควบคุมที่ขาเกตจากวงจรขับขาเกต (Gate Driver) กระแสก็จะมีทิศลับระหว่าง  $I$  และ  $II$  การต่อแบบฟูลบริดจ์นี้จะไม่เกิดปรากฏการณ์ผลึกกำลังงานกลับคืนแหล่งจ่าย และสามารถกำจัดสัญญาณไฟตรงที่รวมอยู่ในสัญญาณอินพุตได้ จึงไม่จำเป็นต้องต่อสัญญาณป้อนกลับ เหมาะจะใช้ในการขยายกำลังแบบลูปเปิด (Open loop) แต่ก็ยังมีข้อเสียคือจะใช้อุปกรณ์มากกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์ และจะสรุปคุณสมบัติของการต่อทรานซิสเตอร์ทั้งสองรูปแบบได้ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 การต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge) ในการขยายกำลังคลาสดี

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการต่อคู่ทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ และแบบฟูลบริดจ์

| รูปแบบการต่อ     | ฮาล์ฟบริดจ์  | ฟูลบริดจ์                               |
|------------------|--|---|
| อัตราการใช้กระแส | 1  | 2                                       |
| MOSFET           | 2 MOSFETs ต่อ 1 ช่องสัญญาณ                                 | 4 MOSFETs ต่อ 1 ช่องสัญญาณ              |
| Gate Driver      | 1 Gate Driver/CH   | 2 Gate Driver/CH                        |
| DC Offset        | ต้องมีการปรับค่า   | สามารถตัดออกเองได้                      |
| Notes            | เกิดการผลึกกำลังงานกลับสู่แหล่งจ่าย (Power supply pumping) | ไม่เกิดการผลึกกำลังงานกลับสู่แหล่งจ่าย  |
|                  | ต้องอาศัยการป้อนกลับ (Feedback)                            | เหมาะสำหรับการต่อแบบลูปเปิด (Open loop) |

### 2.3 สาเหตุหลักในการทำงานที่ไม่สมบูรณ์แบบของคลาสดี

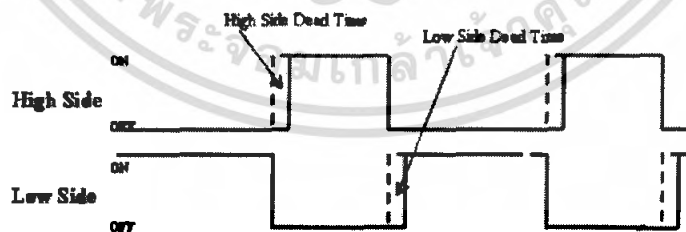
แม้ว่าการขยายกำลังคลาสดีจะมีประสิทธิภาพถึง 100 เปอร์เซ็นต์ตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามการขยายกำลังแบบคลาสดีที่เป็นวงจรใช้งานจริง จะเกิดความไม่สมบูรณ์แบบในการทำงานดังนี้

1. ปัญหาจากส่วนมอดูเลเตอร์ ความไม่สมบูรณ์แบบที่เกิดขึ้นในหัวข้อนี้จะได้แก่สัญญาณรบกวนซึ่งจะเกิดขึ้นเสมอในการมอดูเลตแบบพัลส์ และสัญญาณรบกวนนี้อาจถูกขยายกำลังออกมารวมอยู่กับสัญญาณเอาต์พุต และความไม่สมบูรณ์แบบอีกอย่างหนึ่งในหัวข้อนี้เกิดจากการ โอเวอร์มอดูเลต เนื่องจากป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะมอดูเลตได้ถูกต้อง ซึ่งจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดความผิดเพี้ยน

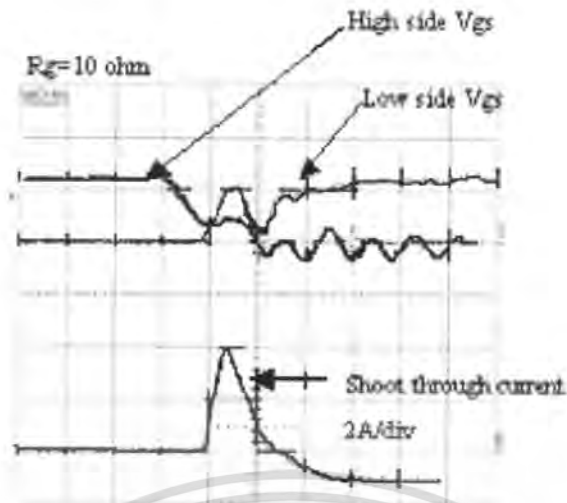
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปัญหาจากวงจรขับขาเกทของทรานซิสเตอร์ เกิดขึ้นเนื่องจากวงจรลอจิกทางดิจิทัลที่เป็นส่วนประกอบภายในวงจรขับขาเกทเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สองช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณหนึ่งมีเฟสตรงกับสัญญาณพัลส์อินพุต (In-phase) และอีกช่องหนึ่งกลับเฟสกัน (Out-phase)  $180^\circ$  กับสัญญาณพัลส์อินพุต เพื่อป้องกันส่วนวงจรขับขาเกทของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจึงมีการหน่วงเวลาเพิ่มขึ้นจากการทำงานของวงจรลอจิกดิจิทัล อีกทั้งวงจรส่วนนี้ยังมีหน้าที่ในการสร้างช่วงเวลาที่ไม่เหลื่อมกันของขอบขาขึ้นและขอบขาลง ของสัญญาณพัลส์ที่จะขับทรานซิสเตอร์ทั้งสองเพื่อเป็นช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time)

- **ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time)** เป็นเวลาที่เพิ่มเข้าไปในสัญญาณขับทรานซิสเตอร์สองสัญญาณที่กลับเฟสกัน  $180^\circ$  เพื่อให้ขอบขาขึ้นและขอบขาลงเหลื่อมกันเล็กน้อยดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากสัญญาณที่กลับเฟสกันนี้ จะนำไปขับทรานซิสเตอร์เฟดสองตัวที่ต่อโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งในการใช้งานจริง ทรานซิสเตอร์ทั้งสองไม่ได้ทำงานเป็นอุดมคติ ในขณะที่สลับโหมคการทำงานจึงไม่ได้เป็นไปโดยทันที แต่จะมีช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์ใช้เปลี่ยนโหมคด้วย ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นถ้าไม่มีช่วงเวลาเดดไทม์ ขณะที่ทำการสลับโหมคจะมีช่วงเวลาที่ออฟพันที่ จึงยังคงนำกระแสอยู่ ทำให้มีช่วงเวลาหนึ่งที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำกระแสพร้อมกัน กระแสจึงไหลจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านบวก สู่อุปกรณ์โหลด แล้วกลับสู่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านล่าง ทำให้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเกิดการลัดวงจร และเรียกกระแสที่ไหลตรงจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านบน สู่อุปกรณ์โหลดนี้ว่า กระแสชูททรู (Shoot through current) แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงาน ประสิทธิภาพจึงลดลง และถ้ากระแสชูททรูมีค่ามาก จะทำให้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเกิดความเสียหายได้ จึงต้องเพิ่มช่วงเวลาให้ขอบขาขึ้นและขอบขาลงของพัลส์ให้เหลื่อมกันเล็กน้อย เรียกว่า ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ดังรูปที่ 2.10 เพื่อเป็นช่วงเวลาให้ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งเปลี่ยนเข้าสู่โหมคออฟจริงๆ ก่อนที่จะให้ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งเป็นโหมคออน แต่ช่วงเวลาเดดไทม์ที่เพิ่มเข้าไปก็ทำให้ความกว้างพัลส์เกิดความเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของสัญญาณเอาต์พุต โดยถ้ามีช่วงเวลาเดดไทม์มากความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกก็จะมากด้วย ดังนั้นการเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์จึงต้องดูความเหมาะสมด้วย



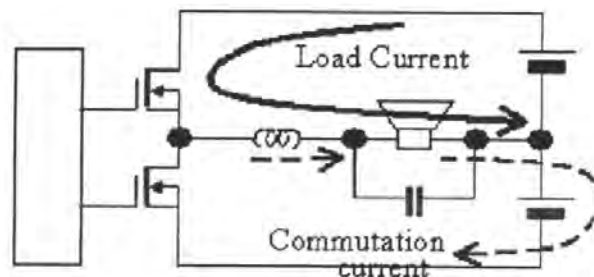
รูปที่ 2.10 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ที่เพิ่มตรงขอบขาของพัลส์



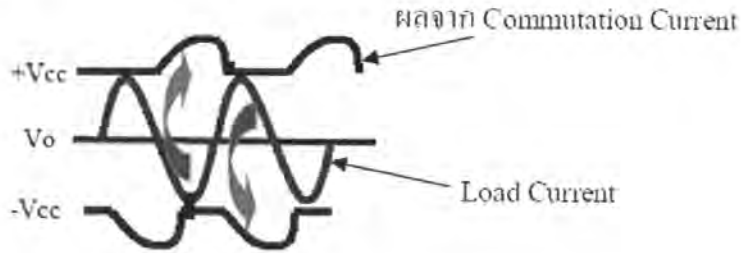
รูปที่ 2.11 ผลจากการทำงานไม่เป็นตามอุดมคติของทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดกระแสชูททรู

3. ปัญหาจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง เนื่องจากเกณฑ์การขยายของวงจรถ่ายกำลังคลาสิคขึ้นอยู่กับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงโดยตรง ดังนั้นถ้าแหล่งจ่ายมีแรงดันไม่คงที่ข้อมทำให้สัญญาณเอาต์พุตผิดเพี้ยน และเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจาก

- การผลักกำลังงานกลับคืนแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (Power supply pumping) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเกิดความผันผวน จะเกิดขึ้นเมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ เนื่องจากในขณะที่กระแสไหลกลับทิศทาง ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor : L) ที่ต่อในส่วนวงจรองความถี่ต่ำผ่าน จะปล่อยพลังงานที่ได้สะสมไว้ ออกเป็นกระแส ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านตัวมันในช่วงเวลาที่ผ่านไป (Commutation current) ซึ่งจะมีทิศทางเดียวกับกระแสที่จ่ายให้กับโหลด (Load current) ในขณะนั้น จึงรวมกันไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงอีกแหล่งหนึ่ง แล้วผ่านบอดี้ไดโอดของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานโหมคอปเฟียนกัน ไปดังรูปที่ 2.12 และเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงไม่สามารถดูดซับกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำจ่ายกลับมาได้ แรงดันผลลัพธ์ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจึงเกิดความผันผวน (Fluctuation) ดังรูปที่ 2.13 และความผันผวนของแรงดันจะเกิดขึ้นรุนแรงขณะที่ความถี่สัญญาณเอาต์พุตมีค่าต่ำ เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำจะเก็บสะสมพลังงานที่จะป้อนกลับไว้มากขึ้น และสามารถลดผลกระทบนี้ได้ถ้าให้ค่าตัวเก็บประจุที่วางคร่อมแรงดันไฟเลี้ยงมีค่ามากพอที่จะดูดซับกระแสส่วนเกินนี้

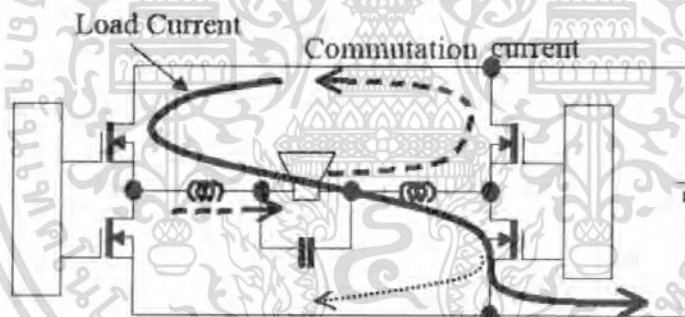


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.12 การไหลของกระแสเมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ความผันผวนของแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง เมื่อเกิดการผลัดกำลังงานกลับคืนแหล่งจ่าย

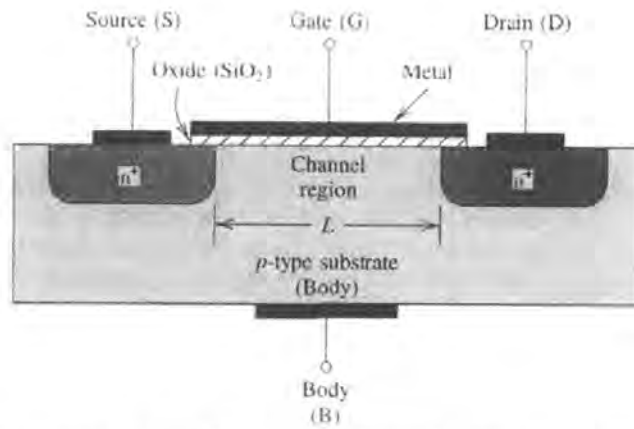
แต่เมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฟูลบริดจ์ จะไม่เกิดการผลัดกำลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่าย เนื่องจากกระแสสะสมในขดลวดเหนี่ยวนำ (Commutation current) ที่ป้อนกลับออกมาเป็นกระแสส่วนเกินนี้สามารถมีทางไหลระบายวนกลับไปสู่โหลดได้ ดังเช่นรูปที่ 2.14 กระแสจากการสะสมของขดลวดเหนี่ยวนำจะไหลผ่านบอดีไดโอดของทรานซิสเตอร์ที่เป็น โหมดออฟ หรือผ่านทรานซิสเตอร์ที่เป็น โหมดออนของกลุ่มทรานซิสเตอร์ด้านขวาจนกลับไปสู่โหลด จึงไม่มีกระแสจากขดลวดเหนี่ยวนำไหลย้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ แรงดันไฟเลี้ยงจึงไม่เกิดความผันผวนเหมือนการต่อแบบฮาล์ฟบริดจ์



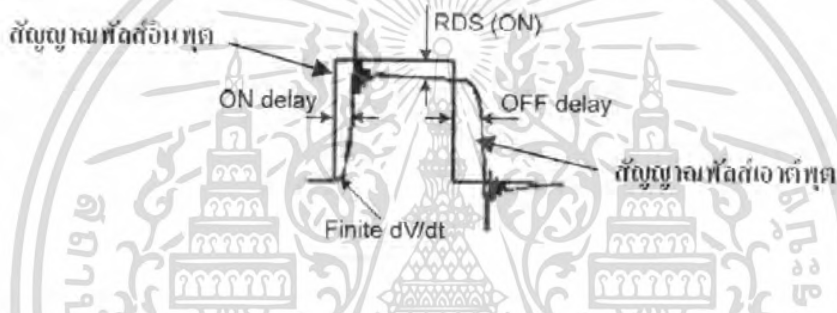
รูปที่ 2.14 การไหลของกระแสเมื่อต่อทรานซิสเตอร์แบบฟูลบริดจ์

4. ปัญหาจากทรานซิสเตอร์ เป็นปัญหาหลักที่สำคัญมากของวงจรรขยายกำลังแบบคลาสซี รวมถึงการขยายกำลังแบบสวิตชิงคลาสอื่นๆด้วย เพราะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การขยายกำลังแบบสวิตชิงในช่วงแรกที่มีการคิดค้นทฤษฎียังไม่นิยมนำมาใช้งานจริง เนื่องจากเทคโนโลยีของทรานซิสเตอร์ขยายกำลังที่เหมาะสมกับการสวิตชิงยังไม่ก้าวหน้าเพียงพอ จนเมื่อมีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ขยายกำลังแบบมอสเฟตที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น การขยายกำลังแบบสวิตชิงจึงได้รับความนิยมอย่างสูง (ส่วนประกอบภายในทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟตแสดงได้ดังรูปที่ 2.15) และความไม่สมบูรณ์แบบของทรานซิสเตอร์นี้ จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลัง หรือกล่าวได้ว่า “ประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลังขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรของทรานซิสเตอร์” และตัวแปรที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์แบบ จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนไปจากพัลส์อินพุต ดังรูป 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่ข้อมูลต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



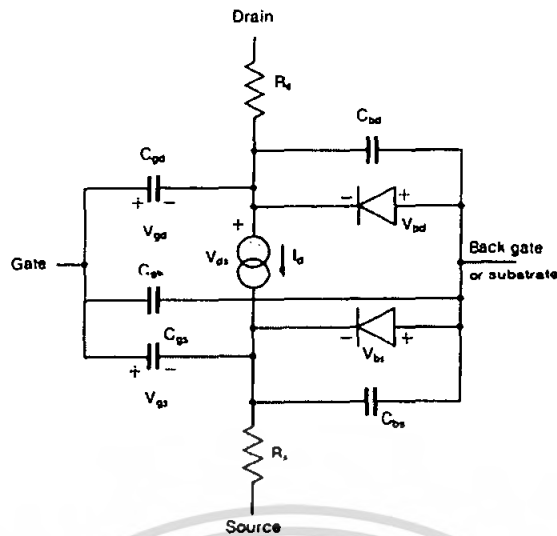
รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์มอสเฟตแบบปลดพาหะ ชนิดเอ็น (n-channel depletion-type MOSFET)



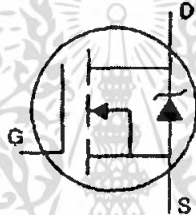
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบสัญญาณพัลส์อินพุตกับสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจากวงจรขยายกำลัง

- แบบจำลองของทรานซิสเตอร์มอสเฟต โครงสร้างของมอสเฟตในรูปที่ 2.15 เมื่อยังไม่ได้ต่อขาซบสเตรท หรือ โครงสร้างของอุปกรณ์ (Body: B) จะมีวงจรจำลองของเอ็นมอสดังรูปที่ 2.17 โดยที่รอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ระหว่างขาต่างๆ จะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุ และถ่วงกันระหว่างสารเจือพีกับสารเจือเอ็น จะทำให้เสมือนว่ามีไดโอดสองตัว ตัวแรกอยู่ตรงรอยต่อพีเอ็นระหว่างซบสเตรทกับขาเดรน และตัวที่สองอยู่ระหว่างซบสเตรทกับขาซอร์ท เรียกว่า บอดี้ไดโอด (Body diode) ซึ่งเมื่อนำมอสเฟตไปใช้งานมักต่อซบสเตรทกับขาซอร์ท ทำให้เหลือบอดี้ไดโอดระหว่างขาเดรนกับซบสเตรทเพียงตัวเดียว ดังสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แบบเอ็นชาแนลมอสเฟตในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างของเอ็นชาแนลโมสเฟต



รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์มอสเฟตแบบปลดพาหะชนิดเอ็น

ความไม่สมบูรณ์แบบในการขยายกำลังพัลส์ จะทำให้เกิดความผิดพลาดและสัญญาณรบกวนในสัญญาณเอาต์พุต โดยตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ขยายกำลังมีดังนี้

- ค่าอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์สูงสุด (Maximum junction temperature :  $T_{J(max)}$ ) เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น ซึ่งพลังงานที่สูญเสียทั้งหมดจะกลายเป็นความร้อน และอุณหภูมิภายในตัวถังของทรานซิสเตอร์ ( $T_J$ ) จะคำนวณได้ดังนี้

$$T_J = T_A + p_D \theta_{JA} \tag{2.10}$$

- เมื่อ  $T_J$  คืออุณหภูมิภายในตัวถังของทรานซิสเตอร์
- $T_A$  คืออุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม
- $\theta_{JA}$  คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างอุปกรณ์และสภาพแวดล้อม

ซึ่งค่า  $T_J$  จะมีผลต่อตัวแปรของทรานซิสเตอร์ที่แปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นการทำให้อุณหภูมิของทรานซิสเตอร์คงที่จึงทำให้คุณสมบัติของวงจรขยายกำลังคงที่ และทรานซิสเตอร์จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ ( $T_{J(max)}$ ) ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดของทรานซิสเตอร์ก่อนจะสูญเสียสภาพการทำงานอย่างถาวร (เผาไหม้) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือละลาย) ซึ่ง  $T_{J(max)}$  นี้แม้จะไม่ได้เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อคุณภาพหรือประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลัง แต่จะมีความสำคัญอย่างมากในการกำหนดขนาดของแผ่นระบายความร้อน (Heatsink) เนื่องจากถ้าทรานซิสเตอร์มีค่า  $T_{J(max)}$  มากหมายความว่าทรานซิสเตอร์สามารถรองรับความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานได้มาก จึงออกแบบแผ่นระบายความร้อนให้เล็กลงได้ ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดและราคาโดยรวมของวงจรรขยายกำลังมีค่าลดลง

- ค่าความต้านทานขาเดรน - ขาซอร์ทขณะทำงานโหมดออน (Static drain-to-source on-resistance :  $R_{DS(ON)}$ )

ในทางปฏิบัติขณะที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจากขาเดรนไปขาซอร์ท (ทำงาน โหมดอินตัวหรือ โหมดออน (ON)) จะมีค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์ทอยู่ค่าหนึ่ง เรียกว่าเป็นค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ทขณะทำงานโหมดออน (Static drain-to-source on-resistance :  $R_{DS(ON)}$ ) ซึ่งค่านี้จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในตัวถังของทรานซิสเตอร์ ( $T_J$ ) ซึ่งโดยปกติจะระบุค่าไว้ในคู่มือการใช้อุปกรณ์ (Datasheet) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ  $T_J = 25^\circ C$  และค่า  $R_{DS(ON)}$  นี้จะมีผลโดยตรงต่อกำลังที่สูญเสียขณะทรานซิสเตอร์นำกระแส ( $P_{CONDUCTION}$ ) โดยคำนวณได้จากสมการ (2.11)

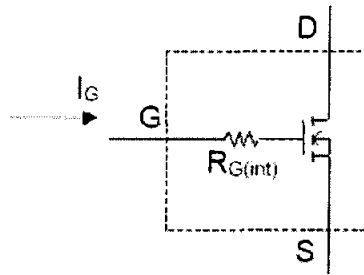
$$P_{CONDUCTION} = (I_{D(RMS)})^2 \times R_{DS(ON)} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $I_{D(RMS)}$  คือค่ากระแสเฉลี่ยที่ขาเดรน (แอมป์)

ค่า  $R_{DS(ON)}$  จะมีผลทำให้รูปสัญญาณเปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.16 และถ้า  $R_{DS(ON)}$  มีค่าน้อย กำลังที่สูญเสียขณะทรานซิสเตอร์นำกระแสก็จะน้อย ประสิทธิภาพโดยรวมก็จะสูงขึ้น

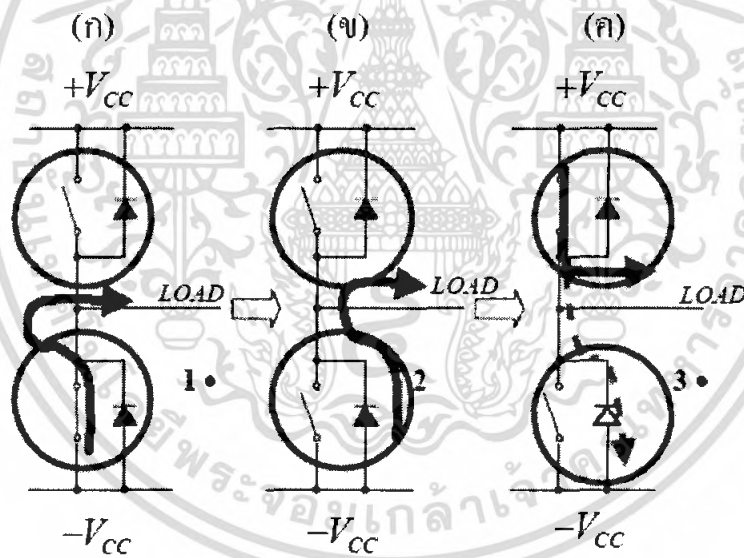
- ค่าประจุที่ต้องใช้ชาร์จขาเกต (Gate charge :  $Q_g$ ) เนื่องจากก่อนที่ทรานซิสเตอร์จะทำงานโหมดออน (Mode on หรือ Saturate mode) จะต้องใช้เวลาดำเนินการป้อนแรงดันที่มากกว่าแรงดันขีดเปลี่ยน (Threshold voltage) ที่ขาเกตเพื่อเหนี่ยวนำประจุพาหะส่วนน้อย (Minority carrier) ให้ขึ้นมารวมกันเป็นช่องนำกระแส (Channel) เพื่อให้กระแสไหลผ่านจากขาเดรนสู่ขาซอร์ทอย่างเต็มที่ โดยค่าประจุที่ขาเกตที่ใช้เพื่อเหนี่ยวนำประจุพาหะส่วนน้อยดังกล่าวจะเรียกว่า  $Q_g$  เป็นค่าที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ และเป็นค่าที่ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วในการทำงานของทรานซิสเตอร์ กล่าวคือ ถ้าทรานซิสเตอร์มีค่า  $Q_g$  น้อยหมายความว่าทรานซิสเตอร์นั้นต้องการประจุจำนวนน้อยในการชาร์จขาเกตเพื่อทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานโหมดออน ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงเข้าสู่โหมดออนได้เร็ว

- ค่าความต้านทานภายในทรานซิสเตอร์ที่ขาเกต (Internal gate resistance :  $R_{G(int)}$ ) เป็นตัวแปรที่แปรผันตามอุณหภูมิ และมีตำแหน่งที่ขาเกตดังรูปที่ 2.19 และตัวแปรนี้จะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสลับระหว่างโหมดออนและโหมดออฟของทรานซิสเตอร์ โดยถ้า  $R_{G(int)}$  มีค่ามาก จะทำให้กระแส  $I_G$  มีค่าลดลง จึงเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนโหมดการทำงาน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียขณะทำการสวิตซ์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.19 ตำแหน่งของ  $R_{G(int)}$  ภายในทรานซิสเตอร์

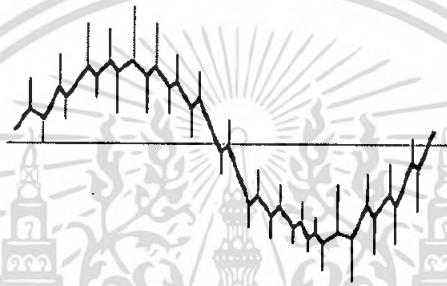
- การรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic interference: EMI) เป็นปัญหาสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการออกแบบวงจรขยายกำลังคลาสดีเช่นเดียวกับการขยายแบบสวิตชิ่งคลาสอื่นๆ ซึ่งมีสาเหตุมาจากประจุที่ไหลย้อนกลับเพื่อกลับคืนสภาพเดิม (Reverse recovery charge) ของบอดี้ไดโอดภายในทรานซิสเตอร์มอสเฟต โดยจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านบวกตรงสู่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านลบเหมือนกับกระแสชูทรู และมีขั้นตอนการเกิด EMI ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ผลกระทบจากประจุที่ไหลย้อนกลับเพื่อกลับคืนสภาพเดิม (Reverse recovery charge) ของบอดี้ไดโอดภายในทรานซิสเตอร์มอสเฟต

ขั้นตอนการเกิดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในจังหวะที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวสลับโหมดการทำงาน โดยเกิดขึ้นขณะทรานซิสเตอร์ทั้งสองสลับโหมดการทำงานดังรูปที่ 2.20 ภาพ (ก) คือการทำงานขณะทรานซิสเตอร์ด้านบนเป็นโหมดออฟ ทรานซิสเตอร์ด้านล่างเป็นโหมดออน จะมีกระแสจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านลบ ( $-V_{CC}$ ) ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ด้านล่างสู่โหลด ภาพ (ข) คือการทำงานระหว่างช่วงแคดไทม์ คือทรานซิสเตอร์ด้านล่างอยู่โหมดออฟ และทรานซิสเตอร์ด้านบนก็ยังคงอยู่โหมดออฟก่อนที่จะเป็นโหมดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนต่อไป เพื่อป้องกันการเกิดกระแสชุก การทำงานช่วงนี้บอดีไดโอดระหว่างขาเดรนและซัพสเตรท จะยังคงทำงานโหมคออน นำกระแสจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงด้านลบสู่โหมคเช่นเดิม ภาพ (ค) คือการทำงานขณะทรานซิสเตอร์ตัวล่างทำงานโหมคออฟ และทรานซิสเตอร์ตัวบนเปลี่ยนเข้าสู่โหมคออน ช่วงเวลานี้บอดีไดโอดที่นำกระแสในช่วงเดดไทม์จะยังคงมีสถานะนำกระแสอยู่ เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อย (Minority carrier) ยังไม่ไหลย้อนกลับคืนสู่สถานะเดิม (Reverse recovery) กระแสจึงไหลผ่านได้ จนกว่าประจุพาหะส่วนน้อยจะกลับคืนสู่สถานะเดิมและมีบริเวณปลอดพาหะ กระแสจึงจะหยุดไหล กระแสจากปรากฏการณ์นี้จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นเคียวแหลมคมดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเหนี่ยวนำลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board : PCB) ให้กลายเป็นขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ต้องคำนึงถึงการลดผลของ EMI ด้วย



รูปที่ 2.21 ผลของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเกิดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

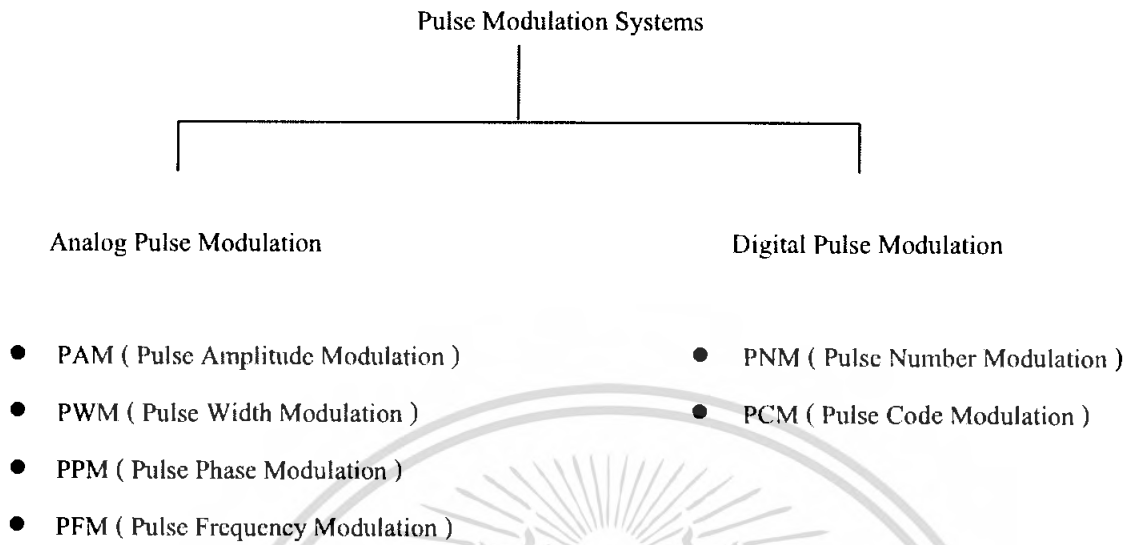
การสูญเสียกำลังงานที่เกิดจากการทำงานไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ เป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในการขยายกำลังแบบสวิตชิง โดยกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อขยายกำลังแบบสวิตชิงจะมีสองส่วน ส่วนแรกคือการสูญเสียกำลังขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานโหมคออนนำกระแสดังสมการ (2.11) และส่วนที่สองคือการสูญเสียกำลังขณะทรานซิสเตอร์เปลี่ยน โหมคการทำงาน และตัวแปรที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานไม่สมบูรณ์แบบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตทรานซิสเตอร์ขยายกำลังแบบสวิตชิงในขณะนั้น และสาเหตุของความไม่สมบูรณ์ดังกล่าว เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาในการสร้างวงจขยายกำลังเพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพ และเพื่อให้ได้คุณภาพเสียงสูงสุด

#### 2.4 การมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในระบบการสื่อสาร การส่งสัญญาณข่าวสารจำเป็นต้องอาศัยการย้ายย่านความถี่ของสัญญาณข่าวสาร  $m(t)$  โดยใช้คลื่นพาหะ (Carrier) เป็นตัวช่วย ซึ่งเรียกว่าการมอดูเลต (Modulation) เพื่อที่จะให้เกิดความเหมาะสมในการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าย่านความถี่ของสัญญาณข่าวสารเดิมนั้นมีความเหมาะสมในการที่จะผ่านตัวกลางได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องใช้การมอดูเลต

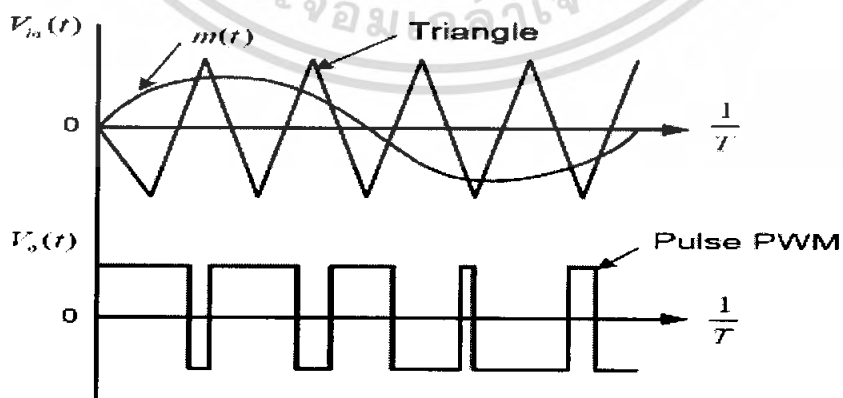
รูปแบบในการมอดูเลตนั้นมีมากมาย ทั้งการมอดูเลตเชิงขนาด (AM), การมอดูเลตเชิงความถี่ (FM) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังมีการมอดูเลตอีกแบบหนึ่ง คือ การมอดูเลตพัลส์ (Pulse Modulation) ซึ่งสามารถแบ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกเป็น 2 ระบบกว้างๆ คือ ระบบ Analog Pulse Modulation และ ระบบ Digital Pulse Modulation ซึ่งแต่ละระบบแบ่งออกได้ดังนี้



ปัจจุบันระบบการมอดูเลตพัลส์เป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากการส่งสัญญาณที่เป็นพัลส์ หรือ ดิจิตอล มีความต้านทานสัญญาณรบกวนสูง เพราะสัญญาณที่ส่งมีเพียงข้อมูล 0 กับ 1 เท่านั้น ทำให้การส่งข้อมูลข่าวสารมีความถูกต้องแม่นยำสูง

โดยในที่นี้เราจะสนใจเฉพาะการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งจะใช้ค่าขนาดของตัวอย่างสัญญาณไปทำให้ความกว้างของพัลส์แต่ละพัลส์เปลี่ยนแปลง โดยค่าแอมพลิจูดของแต่ละพัลส์จะมีค่าคงที่ และความกว้างของพัลส์นั้น จะแปรผันตามแอมพลิจูดของสัญญาณข่าวสาร ถ้าสัญญาณข่าวสารมีแอมพลิจูดมาก ความกว้างของพัลส์ก็จะกว้าง ถ้าสัญญาณข่าวสารมีแอมพลิจูดต่ำความกว้างของพัลส์ก็จะแคบเป็นอัตราส่วนแบบเชิงเส้น และความถี่ของสัญญาณ การมอดูเลตความกว้างพัลส์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณพินเลี้ยงที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. *Symmetrical PWM* คือ ความกว้างของพัลส์จะแปรผันตามขนาดของสัญญาณขาเข้าสารเมื่อสัญญาณขาเข้าสารอยู่ที่ศูนย์ ความกว้างของพัลส์จะอยู่ที่ค่าอ้างอิง และเมื่อสัญญาณขาเข้าสารเป็นบวกเพิ่มขึ้น ความกว้างของพัลส์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อสัญญาณขาเข้าสารเป็นลบ ความกว้างของพัลส์ก็จะลดลงด้วย สิ่งที่สำคัญคือ ความกว้างระหว่างจุดกึ่งกลางของพัลส์จะมีค่าสมมาตรกัน แม้ว่าความกว้างของแต่ละพัลส์จะไม่เท่ากัน

2. *Leading – edge PWM* คือ ขอบขาลงของพัลส์แต่ละลูกจะแปรผันตามขนาดของสัญญาณขาเข้าสาร โดยที่ระยะห่างระหว่างขอบขาลงแต่ละพัลส์จะมีค่าคงที่

3. *Trailing – edge PWM* คือ ขอบขาขึ้นของพัลส์แต่ละลูกจะแปรผันตามขนาดของสัญญาณขาเข้าสาร โดยที่ระยะห่างระหว่างขอบขาขึ้นแต่ละพัลส์จะมีค่าคงที่

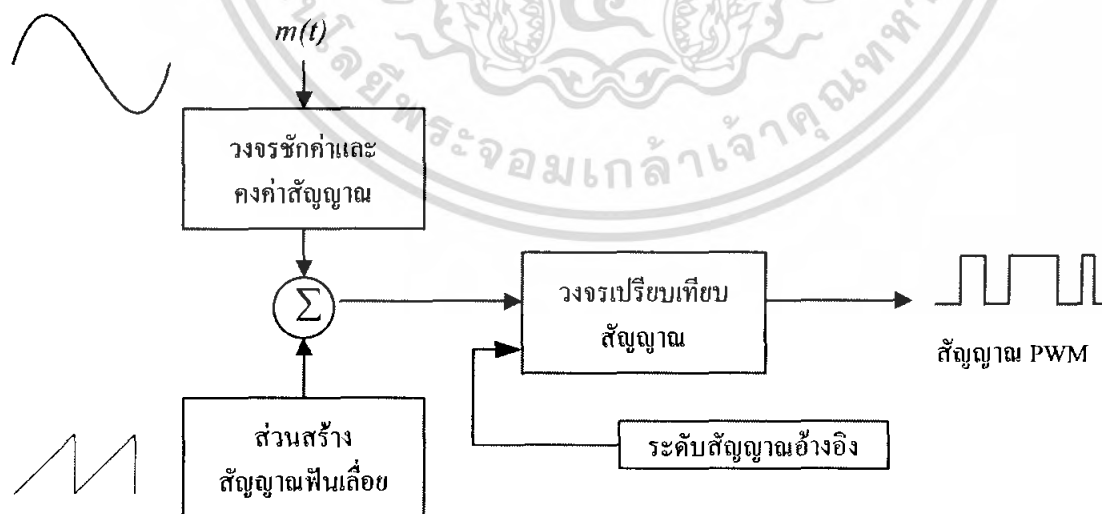
#### 2.4.1 หลักการของการมอดูเลตสัญญาณแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์

การมอดูเลตสัญญาณแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

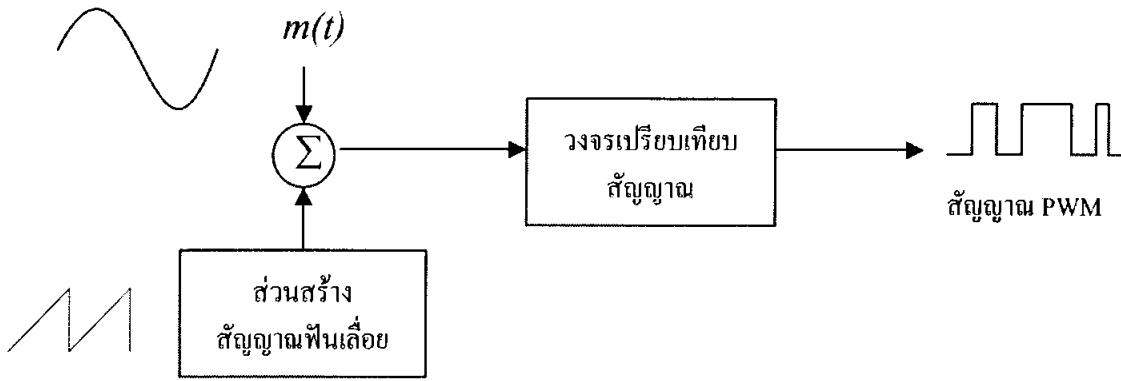
1. การนำสัญญาณขาเข้าสารเข้าวงจรซิกค่าและคงค่าระดับสัญญาณ (Sampling and Hold) ทำให้ถูกซิกค่าด้วยความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ  $2 f_m$  ครั้งต่อวินาที โดย  $f_m$  คือ ค่าความถี่สูงสุดขององค์ประกอบสัญญาณขาเข้าสาร จากนั้นจึงนำมาเข้าวงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) กับสัญญาณรูปฟันเลื่อย (Sawtooth Signal) แล้วนำไปเข้าวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) แล้วจะได้สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ดังรูปที่ 2.23

2. การนำสัญญาณขาเข้าสารและสัญญาณรูปฟันเลื่อย มาเข้าวงจรรวมสัญญาณ จากนั้นจึงนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ แล้วจะได้สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ดังรูปที่ 2.24

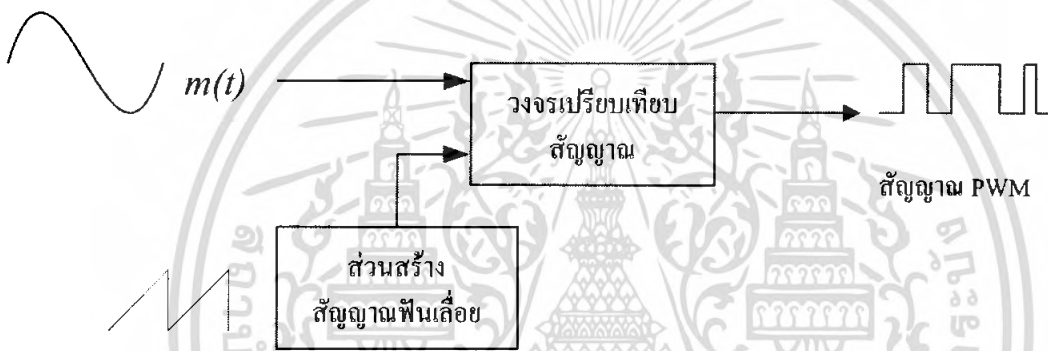
3. การนำสัญญาณขาเข้าสารและสัญญาณรูปฟันเลื่อย มาเข้าวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ แล้วจะได้สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 1



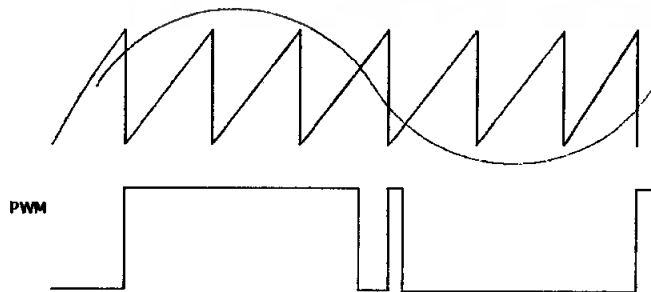
รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 2



รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมแสดงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แบบที่ 3

**2.4.2 การอิมิตัวของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์**

สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์จะเกิดการอิมิตัวเมื่อสัญญาณของข้อมูลข่าวสารมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณอ้างอิงที่เป็นสัญญาณฟันเลื่อย สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้จะมีความกว้างของพัลส์มาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ความกว้างของพัลส์แต่ละลูกในสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์จะมีขนาดไม่เกินค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อย



รูปที่ 2.26 การอิมิตัวของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอิมพัลส์ของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ทำให้ข้อมูลข่าวสารที่ฝากไปกับสัญญาณ การมอดูเลตความกว้างพัลส์มีการผิดเพี้ยนเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อทำการกู้สัญญาณข่าวสารกลับคืนมาแล้วจะทำให้ได้สัญญาณเดิมกลับมาไม่ครบ ดังนั้นเมื่อจะมอดูเลตสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ควรคำนึงถึงการอิมพัลส์ของสัญญาณด้วย

### 2.4.3 การสร้างรูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์

รูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์ สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่

- การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์

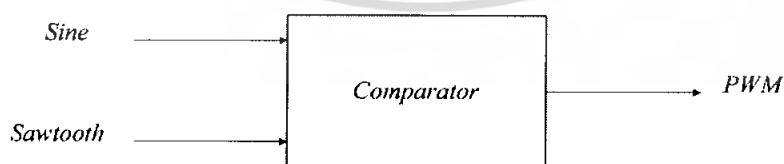
สามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมให้ไมโครโปรเซสเซอร์ ส่งสัญญาณซึ่งสอดคล้องกับมุมสวิทช์ ซึ่งผ่านทางพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ซึ่งวิธีนี้ต้องมีการคำนวณหรือกำหนดค่ามุมสวิทช์ต่างๆ ออกมาเสียก่อน แล้วจึงเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำ ไมโครโปรเซสเซอร์จะอาศัยข้อมูลในหน่วยความจำนั้นเพื่อสร้างรูปแบบ (Pattern) สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ขึ้นมา แล้วจึงส่งผ่านพอร์ตเอาต์พุตออกมา

- การใช้วงจรถืออิเล็กทรอนิกส์

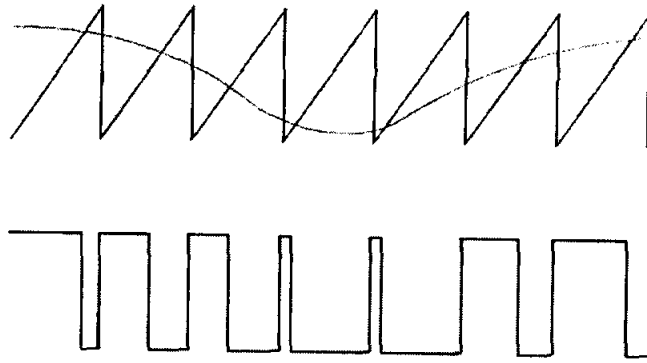
การสร้างรูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์จากวงจรถืออิเล็กทรอนิกส์นี้ วิธีที่สะดวกที่สุดคือการใช้วงจรถือเปรียบเทียบ (Comparator) ซึ่งสามารถทำได้โดยป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณเข้าสู่วงจรถือเปรียบเทียบ คือ สัญญาณอินพุต (Input signal) กับสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) ในโครงการนี้จะใช้วิธีเปรียบเทียบโดยใช่วงจรถืออิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างสัญญาณ วิธีนี้มุมสวิทช์ของรูปคลื่นการมอดูเลตความกว้างพัลส์คือจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง และสร้างโดยอาศัยวงจรถือเปรียบเทียบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแซมปลิง

ในการสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบเนเทอร์อลแซมปลิงนั้น เราจะให้สัญญาณฟันเลื่อยเป็นสัญญาณอ้างอิง นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณข่าวสารซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ (Sine wave) โดยช่วงที่สัญญาณไซน์มีขนาดสูงกว่าสัญญาณฟันเลื่อย เอาต์พุตของวงจรถือเปรียบเทียบจะเป็น "High" และช่วงที่สัญญาณไซน์มีขนาดต่ำกว่าสัญญาณฟันเลื่อย เอาต์พุตของวงจรถือเปรียบเทียบจะเป็น "Low" ดังรูปที่ 2.27 และ 2.28 ตามลำดับ



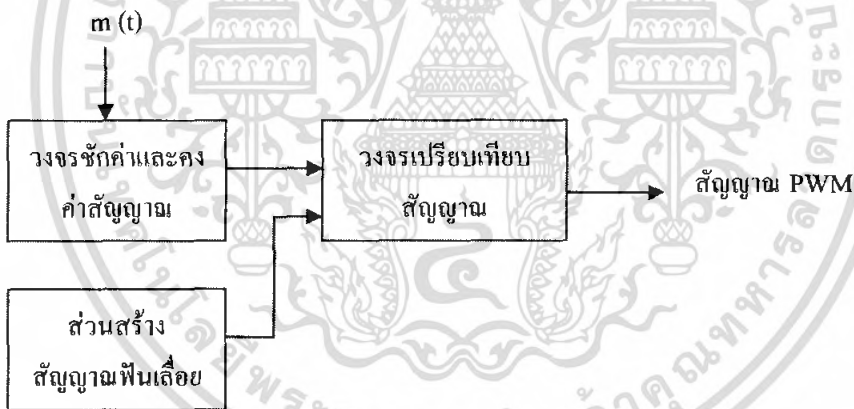
รูปที่ 2.27 วงจรถือเปรียบเทียบอย่างง่าย



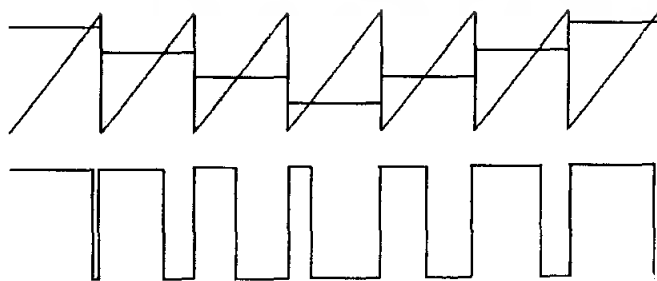
รูปที่ 2.28 การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแชนเปลิ่ง

2. การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง

การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง เป็นการดัดแปลงมาจากแบบเนเทอร์อล เนื่องจากเปรียบเทียบแบบเนเทอร์อลนั้น ในการเปรียบเทียบสัญญาณแต่ละครั้ง ส่วนของสัญญาณไซน์มีค่าไม่เป็นเชิงเส้น การเปรียบเทียบแบบเรกูลาร์จะนำสัญญาณไซน์มาผ่านวงจรชั้ค่าและคงค่าระดับสัญญาณที่มีค่าความถี่ของการคงค่าเท่ากับความถี่ของคลื่นฟันเลื่อย จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบแต่ละช่วงจะเป็นเชิงเส้น (ดูรูปที่ 2.29 และ 2.30)



รูปที่ 2.29 บล็อกไดอะแกรมการสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง

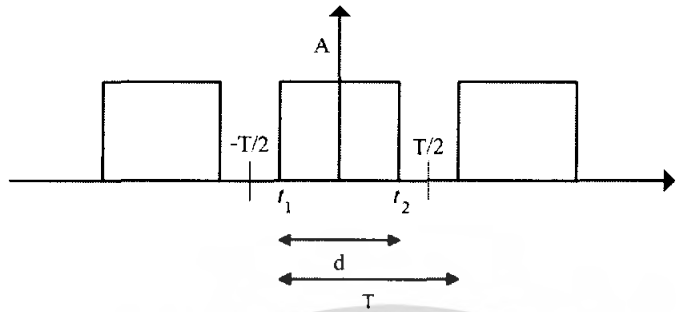


รูปที่ 2.30 การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเปลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 สมการของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

สมการของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์นั้นสามารถพิสูจน์ในทางคณิตศาสตร์ได้โดยจะเริ่มจากการวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์ ของขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างช่วง High เป็น  $d$  ขนาด  $A$  ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 รูปขบวนสัญญาณพัลส์

จากรูปที่ 2.31 เราสามารถแสดงอนุกรมฟูรีเยร์เชิงตรีโกณมิติได้ดังนี้

โดย  $a_0$  หาได้จาก

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (2.12)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-d/2}^{d/2} A dt \quad (2.13)$$

$$a_0 = \frac{Ad}{T} \quad (2.14)$$

หาค่า  $a_n$  ได้จาก

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.15)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-d/2}^{d/2} A \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.16)$$

$$a_n = \frac{2A}{n\omega_0 T} \left[ \sin\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) - \sin\left(-n\omega_0 \frac{d}{2}\right) \right] \quad (2.17)$$

$$a_n = \frac{2A}{n\omega_0 T} \left[ \sin\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) + \sin\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) \right] \quad (2.18)$$

$$a_n = \frac{2A}{n\pi} \left[ \sin\left(n\pi \frac{d}{2}\right) \right] \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (2.19)$$

จะหาค่า  $b_n$  ได้จาก

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-d/2}^{d/2} A \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.21)$$

$$b_n = -\frac{2A}{n\omega_0 T} \left[ \cos\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) - \cos\left(-n\omega_0 \frac{d}{2}\right) \right] \quad (2.22)$$

$$b_n = -\frac{2A}{n\omega_0 T} \left[ \cos\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) - \cos\left(n\omega_0 \frac{d}{2}\right) \right] \quad (2.23)$$

$$b_n = 0 \quad n=0,1,2,\dots \quad (2.24)$$

ดังนั้นเราจะได้อนุกรมฟูรีเยร์เชิงตรีโกณ คือ

$$f(t) = a_0 + a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2.25)$$

$$f(t) = \frac{Ad}{T} + \sum_n \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi d}{T}\right) \cos(n\omega_0 t) \quad (2.26)$$

เมื่อให้  $f(t) = e_{pulse}(t)$  ;

$$e_{pulse}(t) = \frac{Ad}{T} + \sum_n \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi d}{T}\right) \cos(n\omega_0 t) \quad (2.27)$$

สำหรับสัญญาณ PWM ความกว้างในแต่ละพัลส์จะเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เป็นสัดส่วนกับสัญญาณข่าวสาร โดยให้ค่าคงที่  $k_d$  (หน่วย second/volt) แสดงอัตราส่วนความสัมพันธ์

$$d(t) = d + k_d e_m \quad (2.28)$$

ซึ่ง  $e_m$  คือสัญญาณข่าวสาร

เมื่อแทน  $d(t)$  ในสมการ (2.28) ลงในตัวแปร  $d$  ทุกตัวในสมการ (2.27) จะได้ว่า

$$e_{out}(t) = \frac{Ad}{T} + \frac{Ak_d e_m}{T} + \sum_n \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi d}{T} + \frac{n\pi k_d e_m}{T}\right) \cos(n\omega_0 t) \quad (2.29)$$

และถ้าสมมุติให้สัญญาณข่าวสารเป็นสัญญาณที่มีค่าความถี่เดียว กล่าวคือ

$$e_m = E_m \cos(\omega_m t) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้สัญญาณ PWM ก็คือ

$$e_{out}(t) = \frac{Ad}{T} + \left[ \frac{Ak_d E_m}{T} \right] \cos(\omega_m t) + \sum_n \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi d}{T} + \frac{n\pi k_d E_m}{T} \cos(\omega_m t)\right) \cos(n\omega_0 t) \tag{2.31}$$

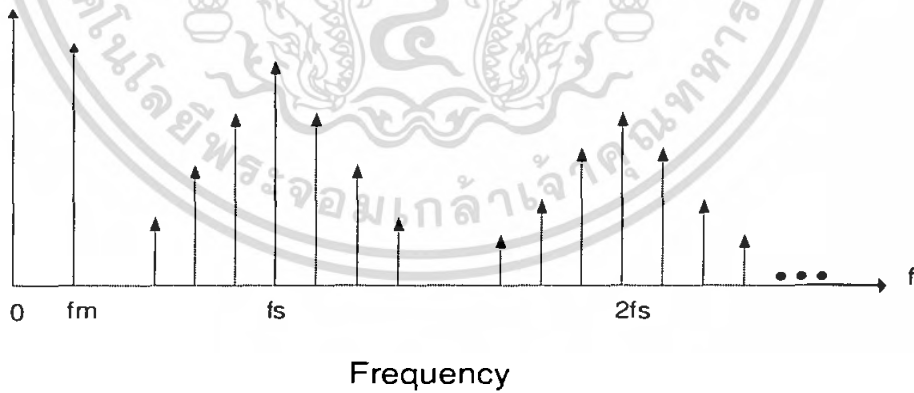
และจากความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติ

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B \tag{2.32}$$

สมการที่ (2.31) สามารถถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$e_{out}(t) = \frac{Ad}{T} + \left[ \frac{Ak_d E_m}{T} \right] \cos(\omega_m t) + \sum_n \frac{2A}{n\pi} \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{n\pi d}{T}\right) \cos\left(\frac{n\pi k_d E_m}{T} \cos(\omega_m t)\right) \\ &+ \cos\left(\frac{n\pi d}{T}\right) \sin\left(\frac{n\pi k_d E_m}{T} \cos(\omega_m t)\right) \end{aligned} \right] \cos(n\omega_0 t) \tag{2.33}$$

จากองค์ประกอบฟูรีเยร์ที่แสดงในสมการที่ (2.33) จะเห็นได้ว่ามีส่วนของสัญญาณข่าวสารเดิมปนอยู่กับส่วนของสัญญาณความถี่สูงจากสัญญาณฟันเลื่อย และจากการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถแสดงเส้นสเปกตรัมของสัญญาณ PWM (Spectrum domain) ได้ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณ PWM

## 2.5 ระบบอีควอลไลเซอร์

อีควอลไลเซอร์ ( Equalizer ) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแต่งเสียงในย่านความถี่ต่างๆให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต้องการ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านความบันเทิงและในงานอุตสาหกรรม จากคุณสมบัติพิเศษของอีควอลไลเซอร์คือ จะสามารถชดเชยการสูญเสียพลังงานที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ และยังสามารถเพิ่มพลังงานในความถี่ที่เราต้องการได้

คำว่า อีควอลไลเซอร์ มาจากความหมายว่า การต้องการสร้างสัญญาณให้เท่ากับสัญญาณต้นแบบเดิม วัตถุประสงค์ที่เราใช้งานอีควอลไลเซอร์แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบแก้ไขสัญญาณให้ถูกต้อง และแบบเพิ่มคุณภาพการทำงาน

อีควอลไลเซอร์แบบแก้ไขสัญญาณ จะใช้ในระบบบันทึกเสียงในอุปกรณ์เสียงระบบดิจิตอล ตัวอย่างการใช้งานคือการใช้วงจรมีแอมป์ในเทปคาสเซตทั้งขณะบันทึกและขณะเล่นกลับ ขบวนการนี้ใช้มานานแล้ว ซึ่งจำเป็นต้องมีเพื่อชดเชยความถี่บางช่วงที่สูญเสียในขบวนการบันทึก

การใช้อีควอลไลเซอร์ในระบบเสียงภายในห้องอัดมีหน้าที่แก้ไขผลตอบสนองเชิงความถี่ให้ถูกต้อง นั่นคือใช้ในการแก้สภาพเสียงที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อให้สภาพแวดล้อมนั้นมีการตอบสนองต่อความถี่ต่างๆใกล้เคียงกับห้องอัด เพราะห้องอัดมีคุณสมบัติพิเศษคือ ผนังห้องจะบุด้วยวัสดุกันการสะท้อนของเสียงเพื่อให้ได้สภาพอ้างอิงที่แท้จริง โดยผลตอบสนองเชิงความถี่ในห้องอัดต่างๆไปจะเป็นปฏิริยาต่อกันกับตู้ลำโพง ตำแหน่งการวางลำโพง และรูปแบบสภาพทางเสียงภายในห้อง แต่ในสภาพแวดล้อมอื่นๆจะมีผลของเสียงสะท้อนมารบกวนด้วย เช่น อาจจะทำให้เกิดการ Beat ของบางความถี่ ทำให้ความถี่เสียงช่องนั้นเกิดดังมากกว่าปกติ ( คลื่นที่เกิดจากการสะท้อนมีเฟสที่เสริมกับคลื่นหลัก ) หรือบางความถี่จะเบาว่าปกติ ( คลื่นที่เกิดจากการสะท้อนมีเฟสหักล้างกับคลื่นหลัก ) เมื่อเกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นจึงต้องมีการนำเอาอีควอลไลเซอร์มาทำการปรับแต่งแก้สภาพแวดล้อมเพื่อให้ได้ใกล้เคียงกับสภาพอ้างอิง ถ้าความถี่ช่วงใดเกิดการเสริมกันก็จะต้องทำการลดขนาดของสัญญาณลง ในทางตรงกันข้ามกัน ถ้าความถี่ใดหักล้างกันก็จะต้องทำการเพิ่มขนาดของสัญญาณในช่วงความถี่นั้นเพื่อเป็นการชดเชย ในการใช้งานแบบนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นพลังเสียงและคุณภาพเสียงภายในห้องหรือเพื่อให้ได้ยินชัดเจน

อีควอลไลเซอร์เพื่อเพิ่มคุณภาพสัญญาณ อีควอลไลเซอร์แบบนี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในงานบันทึกดนตรี เพื่อใช้ในการเน้นหรือเสริมแต่งเสียงดนตรีบางชิ้นเป็นพิเศษ เช่น ในกรณีที่ต้องการบันทึกเสียงดนตรี 2 ชิ้นลงในแทร็คเดียวกันเราอาจใช้อีควอลไลเซอร์ก่อนการบันทึกเพื่อเน้นเสียงดนตรีหนึ่งๆให้ดูชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น เสียงกลอง เป็นต้น

### 2.5.1 ชนิดของอีควอไลเซอร์

โดยหลักการแล้วอีควอไลเซอร์ทุกชนิดล้วนทำงานในแบบเดียวกัน แต่จะประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ต่างๆจำนวนหนึ่งเพื่อตัดทอนหรือยกระดับสัญญาณช่วงความถี่หนึ่งในแถบสเปกตรัมเสียง อีควอไลเซอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายแบบ ได้แก่

#### 1. กราฟฟิเคออีควอไลเซอร์

เป็นอีควอไลเซอร์อีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีราคาถูกกว่าแบบอื่นๆ นิยมใช้กันในระบบเครื่องเสียงภายในบ้านทั่วไป ประกอบไปด้วยวงจรกรองความถี่ชุดหนึ่งเพื่อทำการลดทอนหรือเพิ่มขนาดสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ศูนย์กลาง ปริมาณการตัดหรือเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปุ่มควบคุมที่มาในรูปของสไลด์โพเทนชิโอเมเตอร์วางอยู่บนหน้าปัด

การแบ่งซอยย่อยแถบความถี่การควบคุมนั้นแล้วแต่ช่วงเท่าของความถี่ศูนย์กลาง เช่น 1/3 ออกเตป เป็นต้น ช่วงความถี่ต่างๆที่เรานิยมใช้จะมีมาตรฐานเป็นตัวกำหนด เราเรียกมาตรฐานนี้ว่า ISO ( International Standard Organization ) แสดงค่าดังตาราง 2.3

ในสมัยก่อนวงจรกราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ จะใช้หลอดเป็นตัวแทนย่าน แต่เนื่องจากตัวแทนย่านนั้นมีราคาแพงและทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ อีกทั้งการปรับเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงตามต้องการนั้นยากและมีโอกาสเกิดการรบกวนจากภายนอกได้ง่าย จึงทำให้ภายหลังไม่นิยมใช้กัน เราจึงใช้วงจรกิจเซอร์ ( Gyrator ) แทน เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุให้กลายเป็นตัวแทนย่าน ซึ่งหมายความว่าถ้าใส่วงจรกิจเซอร์นี้ลงไป เทียบเท่ากับใส่ตัวแทนย่านลงไปนั่นเอง

#### 2. พารามเมตริกอีควอไลเซอร์

ในวงจรอีควอไลเซอร์ชนิดนี้นอกจากจะมีการควบคุมช่วงตัดหรือช่วงเพิ่มระดับสัญญาณในวงจรกรองแต่ละชุดแล้ว อีควอไลเซอร์แบบนี้ยังมีปุ่มแยกเพื่อใช้ในการควบคุมสำหรับความถี่ศูนย์กลางของฟิลเตอร์ค่า Q และขนาดของแบนด์วิดท์ (Bandwidth) อย่างไรก็ตามปุ่มควบคุมเพิ่มลดของฟิลเตอร์เหล่านี้มักใช้ปุ่มปรับหมุนแทนปุ่มแบบสไลด์ อีควอไลเซอร์แบบนี้จึงมีการใช้งานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบกราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ และยังมีราคาแพงกว่าด้วย

#### 3. พารากราฟฟิเคออีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์แบบนี้เป็นลูกผสมระหว่างอีควอไลเซอร์แบบกราฟฟิเคอและแบบพารามเมตริก กล่าวคือเหมือนกับพารามเมตริกอีควอไลเซอร์ตรงที่มีปุ่มควบคุมแยกปรับค่าแบนด์วิดท์ ค่า Q และค่าความถี่ศูนย์กลางของฟิลเตอร์แต่ละชุด แต่จะใช้เพื่อปรับแบบสไลด์ในการควบคุมอัตราขยายของฟิลเตอร์แต่ละตัว ทำให้มีขอบเขตการใช้งานกว้างขวาง ในขณะที่เดียวกันจะมองเห็นช่วงการปรับแต่งความถี่ได้ง่ายจากหน้าปัดเครื่อง

#### 4. ดิจิตอลอีควอไลเซอร์

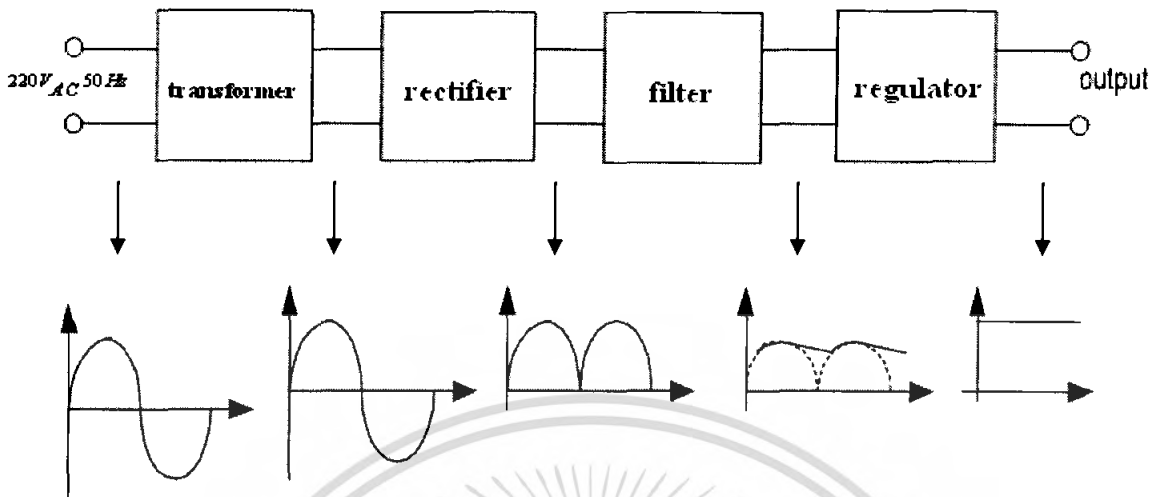
เป็นการใช้ CPU มาควบคุม ปกติจะมีอินพุตและเอาต์พุตให้ทั้งในแบบดิจิตอลและแบบแอนะล็อก ข้อดีของอีควอไลเซอร์แบบนี้คือ ความสามารถในการเปลี่ยนโปรแกรมได้ ความถี่ต่างๆสามารถดูได้จากหน่วยความจำ

ตารางที่ 2.3 แสดงช่วงความถี่ออกเตฟตามมาตรฐานของ ISO

| ลำดับตาม ISO | ความถี่ศูนย์กลาง ( Hz ) | ช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ ( Hz ) | ช่วงความถี่ 1 ออกเตฟ ( Hz ) |
|--------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 13           | 20                      | 17.8 - 22.4                   |                             |
| 14           | 25                      | 22.4 - 28.2                   |                             |
| 15           | 31.5                    | 28.2 - 35.5                   | 22.4-44.7                   |
| 16           | 40                      | 35.5 - 44.7                   |                             |
| 17           | 50                      | 44.7 - 56.2                   |                             |
| 18           | 63                      | 56.2 - 70.8                   | 44.7 - 89.1                 |
| 19           | 80                      | 70.8 - 89.1                   |                             |
| 20           | 100                     | 89.1 - 112                    |                             |
| 21           | 125                     | 112 - 141                     | 89.1 - 178                  |
| 22           | 160                     | 141 - 178                     |                             |
| 23           | 200                     | 178 - 224                     |                             |
| 24           | 250                     | 224 - 282                     | 178 - 355                   |
| 25           | 315                     | 282 - 355                     |                             |
| 26           | 400                     | 355 - 447                     |                             |
| 27           | 500                     | 447 - 562                     | 355 - 708                   |
| 28           | 630                     | 562 - 708                     |                             |
| 29           | 800                     | 708 - 891                     |                             |
| 30           | 1000                    | 891 - 1120                    | 708 - 1401                  |
| 31           | 1250                    | 1120 - 1410                   |                             |
| 32           | 1600                    | 1410 - 1780                   |                             |
| 33           | 2000                    | 1780 - 2240                   | 1401 - 2820                 |
| 34           | 2500                    | 2240 - 2820                   |                             |
| 35           | 3150                    | 2820 - 3550                   |                             |
| 36           | 4000                    | 3550 - 4470                   | 2820 - 5620                 |
| 37           | 5000                    | 4470 - 5620                   |                             |
| 38           | 6300                    | 5620 - 7080                   |                             |
| 39           | 8000                    | 7080 - 8910                   | 5620 - 11200                |
| 40           | 10000                   | 8910 - 11200                  |                             |
| 41           | 12500                   | 11200 - 14100                 |                             |
| 42           | 16000                   | 14100 - 17800                 | 11200 - 22400               |
| 43           | 20000                   | 17800 - 22400                 |                             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 หลักการของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (Power Supply)



รูปที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมและการทำงานของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.33 จะเห็นได้ว่าสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขนาด  $220\text{ V}_{AC}$  ความถี่  $50\text{ Hz}$  นั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กลงด้วยหม้อแปลง (Transformer) สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงจะเป็นไฟสลับอยู่ จึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อทำให้เป็นไฟตรงก่อน จากนั้นจะผ่านวงจรกรองกระแสเพื่อทำให้ไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมีความเรียบขึ้น ท้ายที่สุดก็จะเป็นวงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้คงที่ และตรงตามความต้องการ

### 2.6.1 การเลือกหม้อแปลง (Transformer Specifications)

ในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามีหลักการคือจะต้องเลือกหม้อแปลงที่สามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้เพียงพอกับการใช้งานจริง แต่ก็ไม่ควรที่จะเลือกหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ (จ่ายแรงดันและกระแสได้สูง) เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นในการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดพอเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการจะพิจารณาจากขนาดของแรงดันไฟตรง ( $V_o$ ) และกระแสไฟตรงสูงสุด ( $I_o$ ) ที่สามารถจ่ายให้โหลดได้แล้วนำมากำหนดขนาดของแรงดันขดทุติยภูมิ (Secondary) และกระแสใช้งานที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง

### 2.6.2 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

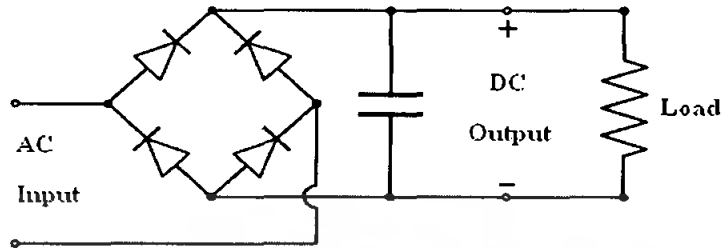
วงจรเรียงกระแสจะทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับที่มาจากหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติจริงๆ จะมีอยู่ 2 ชนิด

1. Center-tapped Full-wave Rectifier
2. Full wave Bridge Rectifier

จริง ๆ แล้ว จะมีวงจร Rectifier อีกชนิดหนึ่ง คือ Half-wave Rectifier แต่ไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งานถึงแม้อัตราการดึงกำลัง และค่าใช้จ่ายจะต่ำกว่า เพราะวงจร Half wave Rectifier ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริดจ์ไดโอด (Bridge Diode)

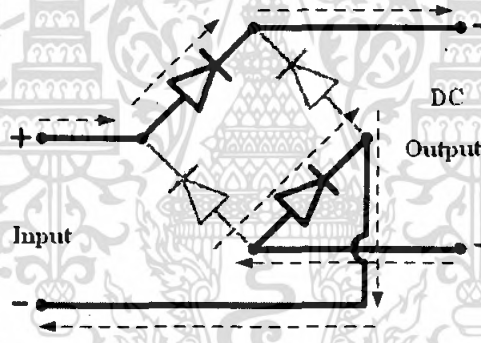
สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ นั้น จะใช้บริดจ์ไดโอดมาเรียงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า bridge rectifier ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 วงจรบริดจ์ไดโอด

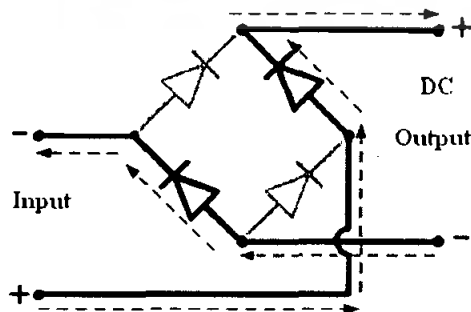
ลักษณะการทำงานของบริดจ์ไดโอด

เมื่อมีการต่ออินพุตทางซ้ายของวงจรเป็นกระแสสลับ ถ้ากระแสด้านบนเป็นบวก กระแสจะวิ่งผ่านเส้นทางตามลูกศร ไปทางด้านบน และจะวกกลับมาทางเส้นด้านล่าง ซึ่งเราจะเห็นเป็นดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.35 วงจรบริดจ์ไดโอดเมื่ออินพุตมีกระแสด้านบนเป็นบวก

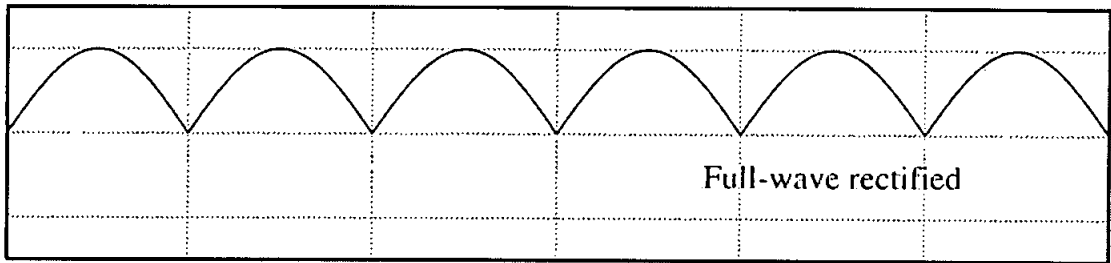
เมื่อกระแสทางด้านล่างเป็นบวก กระแสจะวิ่งผ่านเส้นทางไปตามลูกศรทางด้านล่าง แล้วขึ้นสู่ด้านบน ดังรูปที่ 2.36 จากนั้นจะวกออกมาทางด้านล่าง ซึ่งจะเป็น ไฟบวก



รูปที่ 2.36 วงจรบริดจ์ไดโอดเมื่ออินพุตมีกระแสด้านล่างเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อเราวัดสัญญาณ Output DC แล้ว เราจะได้ดังรูปที่ 2.37

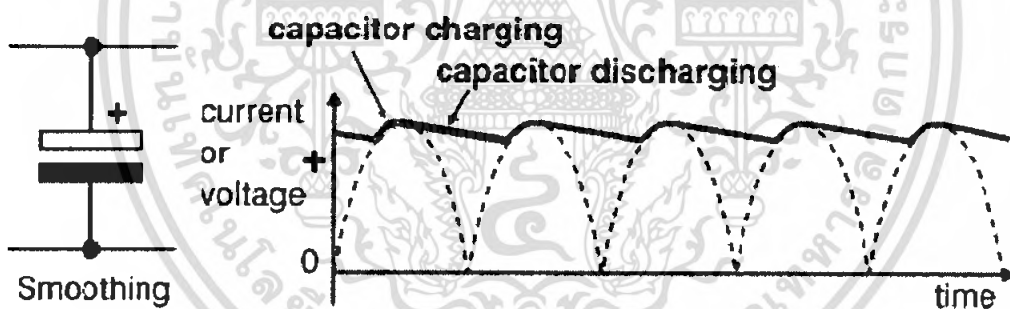


รูปที่ 2.37 สัญญาณ Full wave rectified

**2.6.3 วงจรกรองกระแส (Filter)**

วงจรกรองกระแสที่นิยมใช้และได้ผลดี ก็จะเป็นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยวงจรกรองแสดนี้จะต่ออยู่ระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรรักษาระดับแรงดัน

เราจะทำการเพิ่มตัวเก็บประจุตามรูปที่ 2.34 เพื่อให้สัญญาณที่ได้นั้น เป็นกระแสเรียบขึ้น โดยใช้คุณสมบัติตัวเก็บประจุในการ Charge และ Discharge ดังรูป 2.38 ผลที่ได้จะทำให้เรามีกระแสหรือแรงดันที่เรียบมากขึ้นและนำไปใช้งานได้



รูปที่ 2.38 การเพิ่มตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการ Charge และ Discharge

**2.6.4 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulators)**

วงจรรักษาระดับแรงดันมีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้โหลดมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพโหลด โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของวงจรรักษาระดับแรงดันออกเป็น 2 ชนิด คือ Series Regulator และ Switching Regulator

Series Regulator จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยการใช้ตัวเปรียบเทียบแรงดันกับแรงดันเอาต์พุตที่ย้อนกลับมา ส่วน Switching Regulator นั้นจะทำงานในลักษณะ On-off ซึ่งจะผ่านวงจร LC Filter เพื่อกรองกระแสให้เรียบเป็นไฟตรง ส่วนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยการปรับค่าเวลาในการ On ( $t_{on}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 วงจรกรอง (Filter)

วงจรกรอง (Filter) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกผ่านสัญญาณ โดยวงจรกรองจะยอมให้สัญญาณเฉพาะบางย่านความถี่ผ่านไปได้นั้น เราจะเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (Passband) และย่านความถี่ที่วงจรกรองจะกั้นไว้ไม่ให้ผ่านว่า ย่านความถี่หยุด (Stopband)

วงจรกรองเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในงานทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์หลายด้าน เช่น ใช้ในเครื่องขยายภาคต้น (Pre-amplification) วงจรอิกวาไลเซอร์ (Equalizer) และตัวปรับเสียง (Tone-Control) ของระบบเครื่องเสียง (Audio System)

- ใช้ในวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการในระบบสื่อสาร
- ใช้ในการกำจัดไซด์แบนด์ (Sideband) ในระบบสื่อสารแบบไซด์แบนด์เดี่ยว (Single Sideband)
- ใช้ในการดีมอดูเลต (Demodulate) สัญญาณ
- ใช้ในการตรวจจับ (Detect) สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแบบดิจิตอล โดยเราเรียกววงจรกรองที่ทำหน้าที่นี้

ว่า Matched Filter

- ใช้ในระบบสื่อสารมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time-Division Multiplexing) และแบบแบ่งความถี่ (Frequency-Division Multiplexing)
- ใช้แก้ปัญหาการทับซ้อน (Aliasing) ที่อาจเกิดขึ้นจากการซิกตัวอย่าง (Sampling) สัญญาณแอนะล็อกในการประมวลผลแบบดิจิตอล (Digital Signal Processing)
- ใช้ในการแปลงสัญญาณที่ได้จากการซิกตัวอย่าง (Sampled Signals) ไปเป็นสัญญาณแอนะล็อก
- ใช้ในการสังเคราะห์สัญญาณ
- ใช้ในการแก้ปัญหาการรบกวนข้ามสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference: ISI) ในการส่งข้อมูลดิจิตอล โดยเราเรียกววงจรกรองที่ทำหน้าที่นี้ว่า วงจรกรองส่วนผ่านข้อมูล (Data Transmission Filter)
- ใช้แก้ปัญหาการสูญเสีย (Loss) ในการส่งสัญญาณในสายส่ง (Transmission Line) และสายเคเบิล
- ใช้ในอุปกรณ์ชีวการแพทย์ (Biomedical Equipment) เช่น เยื่อประสาทหูเทียม (Artificial Cochlea)

เราสามารถแบ่งวงจรกรองได้ตามลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างได้ดังนี้

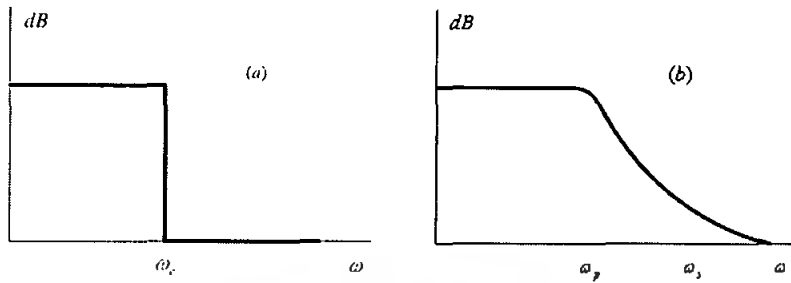
- วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ วงจรกรองประเภทนี้สามารถใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่สัญญาณไฟตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 300 MHz อย่างไรก็ตามเราไม่นิยมใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ซึ่งมีความสูญเสียมาก ดังนั้นโดยทั่วไปวงจรกรองแบบพาสซีฟจะถูกใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่เสียง (Audio Frequency) ความถี่สัญญาณภาพ (Video Frequency) ไปจนถึงย่านความถี่วิทยุสูงมาก (VHF)

- วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟร่วมกับตัวต้านทานและ/หรือตัวเก็บประจุ วงจรกรองแบบแอคทีฟที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่วงจรกรอง active RC และวงจรกรองตัวเก็บประจุสวิตช์ (ซึ่งวงจรกรองทั้งสองแบบสามารถใช้งานในย่านความถี่ไฟตรง-500 kHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.1 วงจรกรองแบบต่างๆ

### 1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

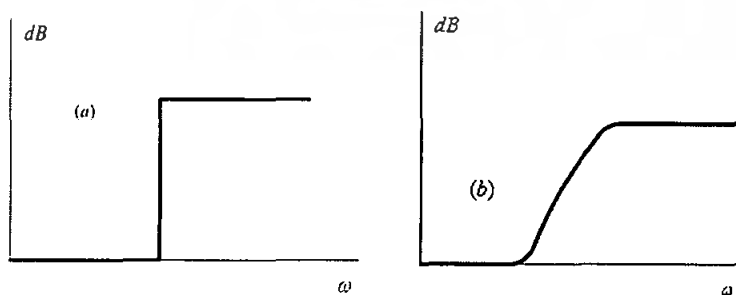


รูปที่ 2.39 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงเอาไว้ ดังรูปที่ 2.39 (a) แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ โดยนิยามเราเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (Passband) หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจร ส่วนย่านความถี่ที่วงจรไม่ยอมให้ผ่านไปเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (Stopband)

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างวงจรกรองที่มีผลตอบสนองเป็นดังรูปที่ 2.39 (a) ได้ รูปที่ 2.39 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองที่ได้มาจากการประมาณผลตอบสนองในอุดมคติโดยนิยามแบนด์วิดท์ใหม่ ว่า คือ ย่านความถี่ที่อัตราขยายของวงจรยังคงลดลงมาจากอัตราขยายสูงสุด (สังเกตว่าค่าอัตราขยายสูงสุดสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอาจจะไม่ใช่อัตราขยายสัญญาณไฟตรงของวงจร) ไม่เกินค่าที่กำหนด (โดยปกติจะกำหนดให้ตกลงมาได้ไม่เกิน 3 dB) จะเห็นว่าย่านความถี่ผ่านของวงจรจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง  $\omega_p$  และย่านความถี่หยุดของวงจรจะเป็นช่วงความถี่ที่มากกว่า  $\omega_s$  ส่วนย่านความถี่ที่อยู่ระหว่าง  $\omega_p$  และ  $\omega_s$  นั้นเราจะเรียกว่า ย่านความถี่เปลี่ยน (Transition Band)

### 2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter)

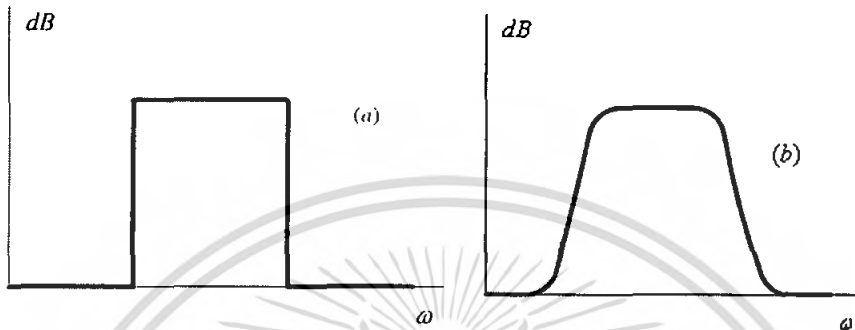


รูปที่ 2.40 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณความถี่ต่ำไว้ รูปที่ 2.40 (a) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ ส่วนรูปที่ 2.40 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่มีลักษณะเป็น โมโนโทนิคอย่างสมบูรณ์

### 3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter)



รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ใดๆผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำหรือสูงกว่าความถี่นั้นผ่านได้ รูปที่ 2.41 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โดยรูปที่ 2.41 (a) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ผ่านในอุดมคติ รูปที่ 2.41 (b) แสดงผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีอัตราขยายลดลงเรื่อยๆจากสูงสุดของความถี่ โดยทั้งนี้ถ้าให้  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  เป็นจุดปลายของย่านความถี่ผ่านของวงจร โดย  $\omega_2 < \omega_1$  เราจะพบว่าแบนด์วิดธ์ของวงจรคือ

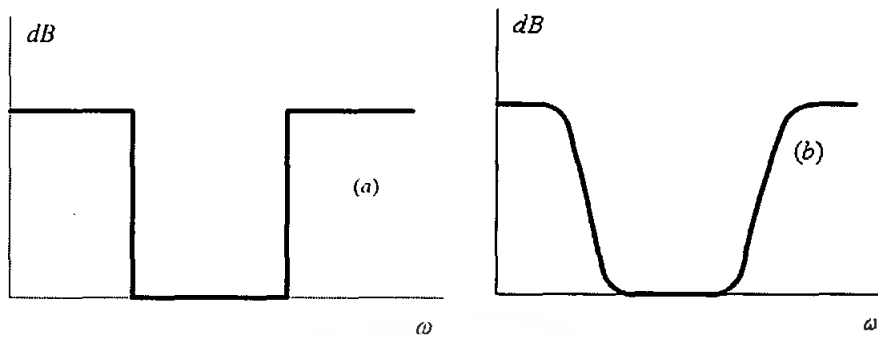
$$BW = \omega_2 - \omega_1 \quad (2.34)$$

และเราได้นิยามความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency):  $\omega_0$  ว่าเป็น

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (2.35)$$

ซึ่งโดยทั่วไปเราจะกำหนดให้  $BW$  ของวงจรกรองความถี่ผ่านคือ แถบความถี่ที่สัญญาณสามารถผ่านไปได้โดยมีการลดทอนไม่เกิน 3 dB นั่นคือ  $BW = BW_{-3dB}$

#### 4. วงจรกรองแถบความถี่หยุด (Band-Reject Filter)



รูปที่ 2.42 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่หยุด

วงจรกรองแถบความถี่หยุดจะทำหน้าที่ตรงข้ามกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน กล่าวคือวงจรกรองแถบความถี่หยุดจะกั้นไม่ให้สัญญาณ ณ ช่วงความถี่ใดๆ ผ่านไปได้ แต่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำหรือสูงกว่าช่วงความถี่นั้นผ่านไปได้ ดังรูปที่ 2.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

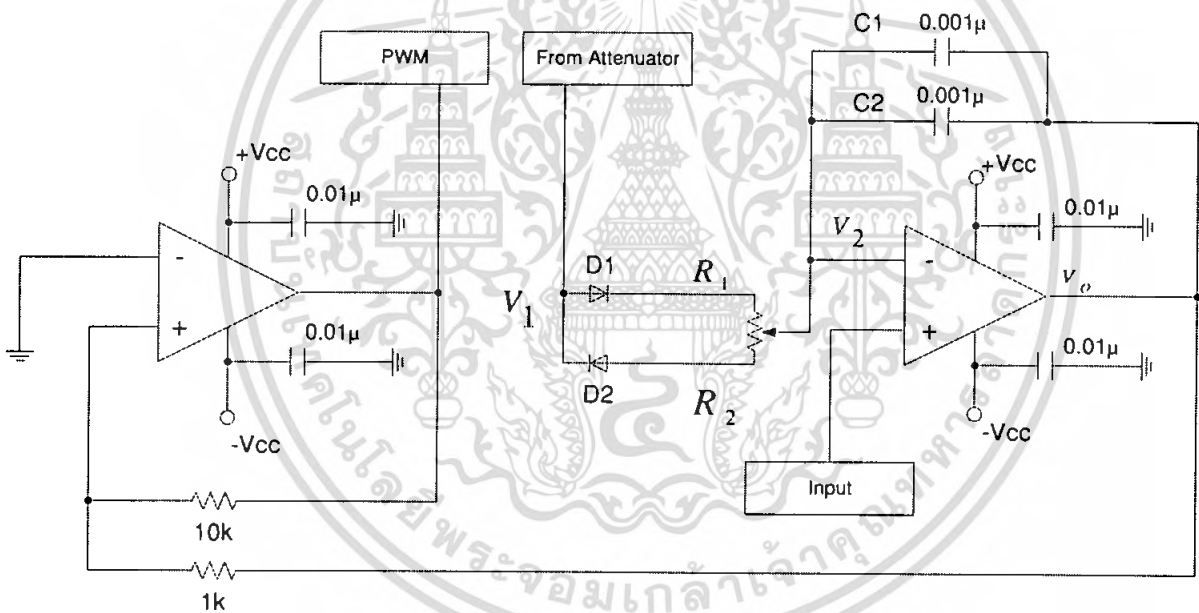
### บทที่ 3

#### การคำนวณและการสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆในขั้นตอนการขยายกำลังคลาสซี เพื่อจะใช้เป็นพื้นฐานแสดง ความเชื่อมโยงในการนำวงจรการมอดูเลตความกว้างพัลส์มาประยุกต์ใช้สร้างวงจรขยายกำลังงานเสียง

#### 3.1 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมนั้น สามารถสร้างได้จากการทำงานของออปแอมป์ (Op-Amp) ซึ่งใน ที่นี้ใช้ออปแอมป์ 2 ตัวในการสร้างสัญญาณขึ้นมา ประกอบด้วย 2 วงจร คือ วงจรชmitttrigger และวงจรอินเวอร์ตติ้งอินทิเกรเตอร์ (Inverting integrator) ซึ่งรับสัญญาณจากวงจรลดทอนสัญญาณ (Attenuator) โดยต่อไดโอด 2 ตัวเพื่อทำให้มีเส้นทางเดินที่ต่างกันของไฟบวกและไฟลบ ทำให้วงจรอินเวอร์ตติ้งอินทิเกรเตอร์ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.1 วงจรสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

จากรูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์ตติ้งอินทิเกรเตอร์ที่ใช้สร้างสัญญาณสามเหลี่ยม สามารถวิเคราะห์วงจรได้ ดังนี้

สัญญาณเอาต์พุตของวงจรลดทอนสัญญาณมี 2 ค่า คือ ค่าอิมิต์ทางบวก ( $V_{OH}$ ) และค่าอิมิต์ทางลบ ( $V_{OL}$ ) พิจารณาที่โหนด  $V_2$  ได้ 2 กรณี คือ

1. ในขณะที่  $V_1$  มีค่าเป็น  $V_{OH}$  จะพบว่าไดโอด D1 จะลัดวงจร (short) และไดโอด D2 จะเปิดวงจร ทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านไดโอด D2 ได้

จะได้สมการที่โหนด  $V_2$  เป็นดังนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_2 - V_1}{R_1} + C \frac{dV_o}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int (V_2 - V_1) dt \quad (3.2)$$

เมื่อ  $C = C_1 + C_2$

ถ้าอินพุตเป็น 0 V

จากหลักการของ Virtual voltage จะได้ว่า  $V_2 = 0$

เมื่อแทน  $V_2 = 0$  ลงในสมการ (3.2) จะได้

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int (0 - V_{OH}) dt$$

$$V_o = \frac{V_{OH}}{R_1 C} t \quad (3.3)$$

2. ในขณะที่  $V_1$  มีค่าเป็น  $V_{OL}$  พบว่าไดโอด D1 จะเปิดและไดโอด D2 จะลัดวงจรทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านไดโอด D1 ได้  
จะได้สมการที่โหนด  $V_2$  เป็น

$$\frac{V_2 - V_1}{R_2} + C \frac{dV_o}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

$$V_o = -\frac{1}{R_2 C} \int (V_2 - V_1) dt \quad (3.5)$$

จากหลักการของ Virtual voltage จะได้ว่า  $V_2 = 0$

เมื่อแทนค่า  $V_2 = 0$  ลงในสมการ (3.5) จะได้

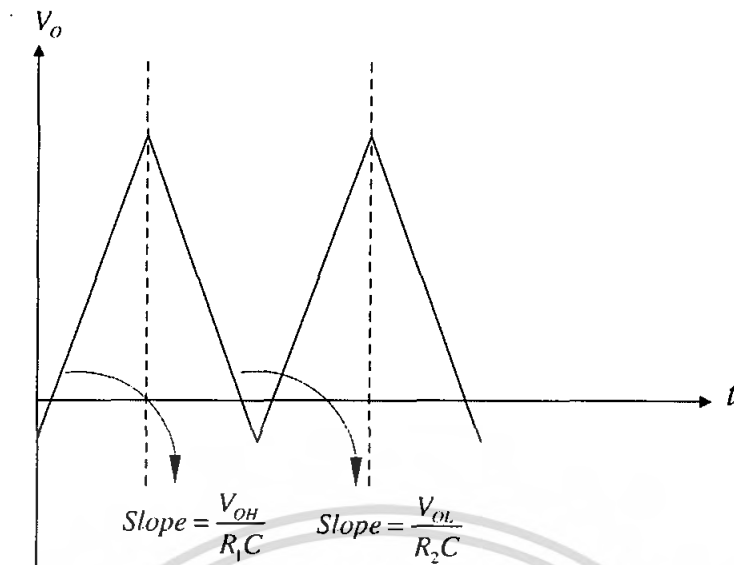
$$V_o = -\frac{1}{R_2 C} \int (0 - V_{OL}) dt \quad (3.6)$$

$$V_o = \frac{V_{OL}}{R_2 C} t \quad (3.7)$$

โดยในที่นี้  $R_1 = R_2$

นำสมการที่ (3.3) และ (3.7) ไปเขียนกราฟ จะทำให้ได้กราฟรูปคลื่นสามเหลี่ยมออกมาดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

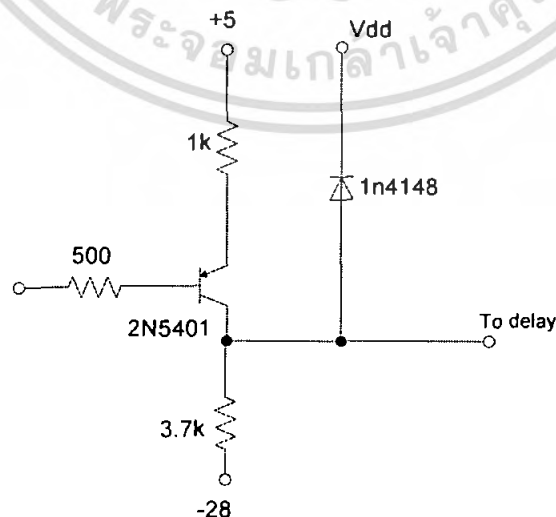


รูปที่ 3.2 กราฟสัญญาณสามเหลี่ยม

สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอินพุตแล้ว จะส่งเข้าสู่วงจรมิติทริกเกอร์ ซึ่งจะสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ออกมาเพื่อป้อนเข้าสู่วงจรระดับสัญญาณต่อไป

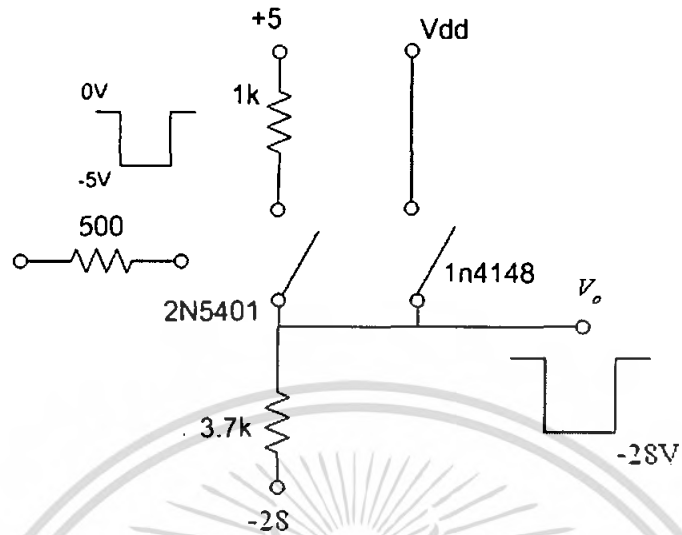
### 3.2 วงจรระดับสัญญาณ (Level Shift)

วงจรระดับสัญญาณเป็นวงจรที่ทำการยกระดับสัญญาณให้เหมาะกับไอซีลอจิกดิจิทัลโดยใช้สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์แสดง ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะใช้สัญญาณช่วงบวกและลบของสัญญาณเป็นเงื่อนไขในการทำงาน โดยในที่นี้จะตัดสินว่าเป็นลอจิก “Low” ที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงด้านลบของทรานซิสเตอร์เฟต และตัดสินว่าเป็นลอจิก “High” ที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงด้านลบของทรานซิสเตอร์เฟตบวก 12 โวลต์



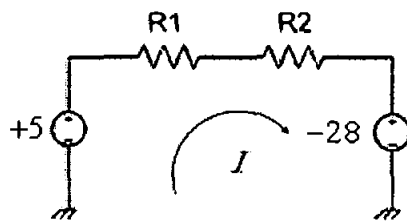
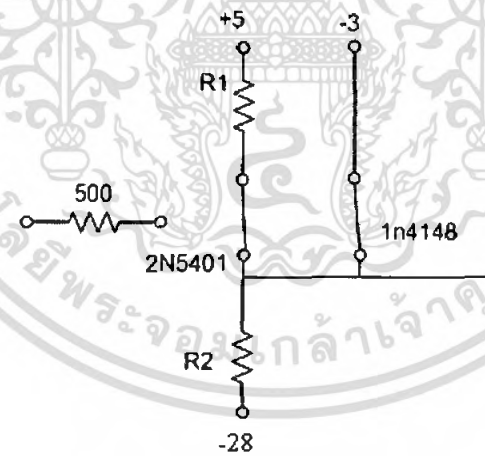
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.3 วงจรระดับสัญญาณ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาวงจรในรูปที่ 3.3 ในกรณีทรานซิสเตอร์สถานะออฟ (Off) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรยกระดับสัญญาณกรณีทรานซิสเตอร์สถานะออฟ

และพิจารณากรณีทรานซิสเตอร์สถานะออน (On) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรยกระดับสัญญาณกรณีทรานซิสเตอร์สถานะออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เราต้องการแรงดันตกคร่อม } R_2 = 12V \quad (3.9)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad -5 + IR_1 + IR_2 - 28 = 0 \quad (3.10)$$

$$I(R_1 + R_2) = 33 \quad (3.11)$$

และต้องการ

$$IR_2 = 12 \quad (3.12)$$

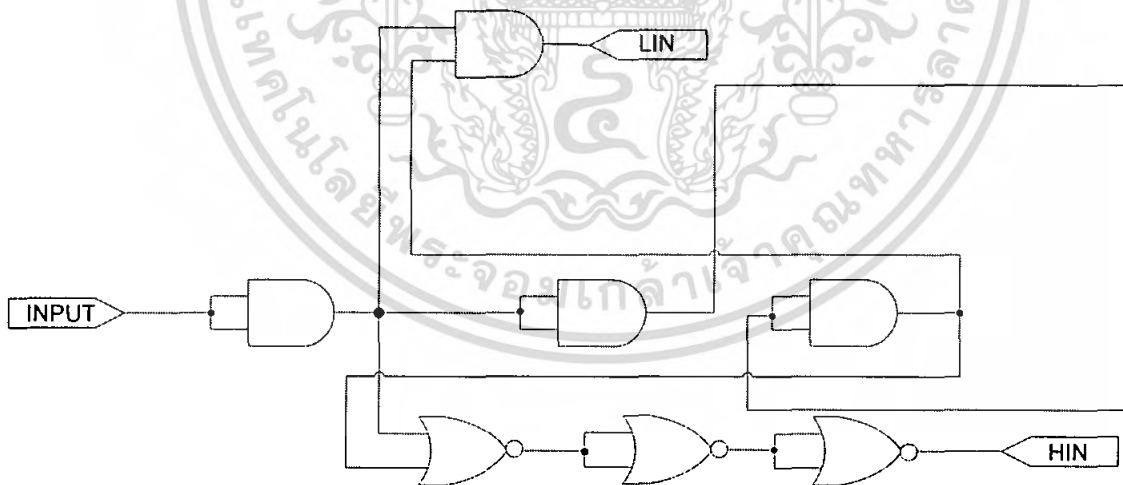
$$I = \frac{12}{R_2} \quad (3.13)$$

แทนสมการ (3.13) ลงใน (3.11) จะได้

$$R_1 = \frac{7}{4} R_2 \quad (3.14)$$

### 3.3 วงจรดีเลย์ (Delay)

วงจรดีเลย์ในที่นี้เป็นวงจรสร้างสัญญาณกลับเฟสโดยใช้ไอซีเบอร์ 4001 (ดูรูปที่ 3.6) ซึ่งเป็นนอร์เกต และไอซีเบอร์ 4081 ซึ่งเป็นแอนด์เกต โดยทั้งสองตัวนี้จะมีหน้าที่สร้างสัญญาณดิจิทัลสองสัญญาณที่อินเฟสและกลับเฟสกัน  $180^\circ$  กับสัญญาณอินพุต และเกิดการหน่วงเวลาขึ้น เพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับทรานซิสเตอร์เฟสสองตัวสลับกันไป

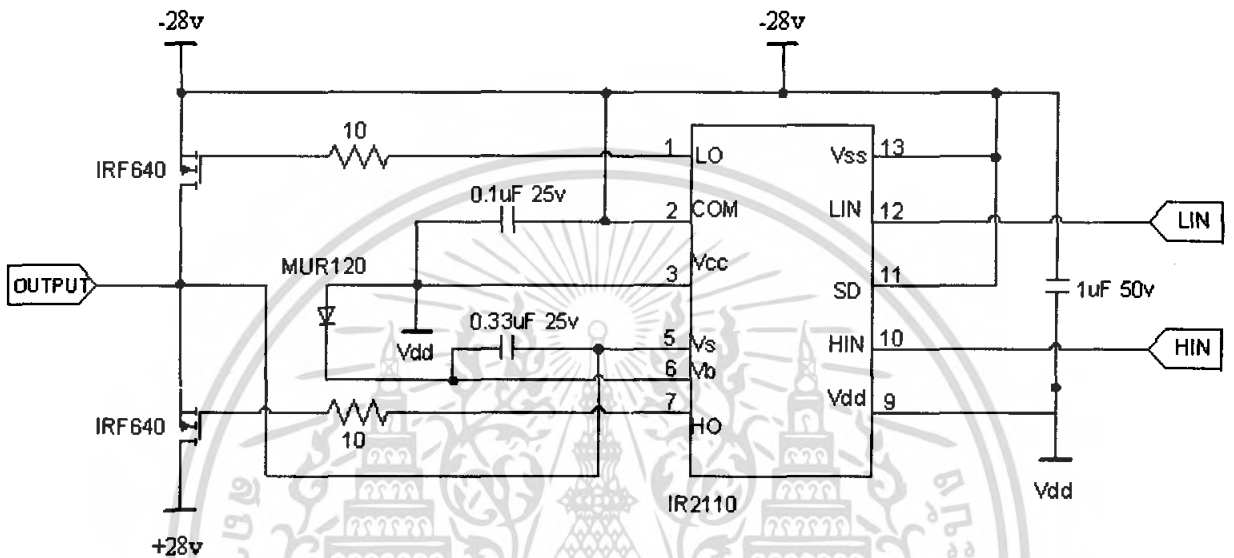


รูปที่ 3.6 วงจรดีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วงจรขับกระแส

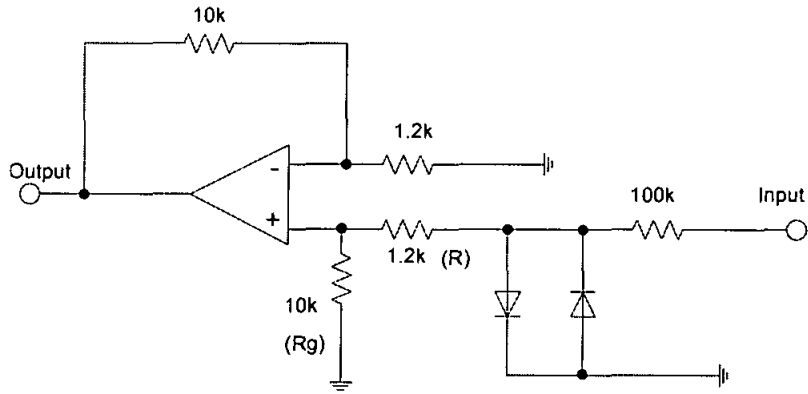
วงจรขับกระแสมีหน้าที่สร้างระดับแรงดันและกระแสที่เหมาะสมเพื่อป้อนที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์เฟตทั้งสองตัวให้ทำงานโหมค้อนและโหมคอฟ โดยจะเลือกใช้ไอซีเบอร์ IR2110 ที่มีหน้าที่เฉพาะในการขับขาเกตของทรานซิสเตอร์ และทรานซิสเตอร์เฟตจะใช้เบอร์ IRF640 สองตัวร่วมกันทำงานแบบฮาล์ฟบริดจ์ มีไฟเลี้ยงทรานซิสเตอร์ตามเกณฑ์ที่ต้องการขยาย (ในการทดลองใช้แรงดันไฟเลี้ยงทรานซิสเตอร์เฟต ± 28 โวลต์) ซึ่งสามารถปรับเพิ่มขึ้นตามความต้องการได้ วงจรแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรขับกระแส

3.5 วงจรลดทอนระดับสัญญาณ (Attenuator)

สัญญาณที่ได้จากวงจรขับกระแส จะนำมามวนลูบปิดกลับเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แต่เนื่องจากสัญญาณจากวงจรขับกระแสนั้นมีระดับที่สูง จึงต้องมีการลดทอนระดับสัญญาณให้ลดลงเพื่อความเหมาะสม ก่อนป้อนกลับเข้าสู่วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งในโครงงานนี้ ได้ใช้ไดโอด 2 ตัวรับสัญญาณเพื่อลดทอนและทำให้เกิดระดับสัญญาณตกรวมไดโอดขึ้นเล็กน้อย รูปวงจรถอดทอนระดับสัญญาณและขยายสัญญาณผลต่างแสดงในรูปที่ 3.8 จากนั้นจึงนำสัญญาณนี้ป้อนเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณผลต่าง เพื่อเพิ่มระดับสัญญาณ แล้วป้อนเข้าสู่วงจรมอดูเลตต่อไป



รูปที่ 3.8 วงจรลดทอนระดับสัญญาณและขยายสัญญาณผลต่าง

จากวงจรถ่ายสัญญาณผลต่าง เราจะได้อัตราขยายสัญญาณดังสมการ

$$A = \frac{R_s}{R} \quad (3.15)$$

เพราะฉะนั้น เราจะได้อัตราขยายคือ

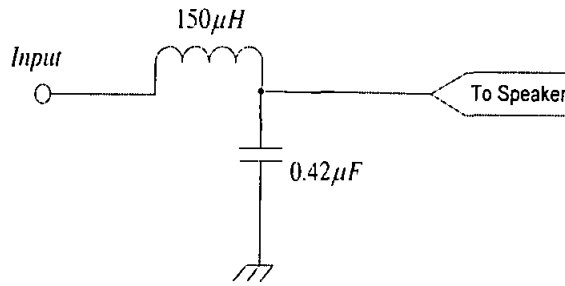
$$A = \frac{10k}{1.2k} = 8.33$$

### 3.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะเป็นวงจรสุดท้าย ก่อนที่จะได้เสียงเอาต์พุตออกสู่ลำโพง ทำหน้าที่กรองสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการมอดูเลตสัญญาณแบบความถี่พัลส์ ที่มีองค์ประกอบทางความถี่เสียงรวมอยู่กับองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นพาห์ โดยจะต้องยอมให้ผ่านเฉพาะช่วงความถี่เสียง และตัดช่วงความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงออก

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมี 2 ประเภทคือ แบบพาสซีฟ (Passive) และแบบไวแอกทีฟ (Active) ซึ่งการใช้งานในวงจรถ่ายกำลังเป็นการกรองสัญญาณพัลส์ที่มีกำลังงานสูง แต่วงจรกรองแบบแอคทีฟจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีเกนขยายสัญญาณ เช่น ทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์ ซึ่งไม่สามารถทนกำลังสูงได้ ดังนั้นจึงต้องออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ โดยจะออกแบบให้กรองเฉพาะช่วงความถี่เสียง (0-20 kHz) และตัดช่วงความถี่สูงที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณพัลส์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบโดยใช้ ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัวมีค่า  $4.47 \mu F$  เมื่อต่ออนุกรมกัน จะได้ค่าความจุรวมเท่ากับ  $0.42 \mu F$  และกำหนดค่าความถี่คutoff ที่  $20 \text{ kHz}$  จากนั้นคำนวณค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ

จาก 
$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.16}$$

$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.17}$$

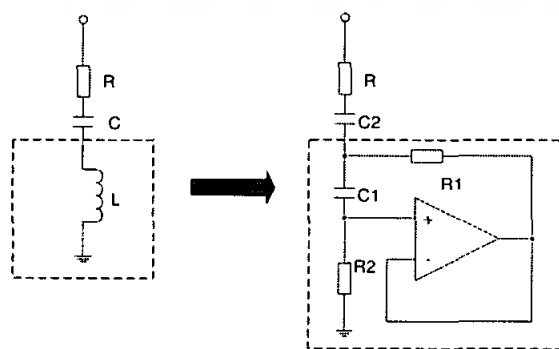
จะได้ 
$$L = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C} \tag{3.18}$$

$$L = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 20 \times 10^3)^2 \times 0.42 \times 10^{-6}}$$

$$L = 150 \mu H$$

### 3.7 วงจรอีควอไลเซอร์ (Equalizer)

วงจรรีควอไลเซอร์ที่ใช้เป็นวงจรรีเฟกทีฟอีควอไลเซอร์ 5 แบนด์ โดยมีความถี่ศูนย์กลาง ( Center frequency ) ที่  $100 \text{ Hz}$ ,  $340 \text{ Hz}$ ,  $1 \text{ kHz}$ ,  $3.4 \text{ kHz}$  และ  $10 \text{ kHz}$  ซึ่งโดยปกติการสร้างวงจรรีเฟกทีฟจะใช้ตัวต้านทานและขดลวดเหนี่ยวนำอนุกรมกัน แต่เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ให้ค่าที่เหมาะสมตามต้องการนั้นหาได้ยาก จึงได้ออกแบบด้วยวงจรรีเฟกทีฟซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 ที่ใช้โอปแอมป์ทำงานเสมือนขดลวดเหนี่ยวนำนั่นเอง



รูปที่ 3.10 วงจรรีเฟกทีฟอีควอไลเซอร์ที่นำมาใช้แทนขดลวดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือมีการสงวนสิทธิ์ในชื่อเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

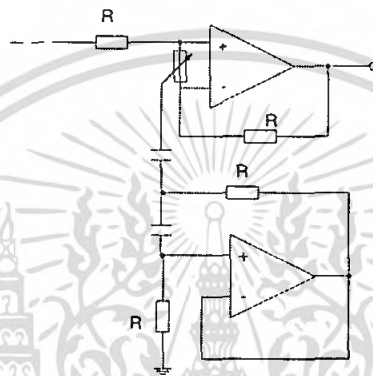
โดยเราสามารถนำมาใช้สำหรับแบนด์พาสฟิลเตอร์ได้ โดยใช้สมการหาความถี่ศูนย์กลางของแต่ละออกเดฟคือ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.19)$$

เราสามารถคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L = R_1 R_2 C_1 \quad (3.20)$$

และรูปแบบวงจรโอเพอเรเตอร์ที่จะนำมาใช้สร้างอิกวอไลเซอร์ 1 แบนด์ จะมีดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรโอเพอเรเตอร์ที่ใช้สร้างอิกวอไลเซอร์ 1 แบนด์

โดยความถี่ศูนย์กลางที่เราจะใช้คือ 100 Hz, 340 Hz, 1 kHz, 3.4 kHz และ 10 kHz ซึ่งเราใช้สมการ(3.19) ในการออกแบบ จะได้

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \times 1800 \times 330 \times 10^{-9} \times 330 \times 10^{-9}}} = 103.77 \text{ Hz}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \times 1800 \times 100 \times 10^{-9} \times 100 \times 10^{-9}}} = 342.44 \text{ Hz}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \times 1800 \times 33 \times 10^{-9} \times 33 \times 10^{-9}}} = 1037.71 \text{ Hz}$$

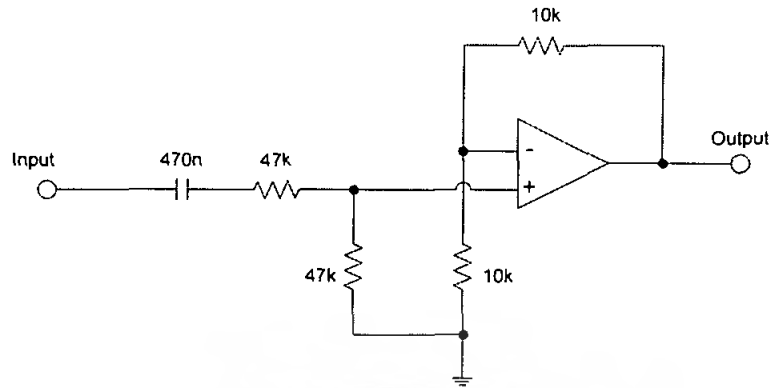
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \times 1800 \times 10 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^{-9}}} = 3424.47 \text{ Hz}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1200 \times 1800 \times 3.3 \times 10^{-9} \times 3.3 \times 10^{-9}}} = 10377.18 \text{ Hz}$$

เมื่อได้ช่วงความถี่ที่ต้องการแล้ว ในการออกแบบวงจรอิกวอไลเซอร์นี้ยังได้ใช้วงจรขยายสัญญาณผลต่างเพื่อนำมากำจัดสัญญาณรบกวน และยังใช้วงจรบัฟเฟอร์ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 ซึ่งจะมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานสูง ใช้เชื่อมต่อระหว่างวงจร โดยไม่ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตลดลง โดยวงจรขยายสัญญาณผลต่าง จะเป็นดังรูปที่ 3.12

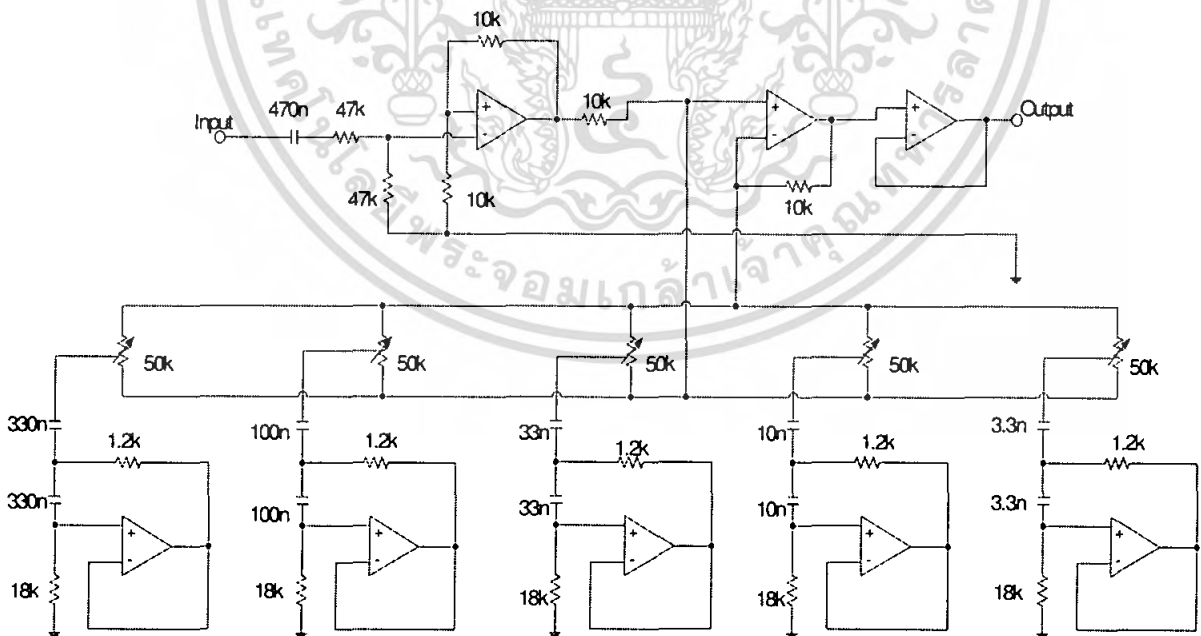


รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

โดยกำหนดให้มีอัตราขยายเท่ากับ 1 ซึ่งคำนวณได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.5

$$A = \frac{47k}{47k} = \frac{10k}{10k} = 1$$

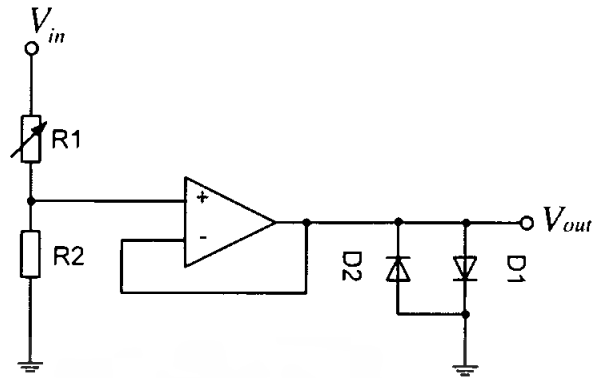
และวงจรรวมที่ใช้สร้างอิกวอลไซเซอร์ 5 แบนด์จะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรอิกวอลไซเซอร์ 5 แบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 วงจรปรับระดับเสียงหลัก (Main Volume) และวงจรจำกัดระดับแรงดัน (Limiter)



รูปที่ 3.14 วงจรปรับระดับเสียงหลักและวงจรจำกัดระดับแรงดัน

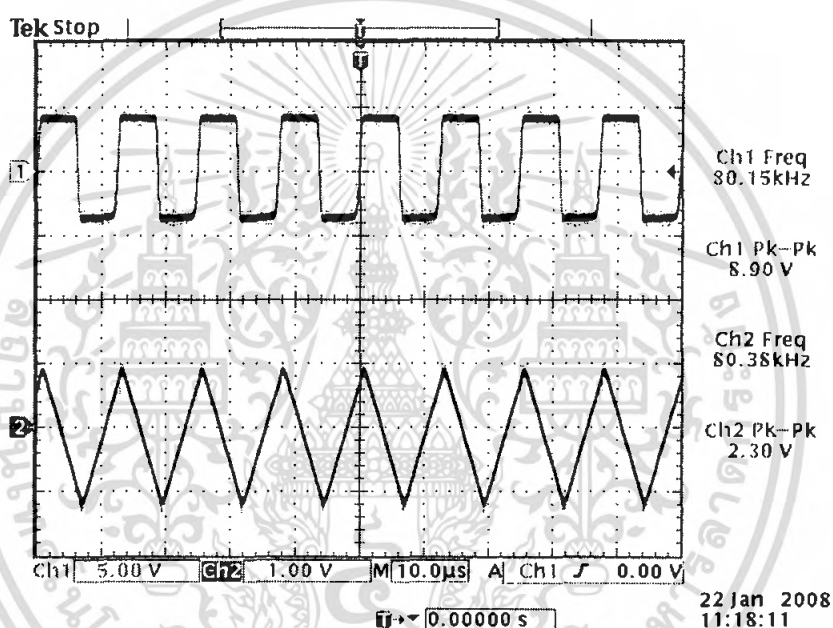
วงจรปรับระดับเสียงหลักจะทำหน้าที่ในการปรับระดับแรงดัน โดยใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) เพื่อใช้ในการลดหรือเพิ่มเสียงต่อร่วมกับวงจรบีฟเฟอร์ ซึ่งก่อนที่จะส่งสัญญาณเข้าไปยังวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ จะผ่าน ไดโอด 2 ตัว ซึ่งต่อลงกราวด์ จะทำหน้าที่จำกัดระดับแรงดันไว้ไม่เกิน 1.4 โวลต์

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

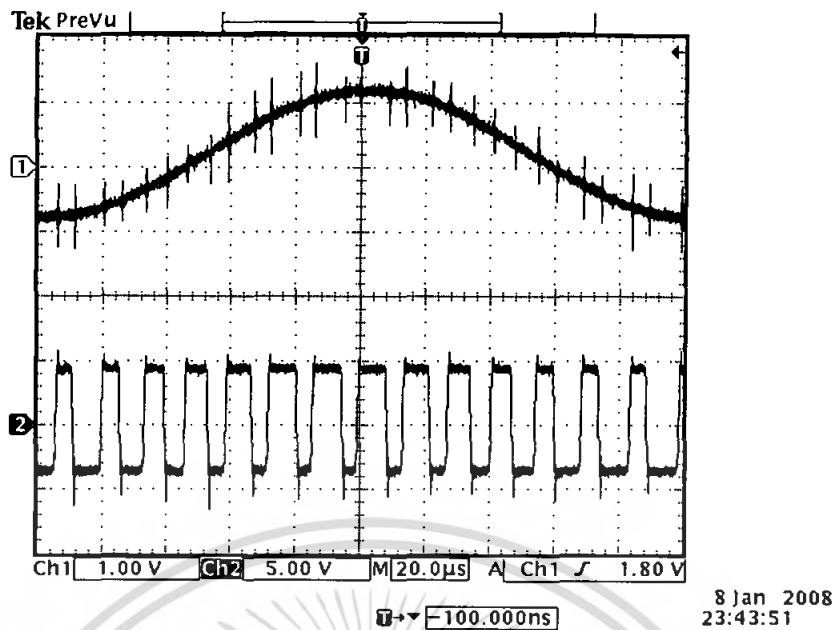
สัญญาณสามเหลี่ยมสามารถสร้างจากวงจรรูปที่ 3.1 โดยป้อนสัญญาณไซน์ที่อินพุต แล้วเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ออกจาก  $V_2$  ซึ่งจะให้ได้สัญญาณสามเหลี่ยมออกมา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ที่ Ch.2 ส่วนที่ Ch.1 แสดงสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้จากการทดลอง โดยป้อนสัญญาณอินพุตขนาด 0 โวลต์ แล้ววัดเปรียบเทียบ ณ จุดเอาต์พุตที่สร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์กับจุดเอาต์พุต  $V_0$  ที่สร้างสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.1 สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

Ch.2: สัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.2 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์เปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์

Ch.1: สัญญาณไซน์

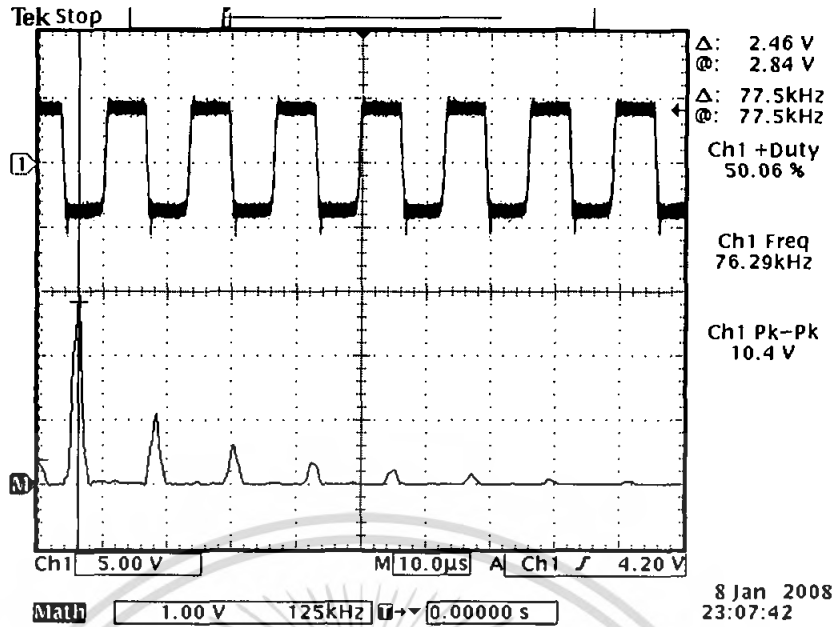
Ch.2: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

#### 4.2 การทดลองวัดสเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

จากวงจรรูปที่ 3.1 ทำการวัดสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ และวัดสเปกตรัมของสัญญาณหาสเปกตรัมของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยที่ Ch.1 แสดงสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ และที่ Ch.2 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

#### 4.3 กราฟคุณสมบัติของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

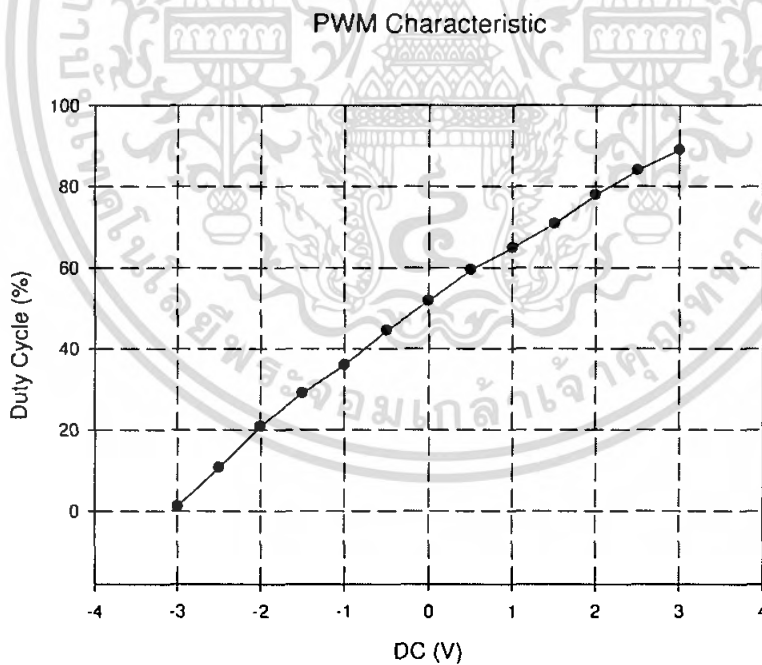
กราฟคุณสมบัติของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟตรงกับดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณไฟตรงที่ป้อนนั้นแปรผันตรงกับดิฟเฟอเรนเชียลของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ จะได้ผลกราฟคุณสมบัติสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

Ch.M: สเปกตรัมของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

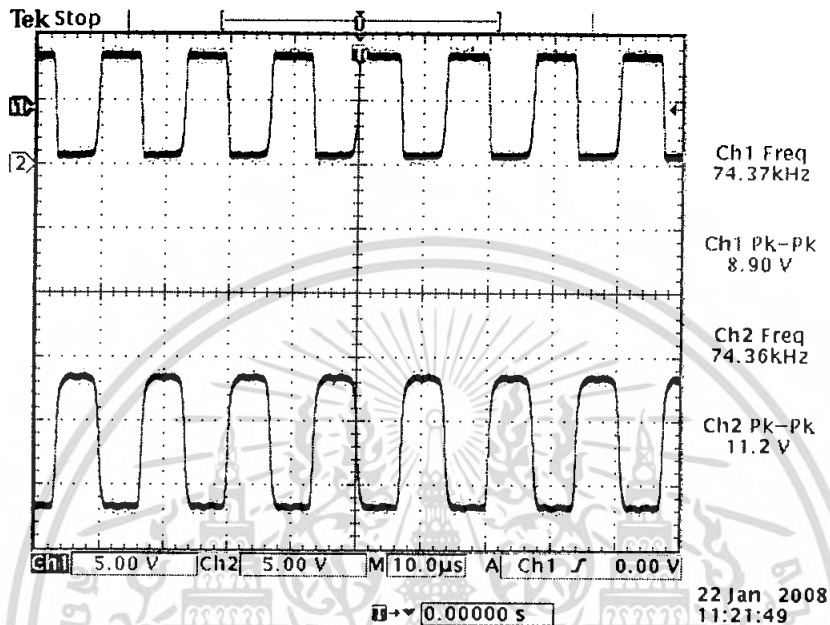


รูปที่ 4.4 กราฟคุณสมบัติของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลองวงจรระดับสัญญาณ

สัญญาณเอาต์พุตการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ออกจากวงจรรูปที่ 3.1 จะถูกนำไปป้อนเข้าสู่วงจรระดับสัญญาณในรูปวงจรที่ 3.3 ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกปรับระดับแรงดันเพื่อให้เหมาะกับการป้อนสู่วงจรดีเลย์ต่อไป โดยสัญญาณจากวงจรระดับสัญญาณนั้นวัดจากขาเอาโนคของวงจร



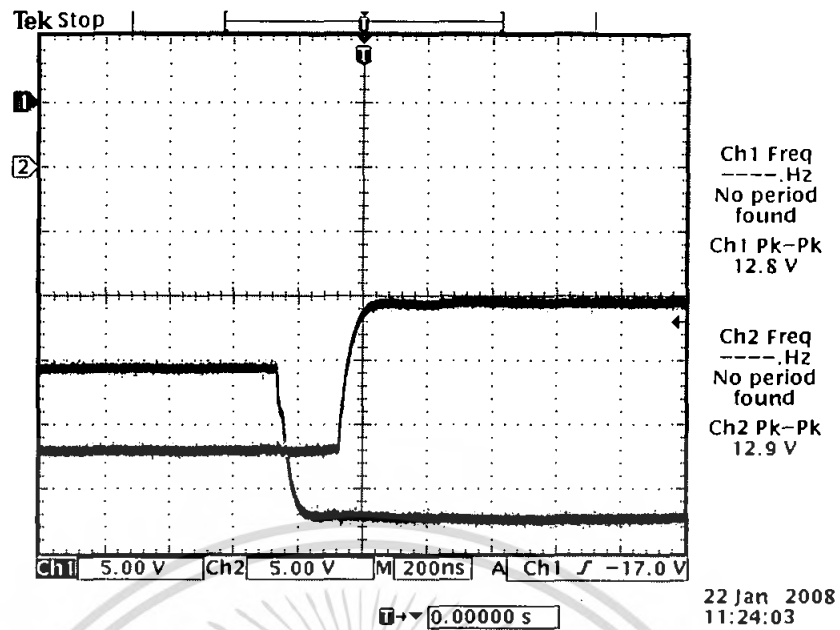
รูปที่ 4.5 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรระดับสัญญาณ

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์

Ch.2: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์เมื่อผ่านวงจรระดับสัญญาณ

#### 4.5 การทดลองวงจรดีเลย์

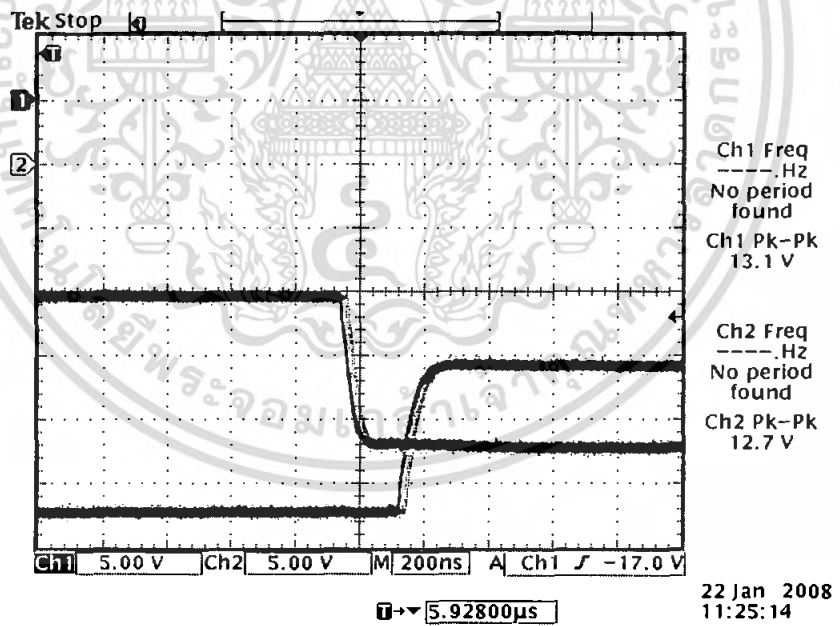
เมื่อสัญญาณผ่านวงจรระดับสัญญาณแล้ว จะนำไปป้อนเข้าสู่วงจรดีเลย์ ดังรูปวงจรที่ 3.6 และวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา LIN และ HIN ทั้งสองขาพร้อมกัน จากนั้นขยายรูปสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบการหน่วงเวลาของสัญญาณ เพื่อแสดงให้เห็นว่า ก่อนสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งจะขึ้นเป็นโหมคออน ต้องอยู่โหมคออฟทั้งคู่ก่อน สัญญาณที่ได้จะมีการหน่วงเวลาของขอบขาขึ้นและขอบขาลง เพื่อใช้เป็นสัญญาณขับทรานซิสเตอร์เฟดต่อไป โดยการหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นช่วงเวลาสำหรับทรานซิสเตอร์สองตัวสลับโหมคการทำงานกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรถิเลย์

Ch.1: สัญญาณเปลี่ยนจากโหมคอฟเป็นโหมคออน

Ch.2: สัญญาณเปลี่ยนจากโหมคออนเป็นโหมคอฟ



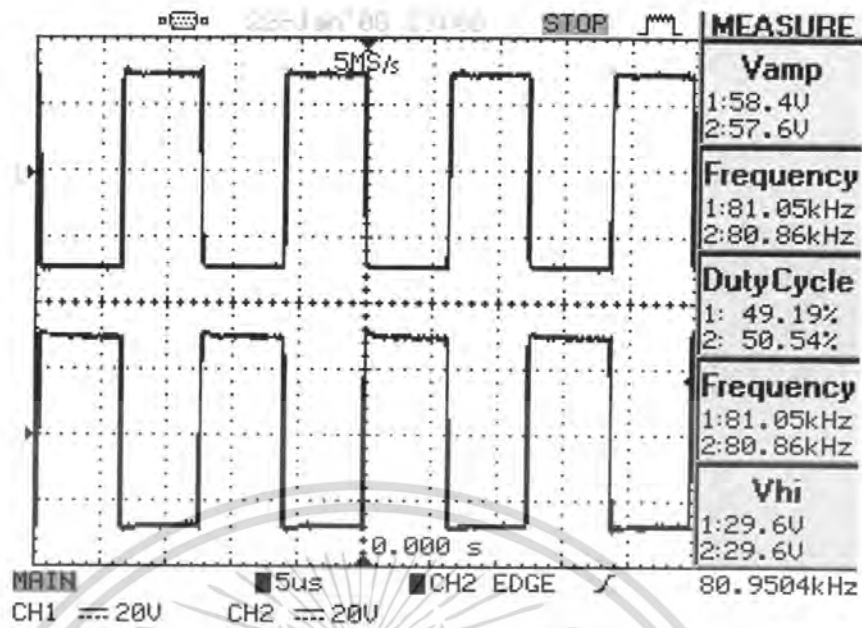
รูปที่ 4.7 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เมื่อผ่านวงจรถิเลย์

Ch.1: สัญญาณเปลี่ยนจากโหมคออนเป็นโหมคอฟ

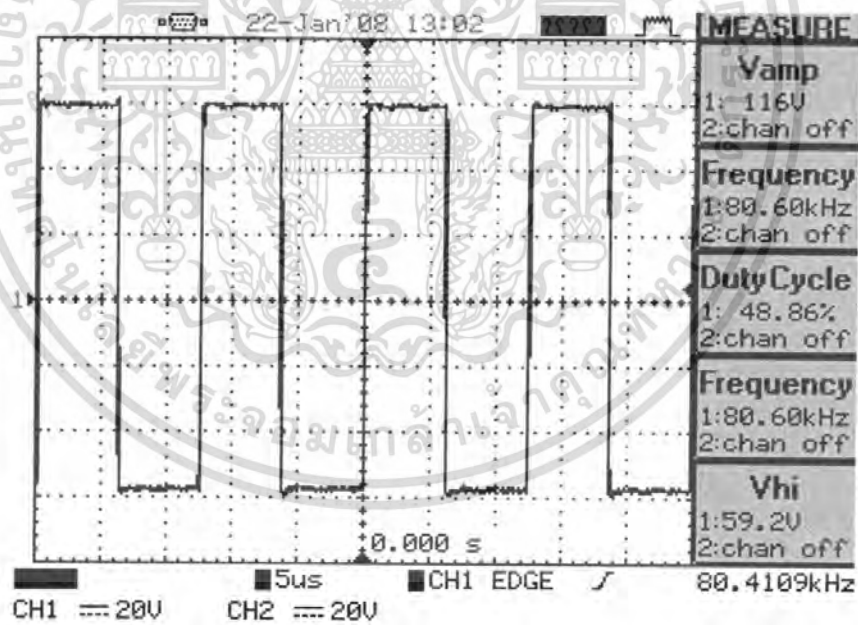
Ch.2: สัญญาณเปลี่ยนจากโหมคอฟเป็นโหมคออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตวัดแบบฮาล์ฟบริดจ์ 2 ช่องสัญญาณ



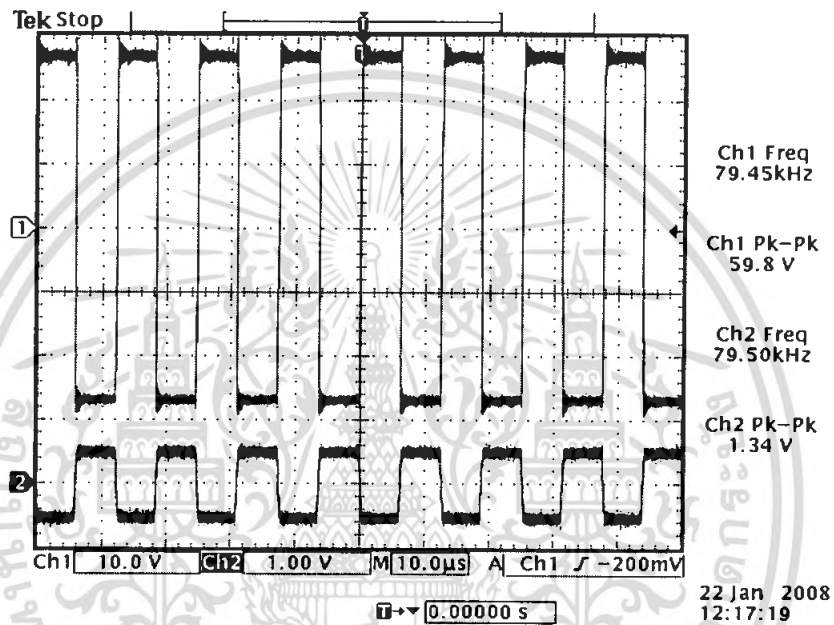
รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตวัดแบบฟูลบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 การทดลองวงจรลดทอนระดับสัญญาณ

### 4.7.1 การทดลองลดทอนระดับสัญญาณผ่านไดโอด

เมื่อเราได้สัญญาณจากวงจรขับกระแสแล้ว เราต้องการนำสัญญาณนี้ป้อนกลับเข้าวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งก่อนจะป้อนกลับเข้าไปนั้น ต้องทำการลดทอนระดับสัญญาณก่อน ซึ่งจะใช่วงจรดังรูปที่ 3.8 โดยสัญญาณนั้น จะผ่านไดโอดที่เชื่อมกราวด์ทั้ง 2 ตัวก่อน ทำให้ระดับสัญญาณเหลือตกคร่อมไดโอดเท่านั้น แล้วทำการวัดระดับสัญญาณที่ผ่านวงจรขับกระแสเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ตกคร่อมไดโอด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



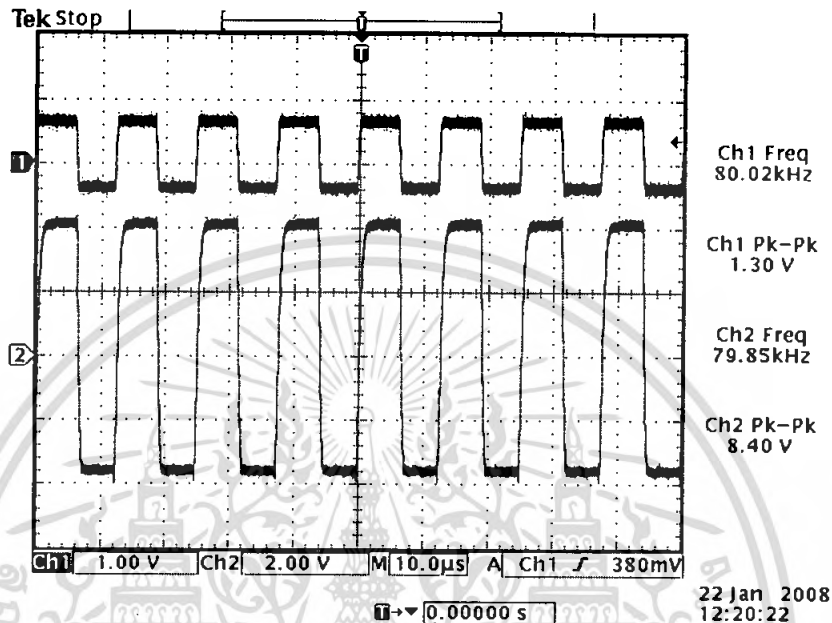
รูปที่ 4.11 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ก่อนและหลังผ่านไดโอด

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์เมื่อผ่านวงจรขับกระแส

Ch.2: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านไดโอด

#### 4.7.2 การทดลองวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

เมื่อสัญญาณถูกลดทอนด้วยไดโอดทั้งสองตัวแล้ว จะนำไปป้อนสู่วงจรขยายสัญญาณผลต่างต่อไป ดังรูปวงจรที่ 3.8 เพื่อขยายสัญญาณให้เหมาะสมต่อการป้อนวนลูปเข้าสู่จรมอดูเลตความกว้างพัลส์ โดยผลการทดลองที่ได้ วัดเปรียบเทียบที่ไดโอดและที่เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณผลต่างดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ก่อนและหลังผ่านวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ก่อนผ่านวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

Ch.2: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรขยายสัญญาณผลต่าง

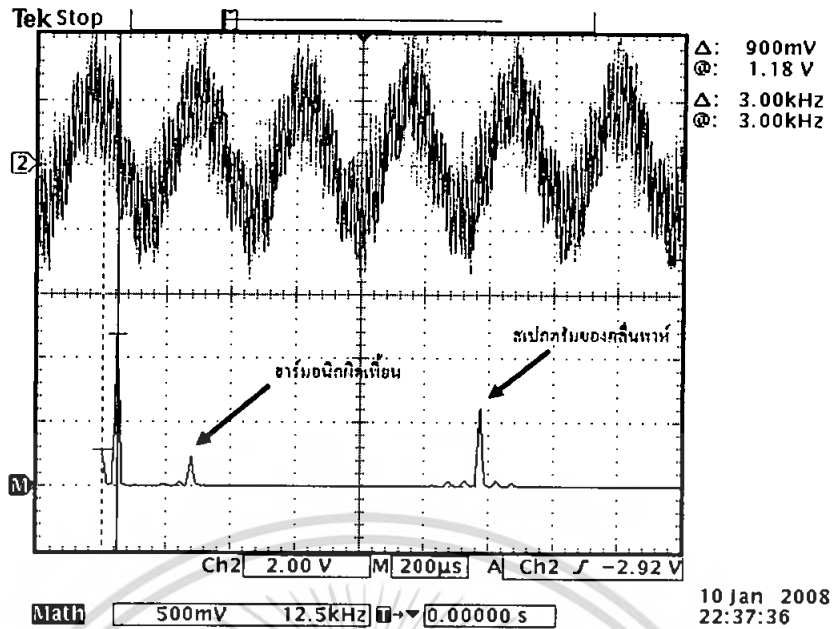
#### 4.8 การทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

##### 4.8.1 การทดลองวัดสัญญาณเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

หลังจากที่สัญญาณออกจากวงจรขับกระแสแล้ว ก่อนที่จะทำการส่งออกไปยังลำโพง จะป้อนสัญญาณเข้าสู่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน เพื่อทำหน้าที่ตัดช่วงความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงออก ซึ่งจากการทดลอง เราได้ทำการป้อนสัญญาณข่าวสารที่ความถี่ 3 kHz และวัดสัญญาณเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

##### 4.8.2 การทดลองวัดสัญญาณทั้งหมดผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

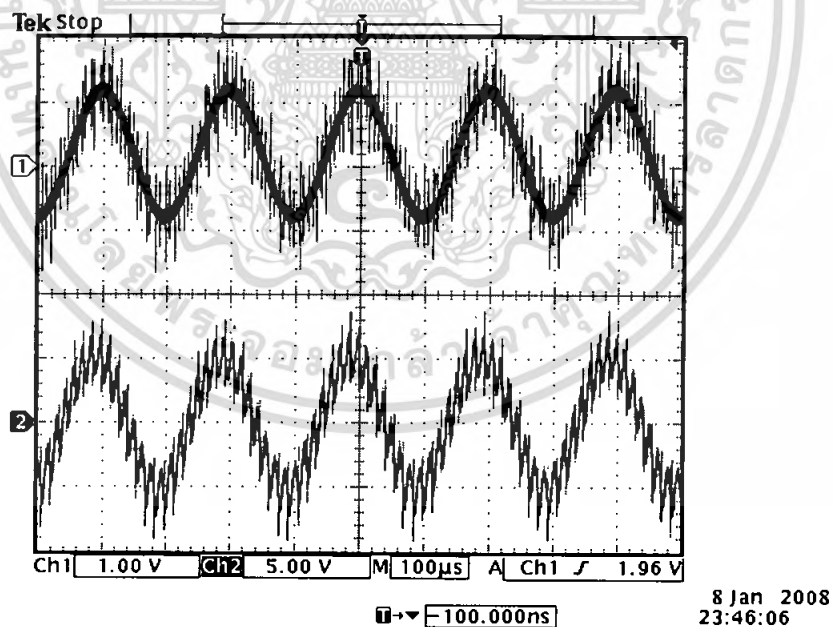
จากการทดลองทั้งหมด จึงได้ทดลองป้อนอินพุตสัญญาณไซน์ความถี่ 5 kHz ขนาด 2 โวลต์เข้าสู่จรมอดูเลตความกว้างพัลส์ และวัดเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

Ch.1: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรขับกระแส

Ch.M: สเปกตรัมสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่าน  
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.14 สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเทียบกับสัญญาณอินพุต

Ch.1: สัญญาณอินพุต

Ch.2: สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.14 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่า 2 โวลต์ และป้อนไฟเลี้ยงวงจรขั้วกระแส  $\pm 28$  โวลต์จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีค่า 12 โวลต์ ซึ่งหาค่าอัตราขยายได้เท่ากับ 15.56 dB

#### 4.8.3 กราฟคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากการทดลอง ได้ป้อนระดับสัญญาณ 1 โวลต์ในหลายๆย่านความถี่ แล้วทำการวัดค่าระดับสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าระดับสัญญาณที่ค่าความถี่ต่างๆ

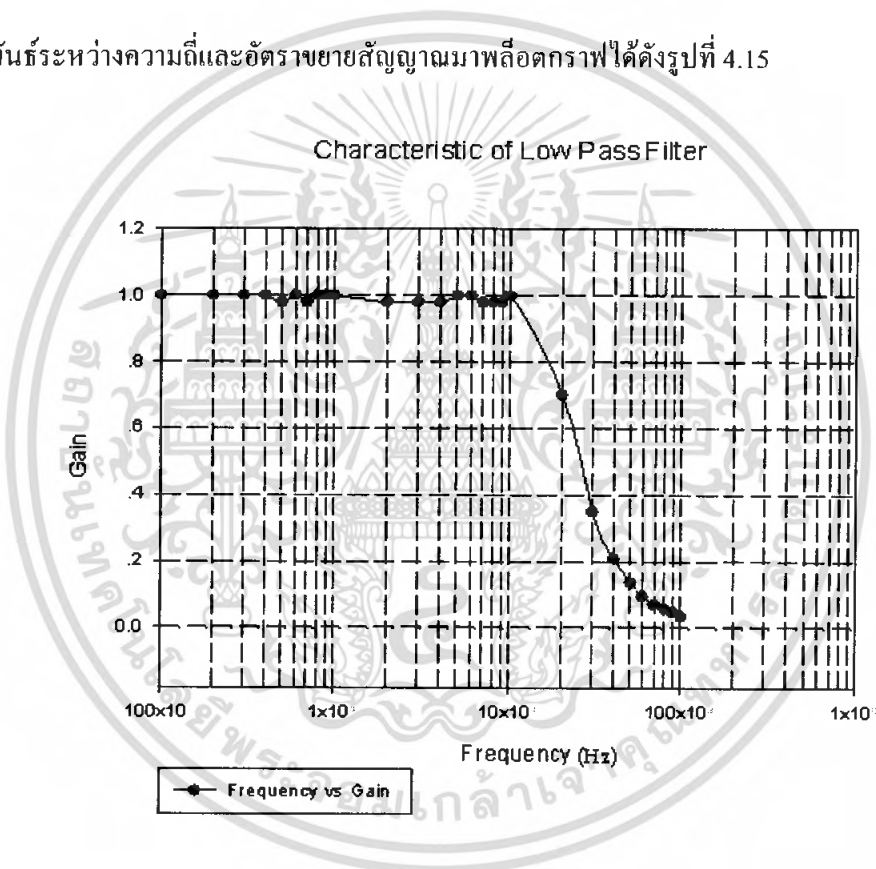
| ความถี่ (Hz) | ระดับสัญญาณ ( $V_{p-p}$ ) | อัตราขยายสัญญาณ $\left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$ |
|--------------|---------------------------|---|
| 100          | 1                         | 1   |
| 200          | 1                         | 1   |
| 300          | 1                         | 1   |
| 400          | 1                         | 1   |
| 500          | 0.98                      | 0.98  |
| 600          | 1                         | 1   |
| 700          | 0.98                      | 0.98  |
| 800          | 1                         | 1   |
| 900          | 1                         | 1   |
| 1 k          | 1                         | 1   |
| 2 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 3 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 4 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 5 k          | 1                         | 1   |
| 6 k          | 1                         | 1   |
| 7 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 8 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 9 k          | 0.98                      | 0.98  |
| 10 k         | 1                         | 1   |
| 20 k         | 0.70                      | 0.70  |
| 30 k         | 0.35                      | 0.35  |
| 40 k         | 0.208                     | 0.208   |
| 50 k         | 0.136                     | 0.136   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวัดค่าระดับสัญญาณที่ค่าความถี่ต่างๆ

| ความถี่ (Hz) | ระดับสัญญาณ ( $V_{p-p}$ ) | อัตราขยายสัญญาณ $\left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$ |
|--------------|---------------------------|---|
| 60 k         | 0.096                     | 0.096   |
| 70 k         | 0.070                     | 0.070   |
| 80 k         | 0.058                     | 0.058   |
| 90 k         | 0.046                     | 0.046   |
| 100 k        | 0.035                     | 0.035   |

นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายสัญญาณมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จะได้ความถี่คัทออฟที่ 20 kHz หรือมีระดับสัญญาณเหลือที่ประมาณ 0.7 โวลต์จากสัญญาณเดิมที่ความถี่ 20 kHz หรือเมื่อขนาดของอัตราขยายลดลงจากค่าสูงสุดไป 3 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 การทดสอบวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion)

ป้อนความถี่สัญญาณอินพุตเป็นค่าคงที่ 3 kHz แล้ววัดสเปกตรัมที่ความถี่ต่างๆเพื่อคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก (THD) ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดสัญญาณที่ความถี่ค่าต่างๆเมื่อทดลองวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

| ลำดับฮาร์โมนิก | ความถี่สัญญาณอินพุต (kHz) | ขนาดสัญญาณ (v) |
|----------------|---------------------------|----------------|
| 1              | 3                         | 1.2            |
| 2              | 6                         | 0.002          |
| 3              | 9                         | 0.006          |
| 4              | 12                        | 0.005          |
| 5              | 15                        | 0.250          |
| 6              | 18                        | 0.005          |
| 7              | 21                        | 0.005          |
| 8              | 24                        | 0.005          |
| 9              | 27                        | 0.005          |
| 10             | 30                        | 0.005          |

นำค่าสัญญาณที่ได้ไปคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมจาก

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{10} c_n^2}{c_1^2} \times 100\%$$

$$THD = \frac{0.002^2 + 0.006^2 + 0.005^2 + 0.250^2 + 0.005^2 + 0.005^2 + 0.005^2 + 0.005^2 + 0.005^2}{1.2^2} \times 100\%$$

$$THD = 0.043\%$$

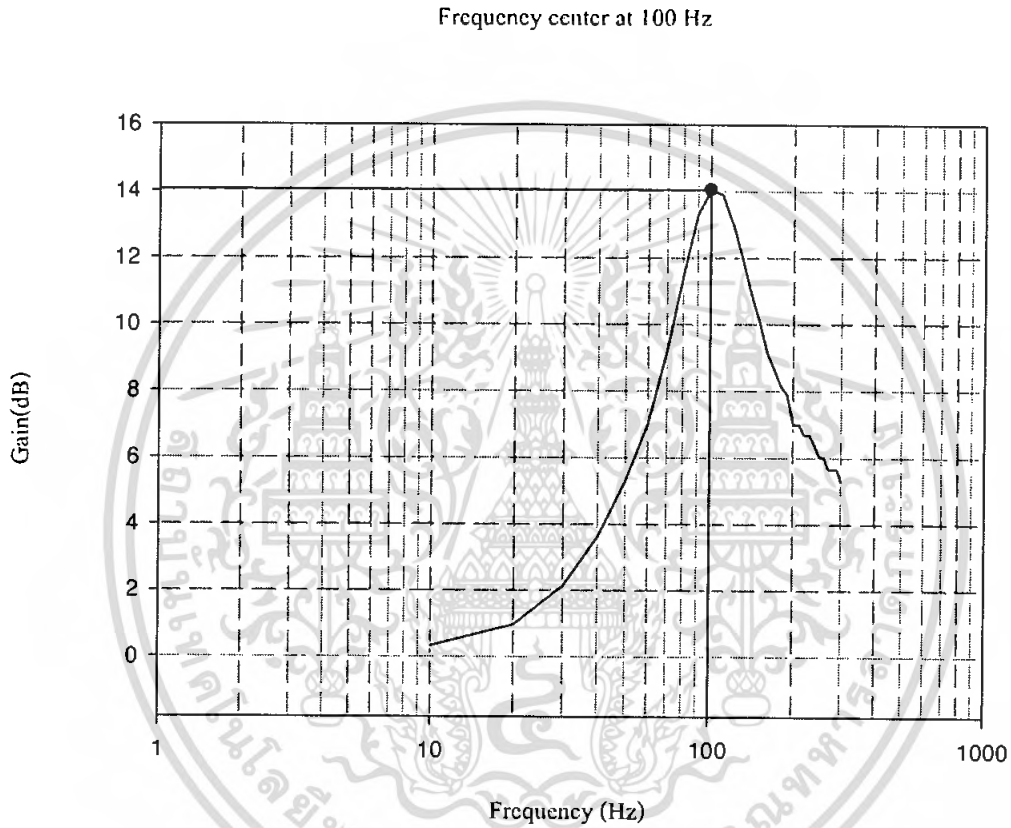
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 การทดลองวงจรอควอไลเซอร์

##### 4.10.1 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลางต่างๆ

จากการทดลอง ได้ป้อนระดับสัญญาณ 1 โวลต์ในหลายๆย่านความถี่ แล้วทำการวัดค่าระดับสัญญาณที่ค่าความถี่ต่างๆ จากนั้นคำนวณค่าอัตราขยายสัญญาณที่ทุกความถี่ แล้วนำความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราขยายสัญญาณมาพล็อตกราฟด้วยสเกล log

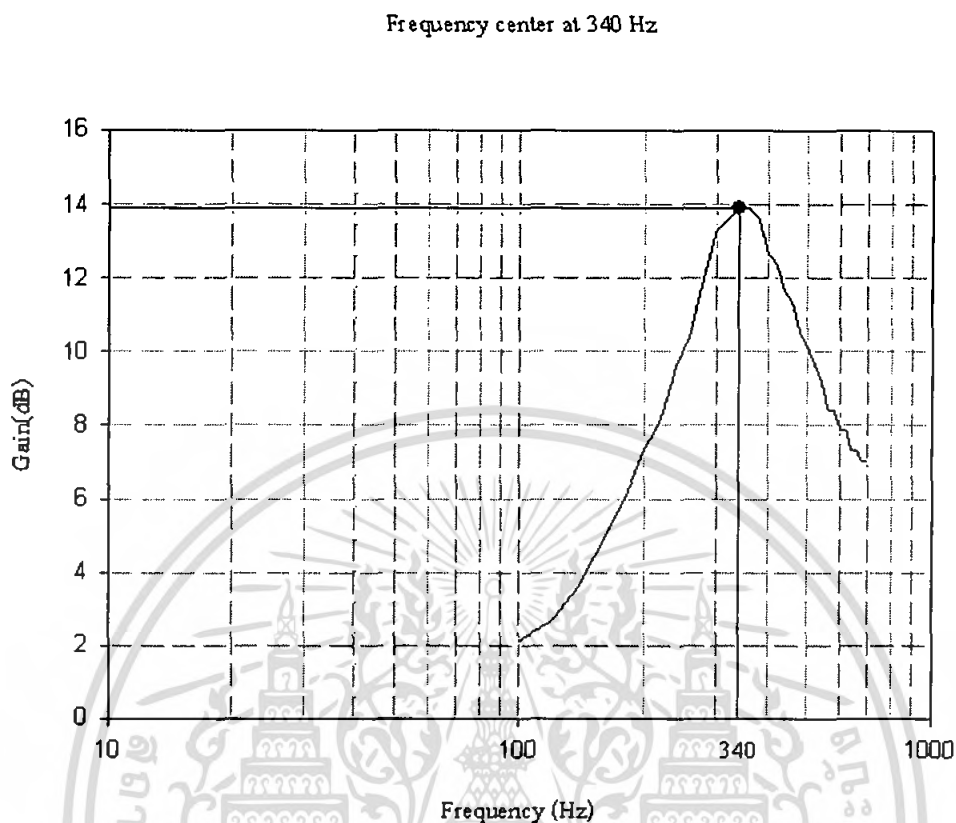
##### 4.10.1.1 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 100 Hz



รูปที่ 4.16 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10.1.2 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 340 Hz

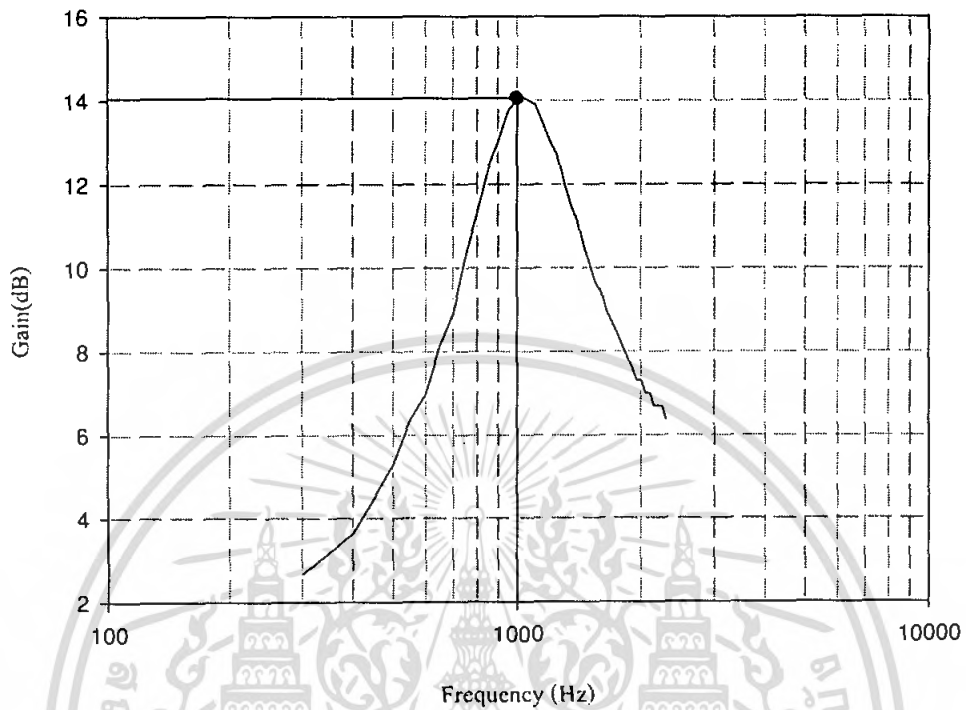


รูปที่ 4.17 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 340 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10.1.3 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 1 kHz

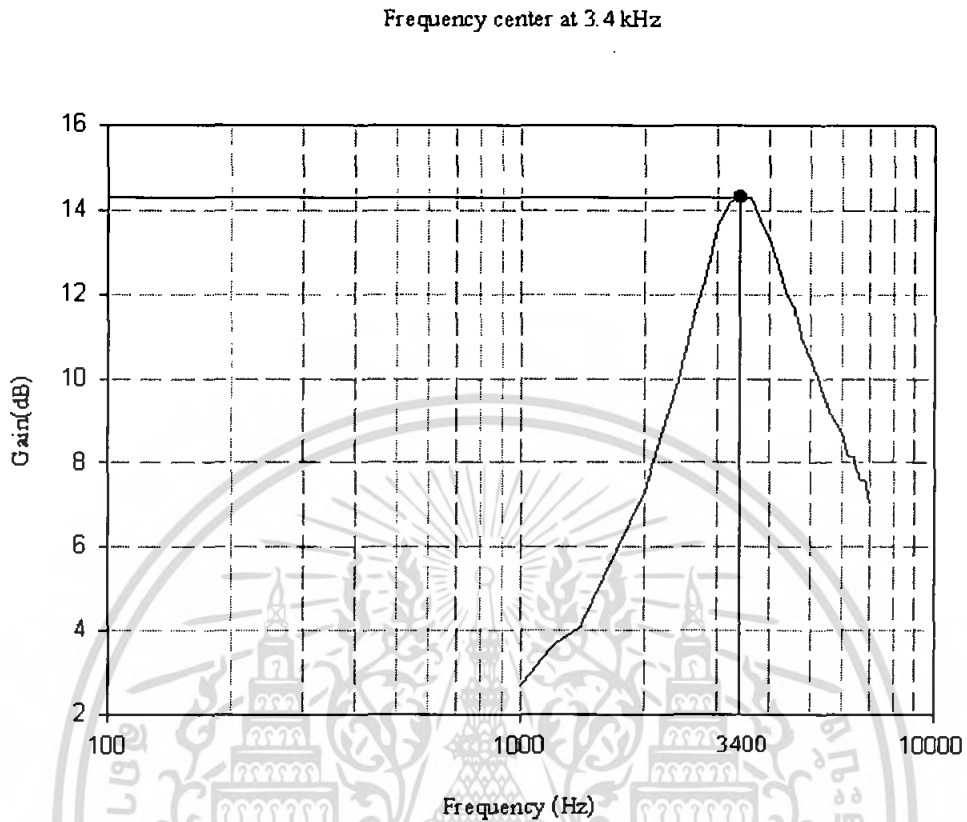
Frequency center at 1 kHz



รูปที่ 4.18 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10.1.4 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 3.4 kHz

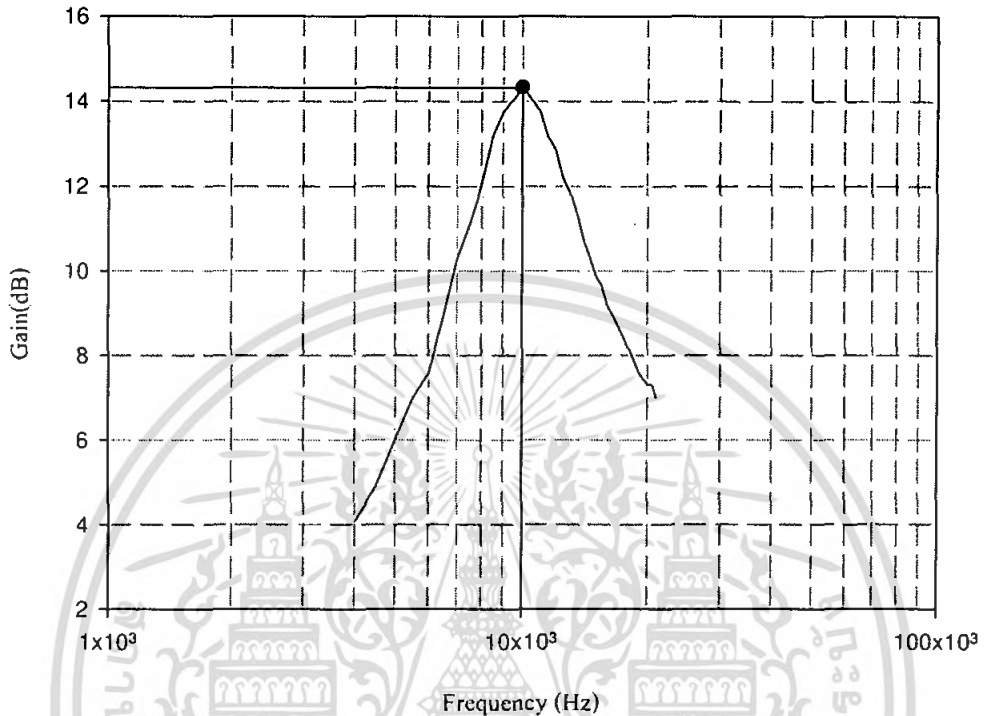


รูปที่ 4.19 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 3.4 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10.1.5 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 10 kHz

Frequency center at 10 kHz



รูปที่ 4.20 กราฟแบนด์พาสที่ความถี่ศูนย์กลาง 10 kHz

โดยค่าอัตราขยายสูงสุดที่แต่ละความถี่แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายสูงสุดที่แต่ละความถี่

| ความถี่ (Hz) | อัตราขยาย (dB) |
|--------------|----------------|
| 100          | 14.05          |
| 340          | 13.91          |
| 1 k          | 14.05          |
| 3.4 k        | 14.32          |
| 10 k         | 14.32          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาขนาดแบนด์วิดท์ที่แต่ละช่วงความถี่ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ช่วงแบนด์วิดท์และความกว้างแบนด์วิดท์ที่แต่ละความถี่

| ความถี่ (Hz) | ช่วงแบนด์วิดท์ (Hz) | ความกว้างแบนด์วิดท์(Hz) |
|--------------|---------------------|-------------------------|
| 100          | 78-138              | 60                      |
| 340          | 272-467             | 195                     |
| 1 k          | 795.5-1400          | 604.5                   |
| 3.4 k        | 2600-4642           | 2042                    |
| 10 k         | 7500-13500          | 6000                    |

ทำการวัดผลวงจรรีควอลไสเซอร์ โดยป้อนสัญญาณขนาด 1 โวลต์ เพื่อวัดค่าสัญญาณที่แต่ละความถี่เมื่อปรับให้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ความถี่นั้นๆมีค่าต่ำสุด แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ขนาดสัญญาณที่แต่ละความถี่เมื่อปรับให้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ความถี่นั้นๆมีค่าต่ำสุด

| ความถี่ (Hz) | ขนาดสัญญาณ (mv) | อัตราขยาย (dB) |
|--------------|-----------------|----------------|
| 100          | 220             | -13.15         |
| 340          | 220             | -13.15         |
| 1 k          | 220             | -13.15         |
| 3.4 k        | 240             | -12.39         |
| 10 k         | 240             | -12.39         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.11 การคำนวณหาค่า Q (Quality factor)

คำนวณหาค่า Q จากสมการ

$$Q = \frac{W_0}{BW}$$

โดย  $W_0$  คือค่าความถี่ศูนย์กลาง (Hz)

$BW$  คือแบนด์วิดท์ (Hz)

ผลการคำนวณ

$$\text{ที่ความถี่ 100 Hz} \quad Q_{100 \text{ Hz}} = \frac{100}{(138-78)} = 1.67$$

$$\text{ที่ความถี่ 340 Hz} \quad Q_{340 \text{ Hz}} = \frac{340}{(467-272)} = 1.74$$

$$\text{ที่ความถี่ 1 kHz} \quad Q_{1 \text{ kHz}} = \frac{1000}{(1400-795.5)} = 1.65$$

$$\text{ที่ความถี่ 3.4 kHz} \quad Q_{3.4 \text{ kHz}} = \frac{3400}{(4642-2600)} = 1.66$$

$$\text{ที่ความถี่ 10 kHz} \quad Q_{10 \text{ kHz}} = \frac{10000}{(13500-7500)} = 1.67$$

#### 4.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจร

คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรตามสมการ (2.2) โดยป้อนไฟเลี้ยง  $\pm 28$  โวลต์เข้าวงจรขับกระแส

$$P_{DC(in)} = V_{Supply} \times I_{Supply} = 28V \times 1.2A = 33.6W$$

$$P_{RF(Out)} = \frac{v_p^2}{R} = \frac{22^2/2}{8} = 30.25W$$

เมื่อ  $V_{Supply}$  คือระดับแรงดันไฟเลี้ยงวงจรขยายกำลัง

$I_{Supply}$  คือกระแสจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรขยายกำลัง

$v_p$  คือค่าครึ่งหนึ่งของระดับความต่าง ระหว่างระดับแรงดันสูงสุด

และระดับแรงดันต่ำสุดของสัญญาณเอาต์พุต

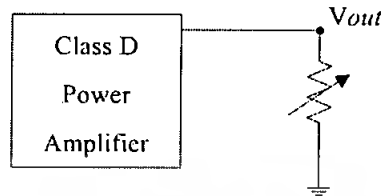
และได้ประสิทธิภาพดังนี้ 
$$\eta = \frac{P_{RF(Out)}}{P_{DC(in)}} \times 100 = 90.03\%$$

ส่วนค่า Dynamic Range =  $100mV_{p-p} - 1.4V_{p-p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.13 การวัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output Impedance)

การวัดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์นั้น วัดได้โดยนำตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่อทางภาคเอาต์พุต แล้วปรับค่าตัวต้านทานจนกระทั่งระดับสัญญาณได้ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณเดิม แล้ววัดหาค่าความต้านทานจากตัวต้านทานปรับค่าได้นั้น จะได้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ออกมา

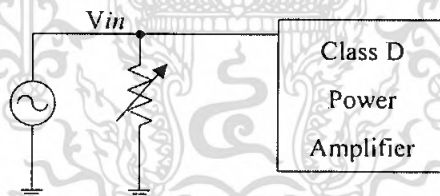


รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการวัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้หรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์นั้นเท่ากับ 10 โอห์ม

#### 4.14 การวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

การวัดอินพุตอิมพีแดนซ์นั้น วัดโดยนำตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่อทางภาคอินพุต แล้วปรับค่าตัวต้านทานจนกระทั่งระดับสัญญาณได้ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณเดิม แต่การวิเคราะห์หาอินพุตอิมพีแดนซ์นั้น ต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณและของวงจรมายกกำลังสัญญาณคลาสิกอีกด้วย



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างการวัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์

ซึ่งจากการทดลองจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 600 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุปผล

#### 5.1 บทวิจารณ์

ในส่วนของวงจรมอดูเลตที่อาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบความกว้างพัลสนั้นยังมีข้อเสียเนื่องจากสัญญาณรบกวนซึ่งอาจถูกขยายกำลังรวมออกมากับสัญญาณเอาต์พุต ส่วนการป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะมอดูเลตได้นั้น จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดความผิดเพี้ยนได้ซึ่งในการทดลองนี้ได้จำกัดขนาดสัญญาณอินพุตไว้ด้วยวงจรจำกัดระดับแรงดัน

ปัญหาที่พบอีกอย่างก็คือการทำงานแบบลูปปิด เมื่อมีโหลดจากลำโพงต่ออยู่ก่อนที่วงจรจะเริ่มทำงาน บางครั้งจะส่งผลให้วงจรรวมทั้งหมดไม่ทำงาน ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเชื่อมต่อลำโพงเข้าระบบ หลังจากที่ยังวงจรทั้งหมดเริ่มทำงานแล้ว

นอกจากนี้ยังมีการเกิดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในจังหวัดที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวสลับโหมคการทำงานและเกิดการสูญเสียกำลังงานซึ่งเกิดจากการทำงานไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์อีกด้วย ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ยังต้องนำมาพิจารณาในการสร้างวงจรขยายกำลังเพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพและเพื่อให้ได้คุณภาพเสียงสูงสุดตามที่ต้องการ

#### 5.2 บทสรุป

จากการทดลองได้นำเสนอวงจรขยายกำลังคลาสดีฟูลบริดจ์แบบลูปปิด โดยมีอิกควอไลเซอร์แบบแอนะล็อกทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณอินพุตในย่านความถี่ต่างๆ ให้ลดหรือเพิ่มระดับสัญญาณได้ตามที่ต้องการ เมื่อสัญญาณผ่านวงจรปรับระดับเสียงหลักและวงจรจำกัดระดับแรงดันให้เหมาะสมกับวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์แล้วผ่านการขยายกำลังแบบสวิดซิ่ง ซึ่งเป็นการขยายกำลังที่มีประสิทธิภาพสูง และในทางทฤษฎีจะมีประสิทธิภาพถึง 100% แต่ในทางปฏิบัติจริง ประสิทธิภาพจะไม่เป็นดั่งนั้น แต่วัดได้ 90.03% จากการทดลอง และยังได้สัญญาณเดิมที่ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีกำลังงานสูงขึ้น ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมต่ำ นอกจากนี้ยังปรับเพิ่มเกนการขยายกำลังได้จากการปรับค่าแรงดันไฟเลี้ยงทรานซิสเตอร์ได้ตามต้องการด้วย ทั้งนี้ในการทดลองใช้ค่าแรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 28$  โวลต์ และจำกัด Dynamic Range ที่  $100mV_{p-p} - 1.4V_{p-p}$  จากนั้นคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมได้ 0.043% และวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านการขยายกำลังได้ 30.25 วัตต์ วัดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 10 โอห์มและอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 600 โอห์ม

## เอกสารอ้างอิง

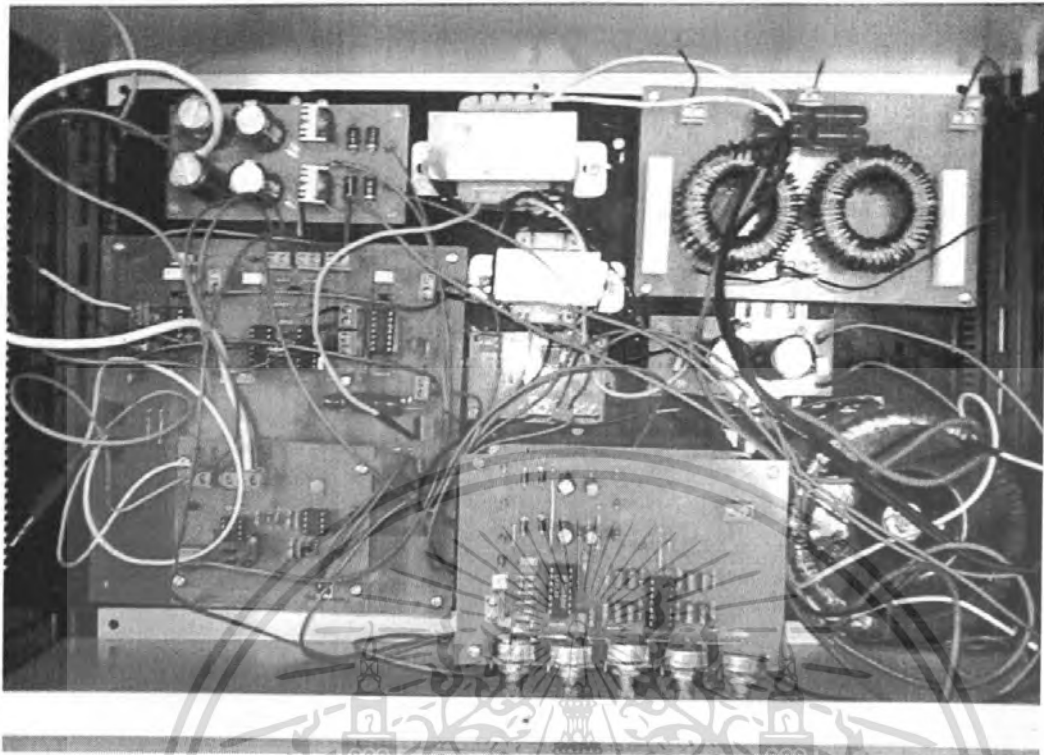
- [1] กฤษณะ ทวางศ์ยศ, ประภัสชัย อุ่นอกพันธ์, “เครื่องขยายเสียงที่สามารถปรับแต่งเสียงได้เฉพาะความถี่,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [2] ชานนท์ ศรีน้อย, อรรถกร ฉายรัศมี, “อีควอไลเซอร์,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [3] จูติ วังสโรจน์, ณัฐพล จันดี, นริศ อิ่มพงษ์, “เครื่องขยายเสียงประสิทธิภาพสูง,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [4] ทวี ปือกฝ้าย, ชिरพันธ์ บูรณ์จินดา, “ดิจิตอล อีควอไลเซอร์,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [5] ชวัชชัย จิรรังคานนท์, นวชัย เกียรติก่อเกื้อ, “เครื่องปรับแต่งเสียงอัตโนมัติ,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
- [6] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, “หลักการไฟฟ้าสื่อสาร,” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่สอง, 2534.
- [7] ไพฑูรย์ ก้องกานน, อ้อมบุญย์ สุคันธ์กาญจน์, “วงจขยายกำลังแบบสวิทซ์ซิ่ง,” 2547.
- [8] มนตรี ศิริปรัชญานันท์, “การศึกษาวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรมอดูเลชัน PWM ที่สามารถควบคุมด้วยกระแสอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยอาศัยหลักการวงจรรวม,” 2547.
- [9] มนตรี ศิริปรัชญานันท์, “เอกสารประกอบการสอน วิชาการออกแบบวงจรมอดูเลชันอิเล็กทรอนิกส์,” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
- [10] ยืน ภู่วรรณ, “ทฤษฎีและการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์,” เล่ม 1, 2534.
- [11] วิวัฒน์ กิรานนท์, “วิศวกรรมการสื่อสาร,” อักษรสยามการพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรกฎาคม 2542.
- [12] สุร โชค ธนพิทักษ์, โสฬส ดวงมี, อุดมสุข ไหมเอี่ยม, “วงจขยายกำลังแบบสวิทซ์,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [13] อักษร วิไลนาโชนชัย, “วงจขยายกำลังประสิทธิภาพสูง,” วิทยุยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปส่วนประกอบภายในวงจรขยายกำลังที่มีพื้นฐานอยู่บนการมอดูเลตความกว้างสัญญาณพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้