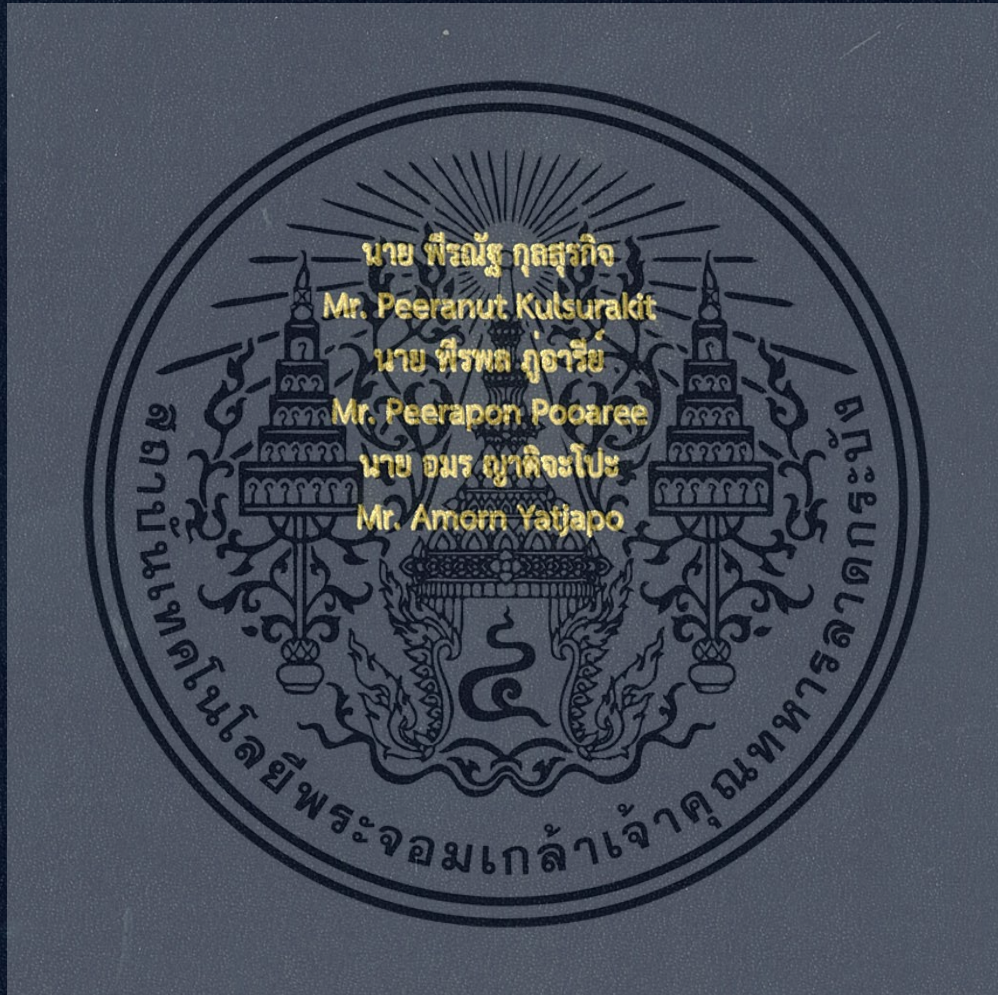


เครื่องขยายเสียงแบบ PWM
PWM Audio Power Amplifier



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

เครื่องขยายเสียงแบบ PWM

PWM Audio Power Amplifier



T143919

โดย

นาย พีรณัฐ กุศลสุรกิจ

นาย พีรพล ภู่อารีย์

นาย อมร ญาติจะโปะ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ประภากร สุวรรณะ



เลขหมู่.....143919
เลขทะเบียน.....04 ต.ค. 2559
วันเดือนปี.....

b. 1431054x
f.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องขยายเสียงแบบ PWM

PWM Audio Power Amplifier

ผู้จัดทำ	นายพีรณัฐ กุลสุรกิจ	รหัสประจำตัว	55010872
	นายพีรพล ภู่อารีย์	รหัสประจำตัว	55010878
	นายอมร ญาติจะโปะ	รหัสประจำตัว	55011425

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องขยายเสียงแบบ PWM
นักศึกษา	นายพีรณัฐ กุลสุรกิจ รหัสประจำตัว 55010872
	นายพีรพล ภู่อารีย์ รหัสประจำตัว 55010878
	นายอมร ญาติจะโปะ รหัสประจำตัว 55011425
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ.ประภากร สุวรรณะ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้อธิบายถึงการออกแบบเครื่องขยายเสียงแบบ PWM หรือคลาสดี ที่มีคุณสมบัติคือ ประสิทธิภาพสูง และมีกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนที่น้อยกว่าคลาสเอบี โดยที่วงจรขยายเสียงคลาสดีจะแปลง สัญญาณขาเข้าให้กลายเป็นคลื่นแบบความกว้างของแถบคลื่นที่เรียกกันว่า Pulse Width Modulation (PWM) ในลักษณะรูปคลื่นที่เป็นแบบ square wave ขณะที่สัญญาณเสียงทั่วไปจะเป็นแบบ sine wave โดยในการ ออกแบบเราใช้ Hip4080AIPZ ในการสร้างวงจรมอดูเลชันความกว้างพัลส์ (PWM) ใช้สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตที่เป็น sine wave และ HIP4080AIPZ นั้นก็ทำหน้าที่เป็นวงจรขับเคลื่อนอีกด้วย แล้วจึงส่งต่อให้กับส่วน Power Stage ที่ใช้โมสเฟตชนิด N-type เบอร์ IRF640 แบบ Full Bridge Topology มี วงจร Feedback เพื่อใช้ในการลดทอนสัญญาณผิดเพี้ยนของสัญญาณขาออก และวงจร Low Pass Filter เพื่อ กรองความถี่สูงทิ้งไป เนื่องจากต้องการเปลี่ยนสัญญาณ square wave ให้เป็นสัญญาณ sine wave โดยการ ทดลองวงจรในขั้นแรกคือ ทดสอบความตอบสนองของความถี่ โดยทดสอบจากความถี่ต่ำที่ 50 Hz ถึงความถี่สูงที่ 20 KHz เพื่อวัดแรงดันด้านทางออกว่าเสถียรหรือไม่ และตรวจสอบความเพี้ยน

Thesis Title	PWM Audio Power Amplifier
Student	Mr. Peeranut Kulsurakit ID 55010872 Mr. Peerapon Pooaree ID 55010878 Mr. Amorn Yatjapo ID 55011425
Degree	Bachelor of Engineering
Department	Electronics Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assist. Prof. Prapakorn Suwanna

Abstract

This report describes the design about PWM Audio Power Amplifier (Class D) have Featuring high performance and There was a power loss of heat than Class AB. The class D Power Amplifier will convert incoming signals into a spectrum width of the band as well Pulse Width Modulation (PWM) In the waveform is a square wave When the signal is typically a sine wave By design, we used HIP4080AIPZ to create pulse width modulation (PWM) .Use the triangular waveform signal is compared with the input signal sine wave and use HIP4080AIPZ to gate driver circuit Then forwarded to the Power State The MOSFET N-type number IRF640 connect Full Bridge Topology and Circuit Feedback use for reduce distortion of signal output. Circuit Low Pass Filter to filter the high frequency signal for change square wave signal to sine wave signal. Experimentation by first frequency response test at different frequency since low frequency about 50 Hz to high frequency about 20 KHz measure output voltages is stable and check the distortion. Second test maximum electric power. Last test the efficacy.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องเครื่องขยายเสียงคลาสดีนั้นประกอบด้วย ชี้นำงาน รายงาน และการนำเสนอ ซึ่งโครงการนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อ.ประภากร สุวรรณะ รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ ท่านอื่นๆ จึงทำให้สามารถแก้ปัญหาและทำให้เกิดชิ้นงานนี้ได้และคุณพี่เฉลิมพล พลอยน้ำเงิน ที่ช่วยสนับสนุนอุปกรณ์ ขดลวดเหนียวนำในการใช้งานภาพในวงจร

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณเพื่อนๆในห้องโปรเจกต์ที่คอยให้กำลังใจและให้ยืมอุปกรณ์ในการทำโครงการครั้งนี้



พีรณัฐ กุลสุรกิจ
พีรพล ภู่อารีย์
อมร ญาติจะโปะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5เค้าโครงรายงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครื่องขยายเสียงคลาสดี(Class D)	3
2.2 Pulse width modulation	4
2.2.1 ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)	5
2.2.2 การมอดูเลตทางความกว้างของพัลส์ PWM	6
2.3 วงจรขั้วเกต	12
2.4 MOSFET	12
2.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	21
2.6 Negative Feedback	24
2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)	26
2.8 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)	29
2.9 วงจรกรองสัญญาณ (Ripple Filter)	32

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ	
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	34
3.2 วงจร Pulse width modulation และ Power state	35
3.3 วงจร Feedback.....	36
3.4 วงจร Low Pass Filter	37
3.5 การคำนวณ	37
3.5.1 หาค่าความถี่ของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม.....	37
3.5.2 หาค่าอัตราขยายของวงจร.....	38
3.5.3 หาค่าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ ในวงจร Low Pass Filter.....	40
3.5.4 หาค่าความถี่คัทออฟ.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 รูปสัญญาณขาออกของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม	42
4.2 สัญญาณ Gate drive	43
4.3 สัญญาณขาออกของ Output เมื่อยังไม่ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	45
4.4 สัญญาณหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 15 KHz ของวงจร Differential Amplifier.....	46
4.5 สัญญาณเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	47
4.6 การทดสอบ Frequency response	48
4.7 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ทางออก (Maximum Electric Power).....	53
4.8 การทดสอบประสิทธิภาพ (Efficiency).....	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไตอะแกรมวงจรเครื่องขยายเสียงคลาสดี.....	3
2.2 การสร้างของสัญญาณ Pulse Width Modulation	4
2.3 กราฟ Duty cycle = (ช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิก high/คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ) X100%	5
2.4 การเปรียบเทียบสัญญาณมอดูเลตกับสัญญาณพาหะ.....	6
2.5 ลักษณะของวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตชั้น.....	7
2.6 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตชั้น.....	8
2.7 ลักษณะของค่าดิวตีไซเคิล (Duty Cycle).....	9
ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตชั้น	
2.8 ลักษณะของค่าดิวตีไซเคิล (Duty Cycle).....	10
ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ (V_{in}) กับค่าของ (V_{ref})	
2.9 สัญญาณลักษณะ N-channel MOSFET และ P-channel MOSFET	12
2.10 โครงสร้าง และ ตัวเก็บประจุแฝงภายใน.....	14
2.11 กรณีที่ $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$	15
2.12 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อย.....	16
2.13 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$	17
2.14 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(Sat)}$ หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$	18
2.15 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน และแรงดันที่ขาเดรนกับขอส.....	19
2.16 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$	20
2.17 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ.....	21
และกราฟอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (db)	
2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ Resistor กับ Capacitor	22
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์.....	22
กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
2.20 block diagram ของการป้อนกลับแบบลบ	25
2.21 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ.....	26
2.22 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 (ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ข, ค) ทิศทางของกระแส 32	
ในขณะ V_{AC} (ข) เป็นบวก (ค) เป็นลบ	
2.24 การทำงานของตัวเก็บประจุกรองไฟในสถานะที่มีโหลด..... 33	
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม..... 34	
3.2 วงจร Pulse width modulation และ Power state 35	
3.3 วงจร Feedback 36	
3.4 วงจร Low Pass Filter 37	
3.5 วงจร Feedback เพื่อการคำนวณ 39	
4.1 Output ของวงจรถูกกำเนิดสามเหลี่ยม..... 42	
4.2 สัญญาณ Output Gate drive ของ MOSFET Q1 และ Q4 43	
4.3 สัญญาณ Output Gate drive ของ MOSFET Q3 และ Q2 44	
4.4 สัญญาณ Output เมื่อยังไม่ต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน..... 45	
4.5 สัญญาณ Output เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ของวงจร Differential Amplifier 46	
4.6 สัญญาณ Output ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน..... 47	
4.7 กราฟ Frequency response ของวงจรขยายส่วนแรก..... 49	
4.8 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 50 Hz 49	
4.9 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 100 Hz..... 49	
4.10 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 200 Hz..... 49	
4.11 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 500 Hz..... 49	
4.12 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 1 KHz..... 50	
4.13 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 5 KHz..... 50	
4.14 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 10 KHz..... 50	
4.15 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 20 KHz..... 50	
4.16 กราฟ Frequency response ของวงจรขยายส่วนสอง..... 51	
4.17 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 50 Hz..... 52	
4.18 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 100 Hz..... 52	
4.19 สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 200 Hz..... 52	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.20	สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 500 Hz.....	52
4.21	สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 1 KHz.....	52
4.22	สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 5 KHz.....	52
4.23	สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 10 KHz.....	53
4.24	สัญญาณของ Output ที่ความถี่ 20 KHz.....	53
4.25	กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจร PWM Power Amplifier วงจรที่ 1.....	54
4.26	กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจร PWM Power Amplifier วงจรที่ 2.....	55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 Frequency response ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$	48
4.2 Frequency response ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$	51
4.3 ประสิทธิภาพของ PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1	56
4.4 ประสิทธิภาพของ PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เครื่องขยายเสียง (Audio Amplifier) เป็นเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ก้าวหน้าและมีความจำเป็นต่อชีวิตของคนเรามากไม่ว่าจะเป็นเครื่องบันทึกเสียง เครื่องรับวิทยุ และระบบเสียงของโทรทัศน์ โดยต้องการให้เสียงนั้นมีความชัดเจนไม่มีเสียงรบกวนสอดแทรก มีเสียงเหมือนจริงตามธรรมชาติ และมีความไพเราะรื่นหูถือได้ว่ามีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งช่วยในการเผยแพร่ข้อมูลข่าวสาร เสียงเพลง ความบันเทิงทุกรูปแบบ และอีกหลาย ๆ ด้าน เครื่องขยายเสียงหรือเรียกว่าเพาเวอร์แอมป์ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องมีอยู่ด้วยกันหลายคลาส เช่น คลาส A คลาส B คลาส AB คลาส D เป็นต้น ซึ่งแต่ละคลาสก็จะมีหลักการและรูปแบบวงจรภาคขยายต่างกันและมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไปซึ่งคลาส D เป็นเครื่องขยายเสียงที่มีประสิทธิภาพสูงมีความร้อนสะสมน้อย

เมื่อยุคของความเป็นดิจิทัลได้เกิดขึ้นสิ่งของเครื่องใช้ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ต่างก็พยายามปรับปรุงตัวเองจากรูปแบบอนาล็อกมาเป็นดิจิทัลด้วยเหตุผลทางการตลาดแต่มันก็ไม่ได้เกิดขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด และปัจจุบันก็ยังคงมีอุปกรณ์บางอย่างที่ยังคงจำเป็นต้องใช้ในรูปแบบอนาล็อกอยู่

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างและออกแบบวงจรขยายของเครื่องขยายเสียง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและใช้งาน Pulse Width Modulation
- 1.2.3 สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาโปรเจกต์หัวข้อเรื่องเครื่องขยายเสียงแบบคลาส D โดยระยะเวลาในการศึกษา ตั้งแต่ เดือน มกราคมถึงเดือนเมษายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ศึกษาการรับสัญญาณ Pulse Width Modulation แล้วทำการบันทึกการตอบสนองของวงจร ในรูปแบบของรูปสัญญาณและความผิดพลาดเชิงเวลาที่ขาออกที่สัมพันธ์กับสัญญาณขาเข้า และแรงดันที่จ่ายเข้าไปให้กับวงจร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความรู้ในการออกแบบเครื่องขยายเสียงแบบคลาส D

1.4.2 ได้รู้จักการทำงานของสัญญาณ Pulse Width Modulation

1.4.3 ได้ความรู้เรื่องการคำนึงถึงของสัญญาณที่มีความถี่สูงที่สัมพันธ์กับการออกแบบวงจร

1.4.4 สามารถนำไปใช้ได้จริงและนำไปประยุกต์ใช้ได้ภายในชีวิตประจำวัน

1.5 คำโครงรายงาน

รายงานฉบับนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องขยายเสียงสเตอริโอ ซึ่งใช้เวลาการทำโปรเจกหนึ่งภาคการศึกษาโดยเนื้อหาอันจะมีหลายส่วนด้วยกันแยกเป็นบทๆ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงาน

บทที่ 3 การออกแบบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

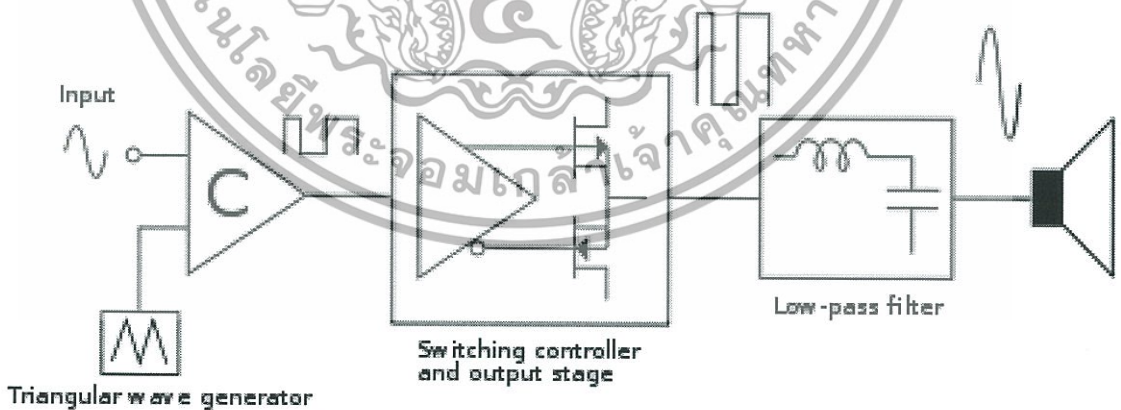
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรขยายคลาสดี (Class D)

เครื่องขยายเสียงคลาสดีเป็นการผสมผสานระหว่างอนาล็อกและดิจิทัลหรือกล่าวได้ว่าเป็นดิจิทัลไม่ครบร้อยเปอร์เซ็นต์นั่นเอง เนื่องจากกระบวนการทางด้านสัญญาณยังใช้รูปแบบของอนาล็อกในบางส่วนเช่น การใช้สัญญาณพื่นเลื่อยในการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดหรือสัญญาณพัลส์ที่ปรับค่าคาบเวลาได้นั่นเอง (ในความเห็นของผู้เขียน คำว่า "ดิจิทัล" ต้องเป็นค่า ตรรกะ คือ "1" กับ "0" หรือ Hi-Low และมีค่าคาบเวลาที่คงที่ โดยมีสัญญาณนาฬิกาหลักเป็นตัวอ้างอิงในกระบวนการประมวลผล)

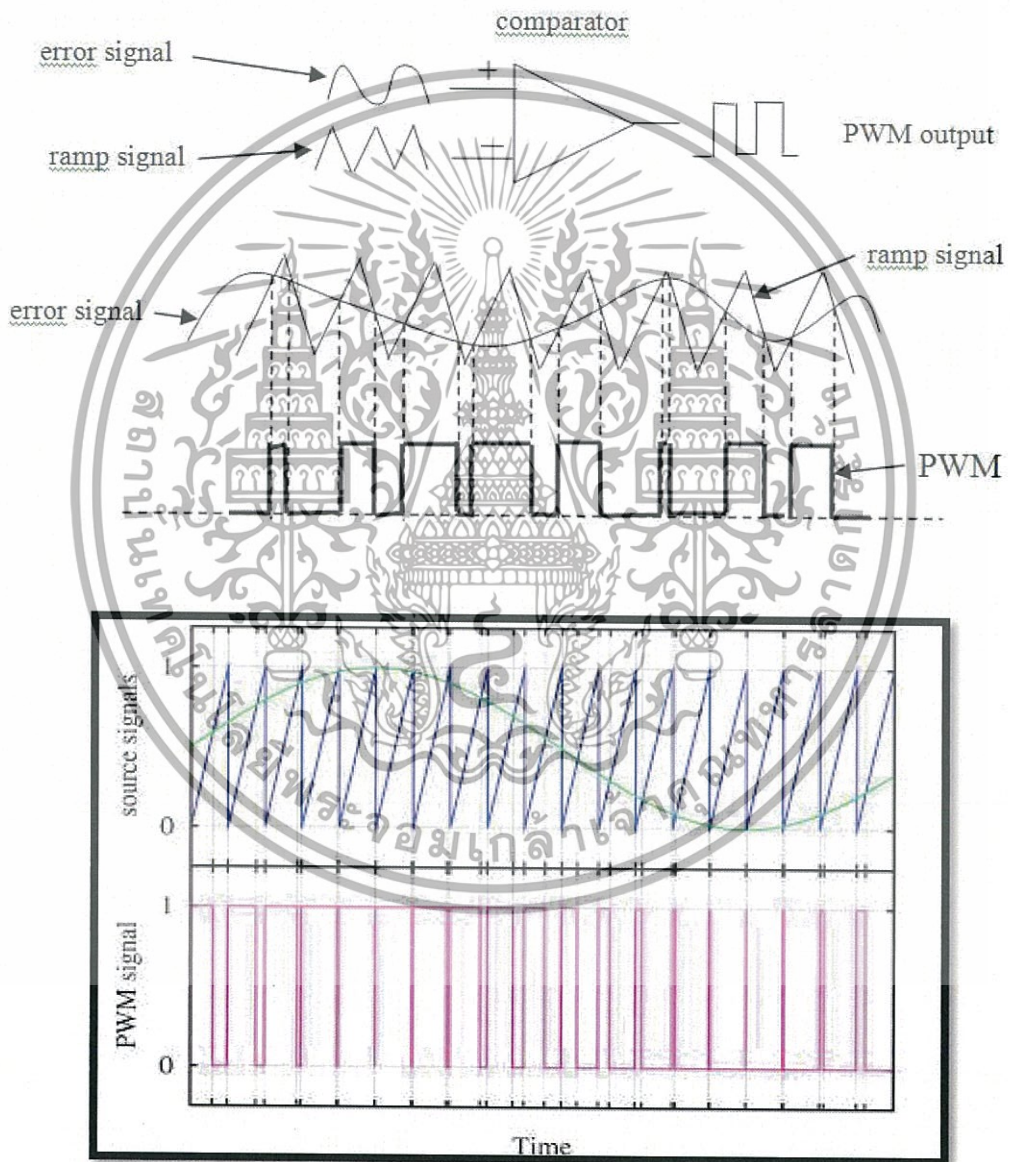
เมื่อได้สัญญาณพัลส์ออกมาแล้วก็นำไปขยายให้ใหญ่ขึ้นอีกทีแล้วทำการกรองความถี่สูงออกและดึงเอาเฉพาะความถี่ที่ใช้งานออกสู่ลำโพงซึ่งเป็นหลักการโดยรวมซึ่งก็ยังมีรูปแบบของการทำงานของอนาล็อกอยู่นั่นเอง ส่วนที่เป็นรูปแบบดิจิทัลจะเป็นส่วนของการลด-เพิ่มของขนาดสัญญาณที่ควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์ การแสดงผลทางจอแสดงผล การควบคุมสิ่งงาน เป็นต้น รูปแบบของวงจรขยายเสียงคลาสดี แสดงเป็นไดอะแกรมแบบคร่าวๆดังรูปตัวอย่าง



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมวงจรเครื่องขยายเสียงคลาสดี

2.2 Pulse width modulation

PWM ย่อมาจาก Pulse Width Modulation คือ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกับกันและสองสัญญาณที่ว่านี้ก็คือ สัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างของพัลส์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมก็จะได้สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างคงที่



รูปที่ 2.2 การสร้างของสัญญาณ Pulse Width Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าเราจะไม่ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง แต่เรานำสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มันจะเกิดพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

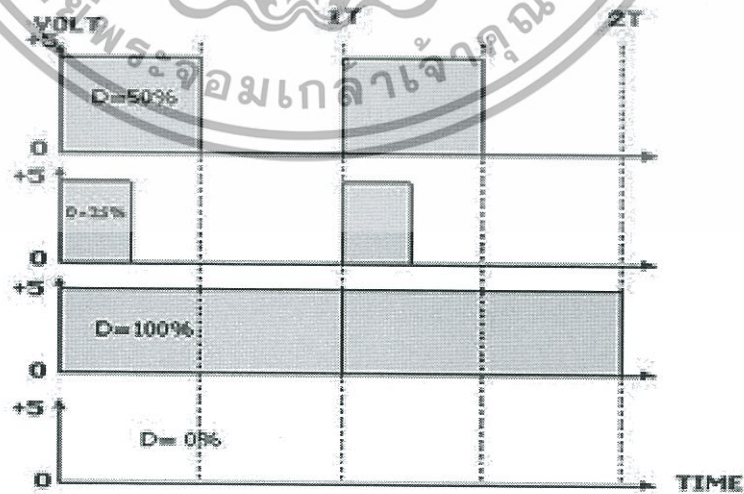
สัญญาณ PWM ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ความถี่ คือจำนวนรูปคลื่นต่อวินาที (Cycle / Second) ในการใช้งานความถี่จะต้องคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งานควบคุมอุปกรณ์กำลังต่างๆคือตั้งแต่ 400 Hz - 10 KHz ส่วนความถี่ที่ใช้เป็นพาหะของสัญญาณเสียง (Audio) ควรจะสูงกว่า 50 KHz - 1 MHz

- ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) เป็นค่าคาบเวลาช่วง ON ของไซเคิล โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Full-cycle

2.2.1 ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)

ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) คือช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีสถานะโลจิก high โดยคิดสัดส่วนเป็น%จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด เช่น ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50% ก็หมายถึงใน 1 รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะโลจิก high อยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะโลจิก low อยู่อีกครึ่งหนึ่ง หากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100% ก็หมายความว่า จะไม่มีสถานะโลจิก low



รูปที่ 2.3 กราฟ Duty cycle = (ช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะโลจิก high/คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ) X100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การมอดูเลตทางความกว้างของพัลส์ PWM

การมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วนและความกว้างของสัญญาณพัลส์โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง การสร้างสัญญาณ PWM สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น สร้างจากวงจรมิตทริกเกอร์ สร้างจากการเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยหรือสัญญาณสามเหลี่ยม หรือใช้วงจร Vco

การสร้างสัญญาณ PWM จากสัญญาณฟันเลื่อย (Saw tooth PWM)

การสร้างสัญญาณ PWM วิธีนี้ทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณ โดยประกอบด้วยสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตกับสัญญาณพาหะ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบสัญญาณมอดูเลตกับสัญญาณพาหะ

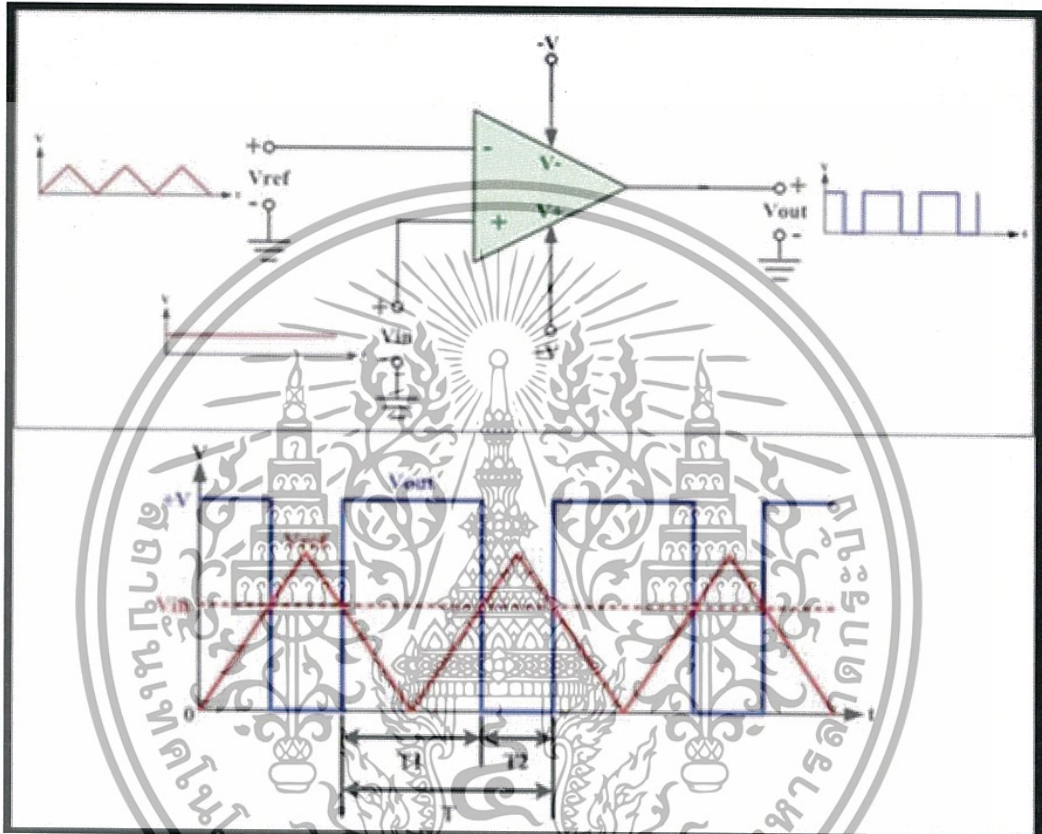
หลักการเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่นำสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตกับสัญญาณพาหะมาเปรียบเทียบโดยการซ้อนกัน จะได้สัญญาณ Output PWM ออกจากวงจร Comparator ดังนี้

1. ถ้าสัญญาณข่าวสารมีขนาดสูงกว่าสัญญาณฟันเลื่อย เอาต์พุตที่ได้จะเป็น High
2. ถ้าสัญญาณข่าวสารมีขนาดต่ำกว่าสัญญาณฟันเลื่อย เอาต์พุตที่ได้จะเป็น Low

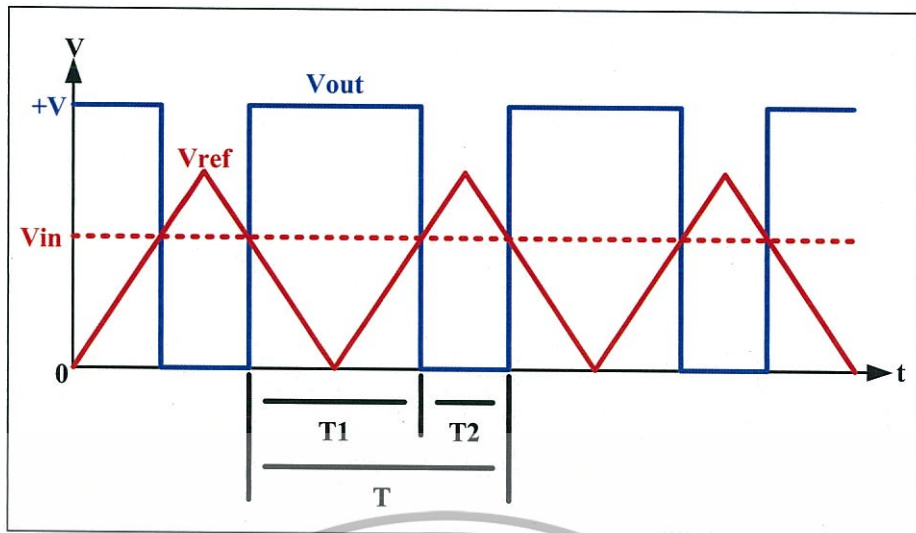
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่จะมีการป้อนแรงดันสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular Signal) เข้าที่ขั้วอินพุทกลับเฟส (Inverting Input) โดยจะเรียกแรงดันสัญญาณสามเหลี่ยมที่ป้อนเข้าไปนี้ว่า แรงดัน (V_{ref}) ซึ่งค่าแรงดันนี้คือค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป และที่ขั้วอินพุทไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) ก็จะทำให้การป้อนแรงดันไฟตรงเข้าไปโดยจะเรียกแรงดันไฟตรงที่ป้อนเข้าไปนี้ว่า แรงดัน (V_{in}) นั้นเอง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้น

และจากการที่ทำการป้อนค่าแรงดันทั้งสองเข้าไปที่ขั้วอินพุทของออปแอมป์นั้นก็ส่งผลให้ได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุทออกมาโดยแรงดันสัญญาณที่ได้นั้นจะเป็นแรงดันสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้นนั่นเอง ซึ่งค่าของแรงดันทางเอาต์พุทที่ได้นั้นจะมีค่าของแรงดันเท่ากับ $+V$ (มีค่าประมาณแรงดันที่ป้อนให้กับไอซีออปแอมป์นั่นเอง) แต่ในการออกแบบวงจรนั้นไม่ได้ง่ายอย่างที่คิดกล่าวที่จะทำให่วงจรที่จะออกแบบนี้ให้ผลออกมาตรงตามที่ต้องการในส่วนของคุณลักษณะของสัญญาณที่จะได้จากวงจรที่เราจะทำการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



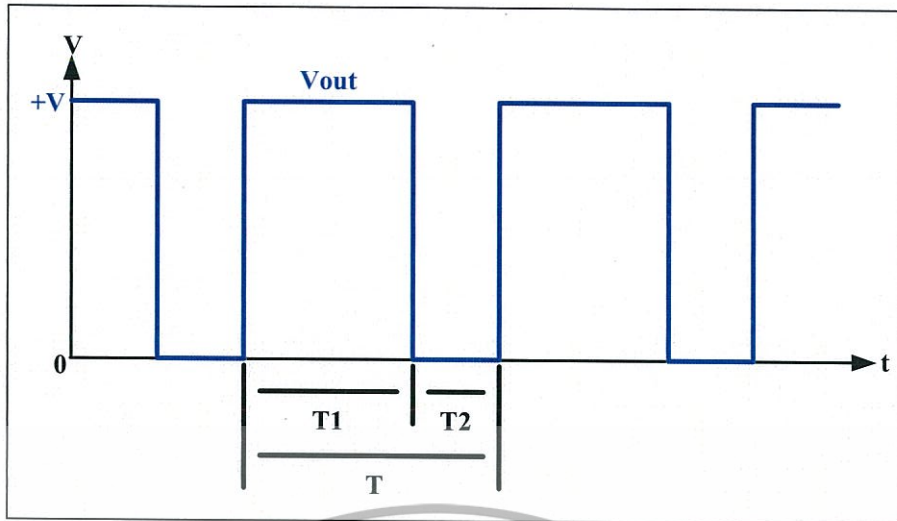
รูปที่ 2.6 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้น

จากรูปที่ 2.6 จะเป็นลักษณะของสัญญาณที่จะได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้นแต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับผู้ที่จะออกแบบว่าจะออกแบบวงจรให้ได้สัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้นเป็นแบบใด ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ก็จะพบว่ามีความถี่อยู่ 3 ค่าซึ่งแรงดันทั้งหมดนี้จะมีความสัมพันธ์กัน นั่นก็คือ แรงดัน (V_{in}), แรงดัน (V_{ref}) และแรงดัน (V_{out}) โดยถ้าพิจารณาดูก็จะเห็นว่าค่าของแรงดัน (V_{in}) นั้นมีค่ามากกว่า $0V$, ค่าของแรงดัน (V_{ref}) นั้นมีค่ามากกว่า (V_{in}) และแรงดัน (V_{out}) นั้นมีค่าเท่ากับ ($+V$)

ดังนั้นถ้าทำการพิจารณาถึงลักษณะการทำงานของวงจรก็จะพบว่าเราจะให้หลักการของการเปรียบเทียบแรงดันเพื่อที่จะให้ได้ค่าของแรงดันสัญญาณเอาต์พุตออกมา กล่าวคือ

- ถ้าค่าของแรงดัน (V_{in}) นั้นมีค่ามากกว่าค่าของแรงดัน (V_{ref}) ก็จะได้ค่าของแรงดันสัญญาณเอาต์พุตออกมามีค่าเท่ากับ ($+V$)
- ถ้าค่าของแรงดัน (V_{in}) นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดัน (V_{ref}) ก็จะได้ค่าของแรงดันสัญญาณเอาต์พุตออกมามีค่าเท่ากับ ($0V$)

ในส่วนของการคำนวณหาค่าที่สำคัญๆโดยในอันดับแรกจะขอกล่าวถึงการคำนวณหาค่าของดีวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลตขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของค่าดิวิตีไซเคิล (Duty Cycle) ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์

มอดูเลตชั่น

ถ้าพิจารณาดูแล้วก็จะเห็นว่าค่าดิวิตีไซเคิล (Duty Cycle) ที่จะได้จากวงจรมานั้นจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าของช่วงเวลา T_1 กับช่วงเวลา T_2 โดยสามารถที่จะคำนวณหาค่านี้ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$duty\ cycle = \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right) \tag{2.1}$$

และถ้าเรากำหนดให้ $T = T_1 + T_2$ ดังนั้นเราก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าดิวิตีไซเคิล (Duty Cycle) ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2

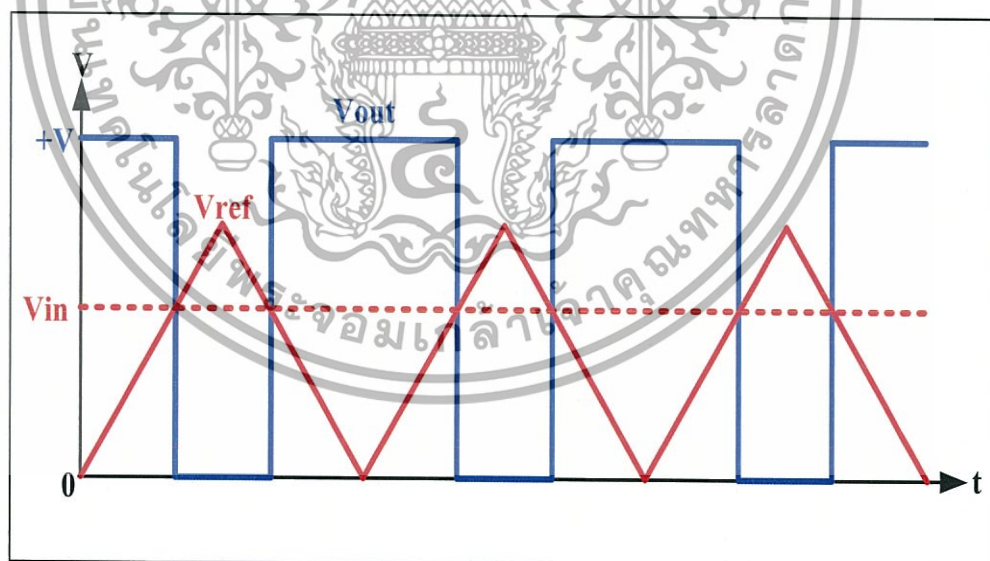
$$duty\ cycle = \left(\frac{T_1}{T} \right) \tag{2.2}$$

โดยจากสมการที่ 2.1 และจากสมการที่ 2.2 ที่ได้แสดงนั้นก็จะเป็นการคำนวณหาค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) แต่ถ้าเราจะคำนวณหาค่าของเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ก็สามารถคำนวณหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4

$$\text{duty cycle (\%)} = \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\text{duty cycle (\%)} = \left(\frac{T_1}{T} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

ในการคำนวณหาค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดัน (V_{in}) กับค่าของแรงดัน (V_{ref})



รูปที่ 2.8 ลักษณะของค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของสัญญาณเอ้าพุทที่ได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดัน (V_{in}) กับค่าของแรงดัน (V_{ref})

ถ้าพิจารณาแล้วก็จะเห็นว่าค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ที่จะได้จากวงจรนั้นสามารถที่จะคำนวณโดยใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดัน (V_{in}) กับค่าของแรงดัน (V_{ref}) ได้เช่นกัน โดยสามารถที่จะคำนวณหาค่านี้ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$duty\ cycle = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \right) \quad (2.5)$$

แต่ถ้าจะคำนวณหาค่าของเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ก็สามารคำนวณหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$duty\ cycle(\%) = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \right) \times 100\% \quad (2.6)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 ที่ได้แสดงนั้น ถ้าพิจารณาดูก็จะพบว่าค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) นั้นจะค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน (V_{in}) โดยที่ค่าของแรงดัน (V_{ref}) คือค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป ดังนั้นจากวงจรที่ออกแบบนี้ถ้าเราทำการกำหนดให้ค่าของแรงดัน (V_{in}) มากกว่าศูนย์ และให้ค่าของแรงดัน (V_{ref}) มากกว่าค่าของแรงดัน (V_{in}) แล้วก็จะทำให้เราได้ค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ที่อยู่ในช่วง 0–100 นั้นเอง

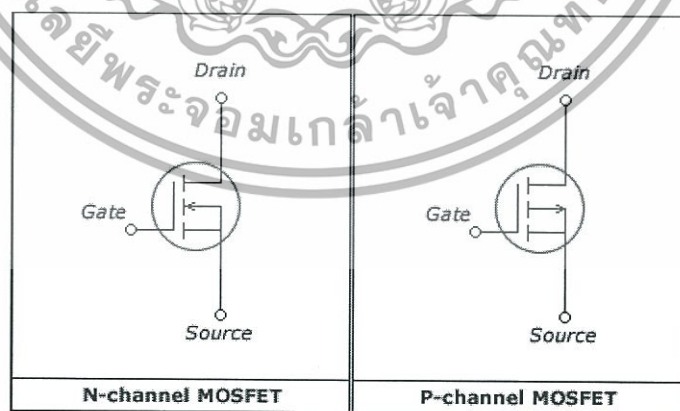
2.3 วงจรขับเกต

การขับเกตจะต้องพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของ V_{ds} และ I_d นั้นคือสมบัติในการเป็นสวิตช์เกี่ยวข้องกับกระแสเกตมีผลต่อความเร็วของการเก็บและการคายประจุของตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตและซอร์สของมอสเฟต ดังนั้นการออกแบบวงจรควบคุมเวลาการสวิตช์มอสเฟต จึงเป็นการควบคุมแหล่งจ่ายกระแสด้วยวงจรขับเกต ข้อดีของการมีความเร็วในการสวิตช์สูงคือเป็นการลดกำลังการสูญเสียตลอดจนการลดเวลาการเปลี่ยนสภาวะสวิตช์ แต่ข้อเสียของความเร็วการสวิตช์ที่สูงๆจะมีผลเสียต่อสัญญาณแทรกและรบกวนสูง

การเพิ่มขึ้นของกระแสนอนกลับที่ผ่านพรีวีลลิ่งไดโอดและการเกิดแรงดันเกินที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำจะลดลงที่ความเร็วการสวิตช์ต่ำ มอสเฟตมักถูกเลือกใช้งานความถี่การเป็นสวิตช์สูงที่ต้องการในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถสวิตช์ดีกว่าอุปกรณ์ประเภทอื่นในการประยุกต์ใช้งานที่ความถี่สูง มอสเฟตนั้นต้องการกระแสเกตที่มากพอในขนาดประมาณ 1 แอมแปร์หรือมากกว่าเพื่อจะให้ความเร็วในการสวิตช์สูง

2.4 MOSFET

MOSFET เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วน GATE นิยมใช้ในวงจรดิจิทัล โดยมักไปสร้างลอจิกเกตต่างๆเพราะมีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ลักษณะ N-channel MOSFET และ P-channel MOSFET

MOSFET ประกอบด้วยสามส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. GATE เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่น

เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า

2. SOURCE เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ

3. DRAIN เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

มอสเฟตมี 2 ประเภท

1. nMOS (negative MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท NPN เมื่อมีความต่างศักย์เป็นบวก (สนามไฟฟ้า

แรง) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้

2. pMOS (positive MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท PNP เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก source ไป drain ได้

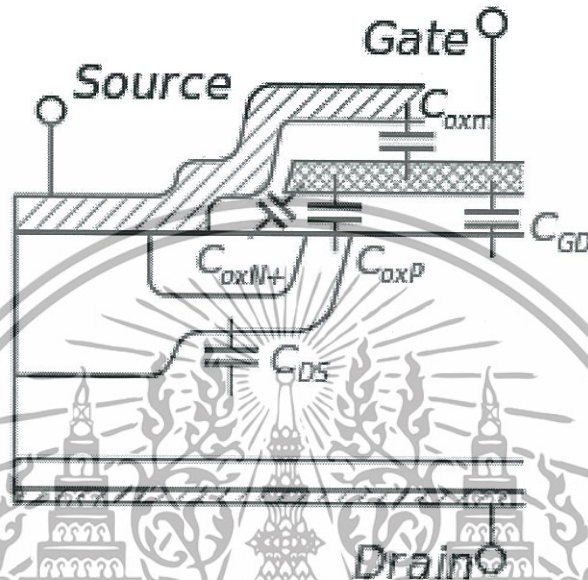
nMOS เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศลงอย่างแรง โวลต์ใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง (ตามรูปที่ประกอบข้างบน) ประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น n-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะ

pMOS จะทำงานกลับกับ nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น p-type เหมือนกับ drain และ source ได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะ MOSFET ในทางดิจิทัลถูกมองว่าเป็นสวิตช์ โดย nMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็ยังไม่เปิดอยู่ (normal opened switch) ส่วน pMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะเปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็จะปิดอยู่ (normal closed switch) และสัญลักษณ์ทั่วไปจะมีสามขา ขากลางเป็น gate ส่วนอีกสองขาคือ source และ drain โดยใช้ใน nMOS เป็นหลักเพื่อสื่อสัญลักษณ์เดียวกับทรานซิสเตอร์ทั่วไปคือ ไฟขา base โวลต์ ขา

Collector จะต่อกับ Emitter ส่วน pMOS ก็จะใช้ bubble ที่ขา gate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power MOSFET เป็นประเภทเฉพาะของ MOSFET ออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้พลังงานที่มีการจัดการระดับพลังงาน เมื่อเทียบกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น IGBT หรือ ทรานซิสเตอร์ ข้อได้เปรียบหลักของมันคือจะมีความเร็วสูง มีประสิทธิภาพดีที่แรงดันไฟฟ้าต่ำๆ



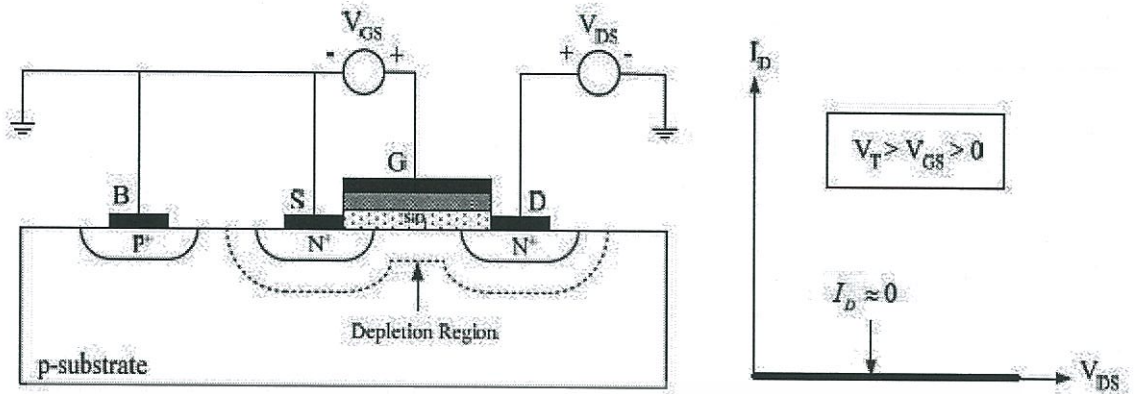
รูปที่ 2.10 โครงสร้าง และ ตัวเก็บประจุแฝงภายใน

หลักการพื้นฐานของ MOSFET

กรณีที่ $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$ (Cutoff: ยานไม่นำกระแส)

เมื่อป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขั้วเกตเทียบกับขั้วซอร์ส V_{GS} ที่มีค่าบวกค่าหนึ่งแต่น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) หรือ $V_T > V_{GS} > 0$ สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่เกิดจากแรงดันเกตซอร์สจะผลักให้โฮลในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัส $SiO_2 - Si$ เคลื่อนที่ห่างออกไปความหนาแน่นของโฮลในบริเวณดังกล่าวจึงมีค่าลดลงจากเดิม ผลดังกล่าวทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใต้ส่วนเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนั้นในกรณีนี้ซอร์สและเดรนยังคงถูกแยกจากกันด้วยชั้นของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นใต้ส่วนเกตและเป็นชั้นที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนซอร์สมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสเดรนก็จะมีการไหลแต่ว่ามีค่าน้อยมาก ประมาณว่าเป็นศูนย์ $I_D \approx 0$ ในสภาวะนี้มอสเฟตยังคงอยู่ในสภาวะคัทออฟ หรือสถานะ off เช่นเดิม

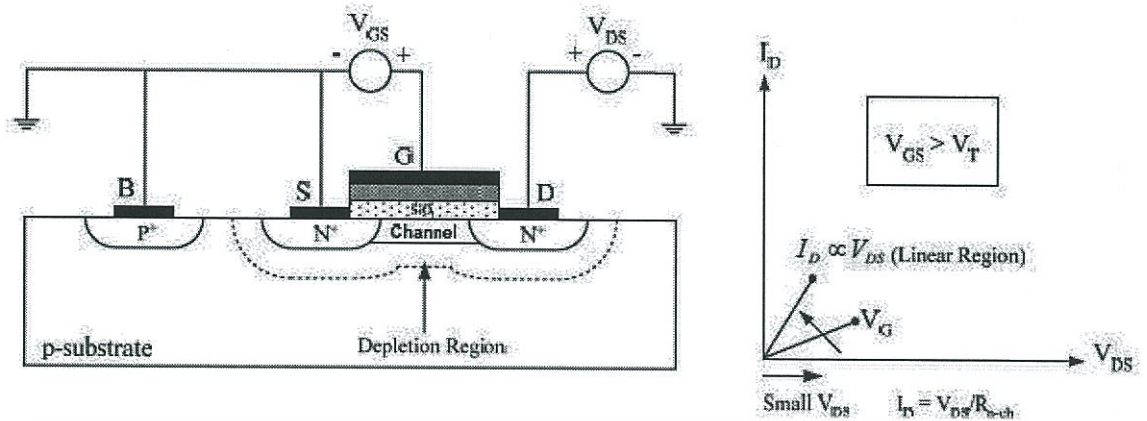
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กรณีที่ $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$

กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อย; (Ohmic Region: ย่านไม่อิ่มตัว)

เมื่อแรงดันเกตซอส V_{GS} มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นในที่สุดแรงดันเกตซอสจะเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม V_T หรือมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS} > V_T$ ในขณะนี้สนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันเกตซอส จะมีความมากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับชนิดเอ็น (N-Inversion Layer) หรือแขนแนลชนิดเอ็นในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสระหว่าง $SiO_2 - Si$ บริเวณใต้ส่วนเกต ดังรูปที่ 2.12 แขนแนลนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุบางๆ (Sheet of Charge) ภายในแขนแนลนี้จะมีอิเล็กตรอนซึ่งถูกเหนี่ยวนำอยู่ในแขนแนลและจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์หรือแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ เมื่อแรงดันเกตซอสคงที่และแรงดันเดรนเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่ซอส แรงดันที่ตกคร่อมของออกไซด์จะมีค่าเท่าๆกันทุกจุดในแขนแนล แต่เมื่อแรงดันเดรนซอส V_{DS} มีค่าเป็นบวกสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่จุดต่างๆที่ห่างออกมาจากด้านซอสจะมีค่าลดลง เพราะแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่จุดใกล้ด้านเดรนจะมีค่าลดลง ผลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแขนแนลที่เข้าใกล้มาทางด้านเดรนมีค่าลดลงด้วยและจะมีค่าน้อยที่สุดที่ปลายด้านเดรน

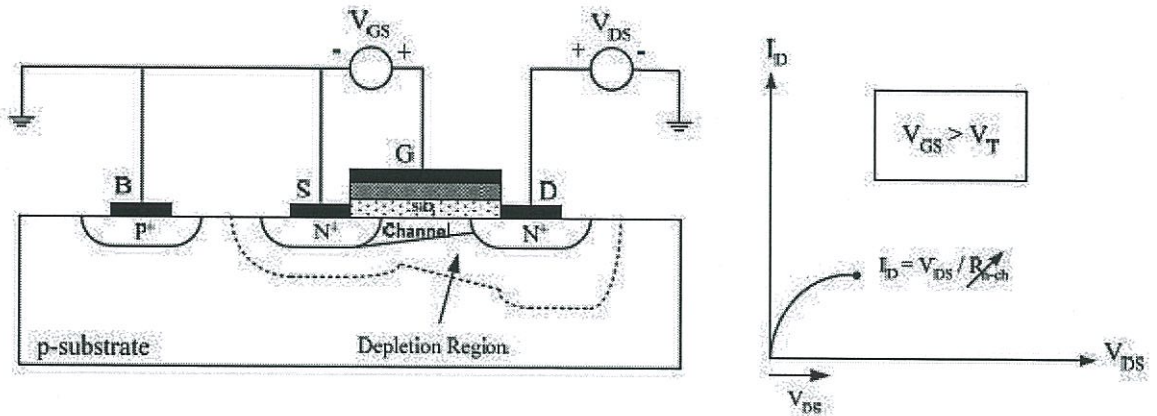


รูปที่ 2.12 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อย

กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$

เมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้นต่อไปค่าความต่างศักย์ระหว่างซอสและเดรนจะทำให้ที่ตำแหน่งต่างๆในแชนแนลมีศักย์ไม่เท่ากันอย่างเห็นได้ชัด ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายซอสยังคงเป็นศูนย์โวลต์แต่เมื่อตำแหน่งนั้นอยู่ห่างออกมาจากทางด้านซอสหรือเมื่อเข้าไปใกล้ทางด้านเดรนศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ปลายด้านเดรนคือ V_D ดังนั้นแรงดันระหว่างขั้วเกตและแชนแนล (แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์) ที่ตำแหน่ง X ต่าง ๆ ตลอดความยาวของแชนแนลจะมีค่าไม่เท่ากันที่ปลายด้านซอสแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_G โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันเดรน แต่ที่ตำแหน่ง X ที่ห่างจากซอสหรือใกล้เข้ามาทางด้านเดรนแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์จะมีค่าลดลงและที่ปลายด้านเดรนแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์นี้จะมีค่าต่ำสุดและมีค่าเท่ากับ $V_{GS} - V_{DS}$ กรณีที่แรงดันเดรนมีค่าไม่สูงมากและทำ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ แสดงว่าในช่วงนี้ยังมีแชนแนลเกิดขึ้นได้โดยตลอดตั้งแต่ซอสจนถึงเดรนและแรงดันเกตคงที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ในแชนแนลที่ปลายด้านซอสจะมีค่าคงที่แม้แรงดันเดรนจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแชนแนลจะลดลงกับระยะทางที่ห่างออกไปจากด้านซอส และยิ่งจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.13 ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเมื่อใกล้เข้าไปทางด้านเดรนขนาดของแชนแนลจะมีค่าลดลง ดังนั้นความต้านทานของแชนแนล R_{n-ch} จะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรนโดยเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสจะชะลอตัวลงดังสังเกตเห็นได้จากกราฟ $I_D - V_D$ ซึ่งความชันของกราฟจะมีค่าลดลง (โค้งมากขึ้น) เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้นแต่ยังคงอยู่ในเงื่อนไข $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$ โดยที่ $V_{DS(Sat)}$ หมายถึง แรงดันเดรนซอสที่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



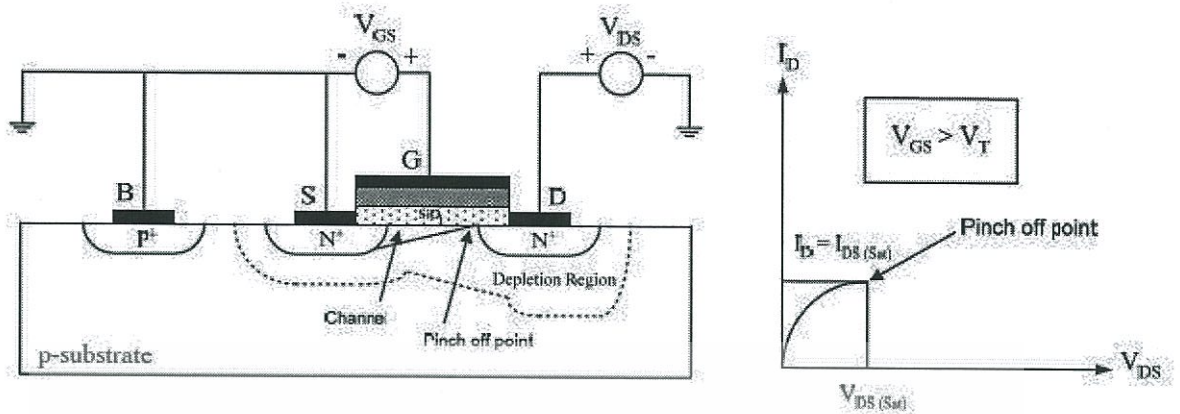
รูปที่ 2.13 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(Sat)}$

กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(Sat)}$; (Pinch off Point: จุดพินช้อฟ)

เมื่อแรงดัน V_D ยังคงเพิ่มขึ้นกระทั่งมีค่ามากจนทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ตำแหน่งปลายด้านเดรนมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มพอดิหรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$ แชนแนลที่ปลายด้านเดรนจะมีขนาดลดลงเป็นศูนย์หรือก็คือแชนแนลขาดออกพอดิที่เดรนซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะพินช้อฟ” (Pinch off) และจุดที่แชนแนลขาดออกพอดินี้เรียกว่า “จุดพินช้อฟ” (Pinch off Point) บริเวณหลอดพาหะตรงส่วนเดรนจะมีขนาดกว้างมากกว่าด้านซอสอย่างเห็นได้ชัด ค่าของแรงดันเดรนซอสที่พอดิที่ทำให้เริ่มเกิดสภาวะพินช้อฟถูกเรียกว่า “แรงดันเดรนซอสอิ่มตัว” (Saturation Drain Source Voltage: $V_{DS(Sat)}$) หรือบางกรณีเรียกว่า “แรงดันพินช้อฟ” (Pinch off Voltage: V_p)

ในขณะนี้พิจารณาได้ว่าแชนแนลที่ขาดออกพอดิที่ตำแหน่งปลายด้านเดรน การทำงานของมอสเฟตในสภาวะนี้จึงคล้ายกับสภาวะพินช้อฟของ (N-Channel JFET) กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนในแชนแนลถูกดริฟท์ (Drift) โดยสนามไฟฟ้าจากด้านซอสมาทางด้านเดรนและเมื่อมาถึงปลายแชนแนลที่จุดพินช้อฟสนามไฟฟ้าค่าสูงสุดที่ตกคร่อมในช่วงแคบๆของบริเวณหลอดพาหะระหว่างปลายของแชนแนลและส่วนเดรนจะดึงให้อิเล็กตรอนที่ส่วนปลายแชนแนลข้ามบริเวณหลอดพาหะเข้าไปยังส่วนเดรน ดังนั้นกระแสเดรนยังคงไหลได้แต่ขนาดของกระแสจะถูกจำกัดด้วยปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกดึงหรือฉีดข้ามบริเวณหลอดพาหะดังกล่าวและอาจจะพิจารณาได้ว่ากระแสเดรนถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance) ของแชนแนล ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรน-ซอสเพิ่มขึ้นกระแส I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (อย่างชะลอตัว) กระทั่งเมื่อถึงค่า $V_{DS(Sat)}$ กระแสเดรนจะมีค่าสูงสุดเรียกว่า “กระแสเดรนอิ่มตัว” (Saturation Drain Current) และเขียนแทนด้วย $I_{DS(Sat)}$ ดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(Sat)}$ หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$

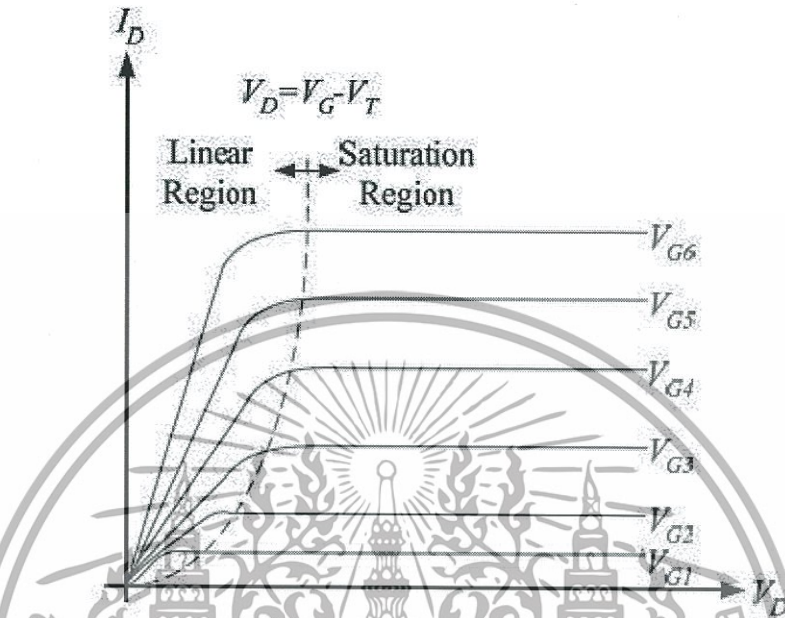
กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$; (Saturation Region: ย่านนำกระแสอิ่มตัว)

เมื่อแรงดันที่เดรนขอสมีค่ามากกว่าแรงดันอิมิต์หรือ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่บริเวณใกล้ปลายด้านเดรนมีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} - V_{DS}$) $< V_T$ ดังนั้นในบริเวณดังกล่าวจะไม่มีแชนแนลเกิดขึ้นจึงคล้ายกับว่าจุดพินช้อฟเกิดขึ้นเลื่อนไปจากจุดเดรนเข้าไปทางด้านจุดซอสและที่ตำแหน่ง X ใดๆที่เป็นจุดพินช้อฟตามเงื่อนไขของสมการ $(V_{GS} - V_{DS}(X)) = V_T$ ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนมีค่า สูงกว่า $V_{DS(Sat)}$ จุดพินช้อฟจะเลื่อนเข้าไปใกล้ด้านซอส ดังรูปที่ 2.16 ทำให้เกิดบริเวณปลอดภัยระหว่างจุดพินช้อฟกับส่วนเดรน ซึ่งมีระยะกว้างเท่ากับ ΔL หากพิจารณาว่ามอสเฟตนี้เป็นชนิด Long Channel และ $\Delta L \ll L$ ดังนั้นความยาวของแชนแนลจึงมีขนาดสั้นลงจากเดรนน้อยมาก กระทั่งประมาณว่ามีขนาดความยาวเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นความต้านทานของแชนแนล R_{n-ch} จะมีค่าประมาณเท่าเดิมแม้ว่าแรงดันที่เดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตามและแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างซอสถึงจุดพินช้อฟจะมีค่าคงที่เสมอโดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันเดรนซอสและเมื่อแรงดันที่เดรนซอสเพิ่มขึ้นสูงกว่า $V_{DS(Sat)}$ กระแสเดรนจะประมาณได้ว่ามีค่าคงที่และเท่ากับค่าของ $I_{DS(Sat)}$ ซึ่งเป็นกระแสเดรนอิมิต์หาได้จากสมการที่ 2.7

$$I_D \approx I_{D(Sat)} = \frac{V_{D(Sat)}}{R_{eff(n-ch)}} \quad ; \quad V_{DS} > V_{DS(Sat)} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมอสเฟตถูกพิจารณาว่าทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region) กล่าวคือกระแสเดรนจะมีค่าคงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันที่เดรน



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรน และแรงดันที่ขาเดรนกับขอส

ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_G กับกระแส I_D ในขณะที่แรงดันที่ขาเกตคงที่และมอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัวสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันที่เดรนกับขอส โดยเปลี่ยนค่า V_G โดย $V_{G1} < V_{G2} < V_{G3} < V_{G4} \dots$

การทำงานของมอสเฟตจะเป็นลักษณะของการใช้แรงดันไฟฟ้าควบคุมปริมาณการไหลของกระแส สมการกระแสเดรนของมอสเฟตถูกคิดขึ้นโดย Sah , H. Shichman และ D. Hodges ดังสมการที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

$$I_D = K' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}; V_{GS} > V_T \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K' = ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Trans conductance) มีค่าเท่ากับ $\mu_o C_{ox}$

μ_o = ค่าความคล่องโสล หรืออิเล็กตรอน (Surface Mobility of Carrier)

C_{ox} = ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์

(Capacitance Per Unit Area of The Gate Oxide)

W = ความกว้างของแซนแนล (Channel width)

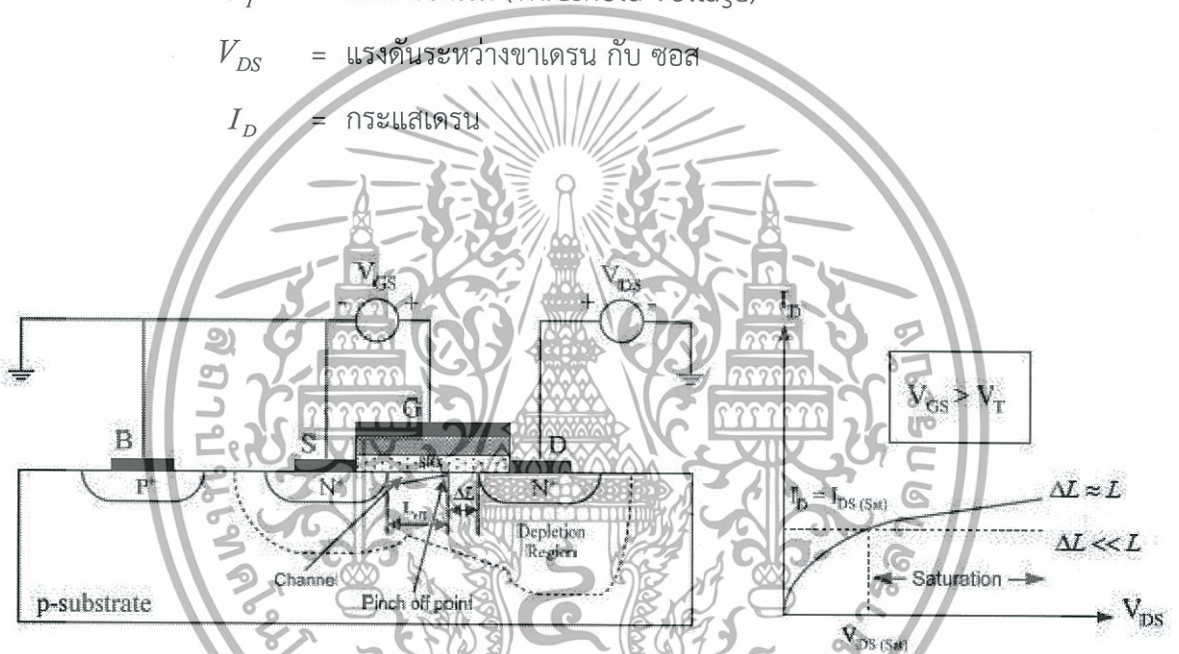
L = ความยาวของแซนแนล (Channel Length)

V_{GS} = แรงดันระหว่างขาเกต กับ ซอส

V_T = แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)

V_{DS} = แรงดันระหว่างขาเดรน กับ ซอส

I_D = กระแสเดรน

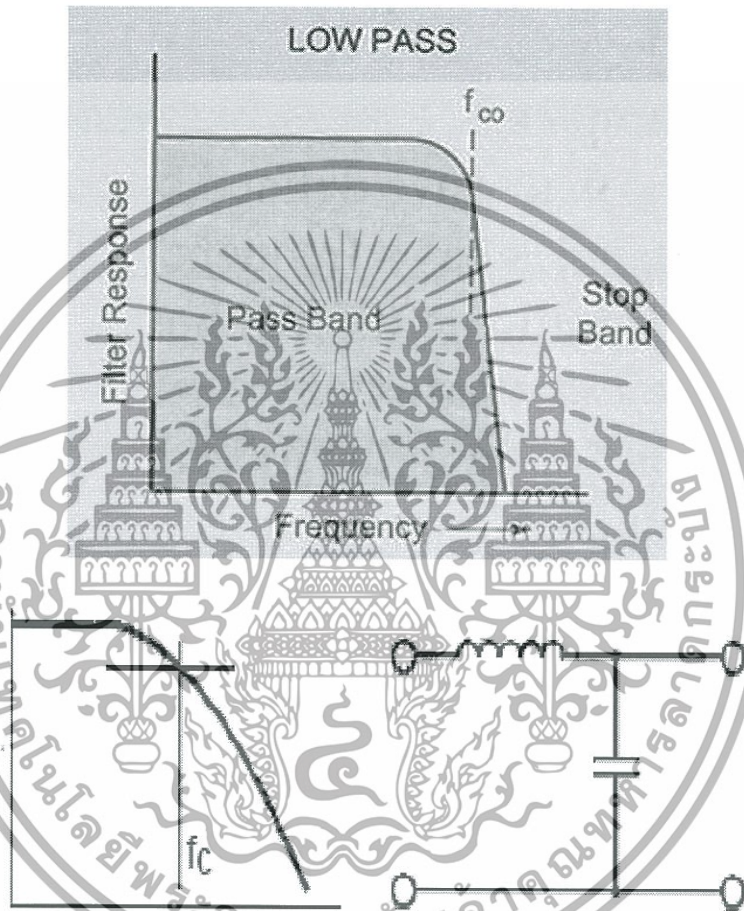


รูปที่ 2.16 กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(Sat)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

หมายถึง วงจรที่จะยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ที่กำหนดสูงขึ้นไปเรื่อยๆจะลดทอนไปตามลำดับลักษณะของวงจรมีตั้งแต่อันดับหนึ่งขึ้นไป ดังรูป



รูปที่ 2.17 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (db)

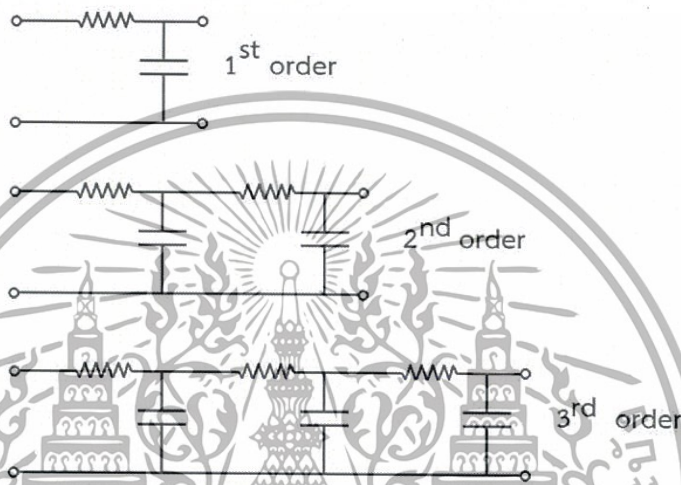
วงจร Low Pass Filter แบบ Inductor กับ Capacitor

วงจร low pass filter มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า X_L ต่ำ C จะมีค่า X_C สูง ทำให้ความถี่ ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนดค่า X_L จะมากขึ้น ค่า X_C จะลดลง ทำให้ความถี่ ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

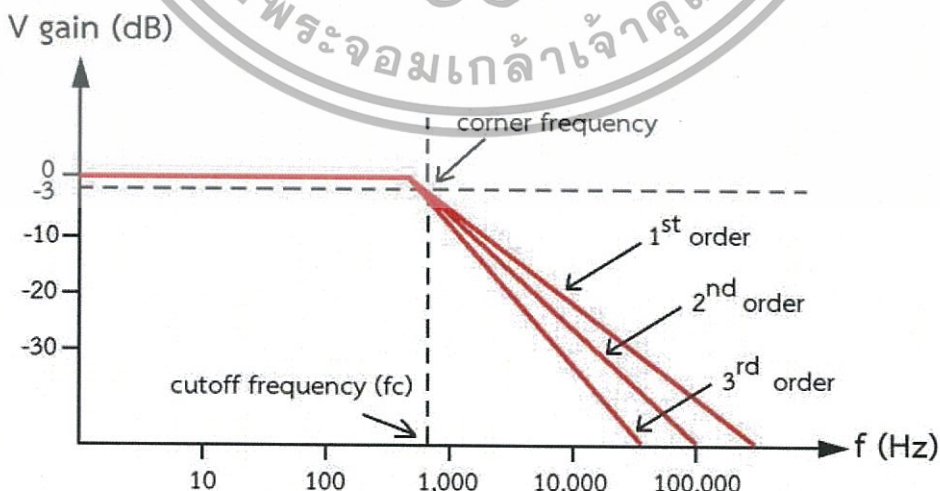
วงจร Low Pass Filter แบบ Resistor กับ Capacitor

จากรูปวงจรเมื่อทำการป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร ที่ C จะมีค่า X_C สูง ทำให้ความถี่ต่ำไหลผ่าน R ที่มีค่าความต้านทานน้อยกว่า X_C ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า X_C จะลดลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาวงจร low pass filter ยังมีลักษณะการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ Resistor กับ Capacitor

จากรูปที่ 2.18 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจร

กรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สามารถทำได้ โดยใช้สมการ (2.9)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.9)$$

โดย f_c คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ในทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้สัญญาณใดๆที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดซึ่งเรียกว่า ความถี่คัทออฟ หรือ ความถี่ขอบเขต (Cutoff Frequency) ผ่านไปได้โดยไม่มี การลดทอนของสัญญาณ และถ้าความถี่ของสัญญาณเข้ามีค่าเกินที่กำหนดไว้สัญญาณออกควรจะ มีค่าเป็นศูนย์แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถจะทำเช่นนั้นได้เนื่องจากการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่ ต่างๆของอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ จะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นผลที่ ได้จึงเป็นดังรูปที่ 2.17 คือเมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นวงจรจะลดสัญญาณลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งจะ ลดลงในอัตราคงที่ค่าหนึ่ง

2.6 Negative Feedback

ระบบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะมีการป้อนกลับและทฤษฎีการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) ซึ่งการป้อนกลับของออปแอมป์ถูกค้นพบในปีค.ศ.1928 นับตั้งแต่นั้นมา เทคนิคนี้ก็ถูกนำมาใช้กับวงจรขยายอย่างกว้างขวาง การป้อนกลับสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ การป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) และการป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) เนื่องจากการป้อนกลับแบบลบมี ข้อดีหลายประการจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ Amplifier ตามคุณสมบัติดังนี้

1. อัตราขยายมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์ภายในวงจรน้อยลง
2. ลดความเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุต
3. ลดสัญญาณรบกวน
4. สามารถควบคุมอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าและทางด้านออกได้ง่าย
5. เพิ่มแบนวิดธ์ของวงจรขยาย

ส่วนข้อเสียของการป้อนกลับแบบลบมีดังนี้คือ

1. อัตราขยายมีค่าลดลง
2. มีแนวโน้มที่วงจรจะไม่เสถียรภาพถ้าออกแบบวงจรที่ใช้การป้อนกลับไม่ดีพอ

โครงสร้างทั่วไปของการป้อนกลับ

โครงสร้างพื้นฐานของการป้อนกลับของ Amplifier ซึ่งรูปที่ 2.20 แสดง Signal-flow diagram ถ้าให้ x เป็นได้ทั้งสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดัน จะได้ว่า

$$x_o = Ax_i \quad (2.10)$$

A คือ อัตราขยาย Open-loop gain

x_i คือ อินพุตของอัตราขยาย A

x_o คือ เอาต์พุตของอัตราขยาย A

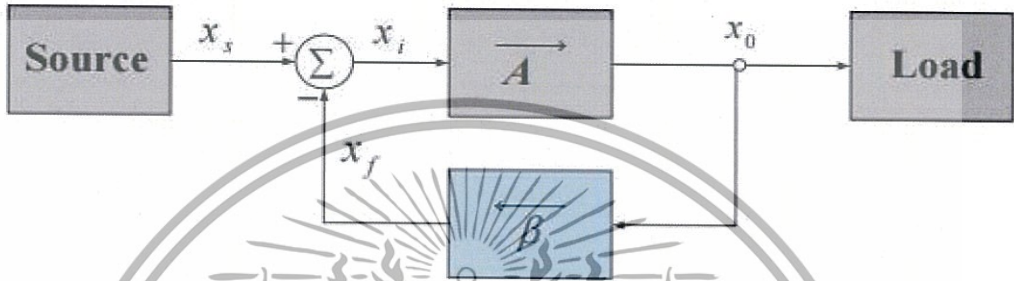
x_o ถูกป้อนให้แก่ภาระในวงจรการป้อนกลับและ x_f มีความสัมพันธ์กับ x_o โดยมีตัวเอกสประกอบของการป้อนกลับเป็น β ปรึกษาการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_f = \beta x_o \tag{2.11}$$

β คือ ตัวประกอบของการป้อนกลับ (Feedback factor)

x_f คือ สัญญาณการป้อนกลับ (Feedback signal)

x_o คือ เอาท์พุทของอัตราขยาย A



รูปที่ 2.20 block diagram ของการป้อนกลับแบบลบ

สัญญาณ x_f ป้อนกลับถูกลบมาจากสัญญาณแหล่งจ่าย x_s สัญญาณนี้เป็นสัญญาณอินพุทที่สมบูรณ์ของการป้อนกลับของ Amplifier

$$x_i = x_s - x_f \tag{2.12}$$

x_i คือ สัญญาณที่เกิดความเพี้ยน (Error signal)

x_f คือ สัญญาณการป้อนกลับ (Feedback signal)

x_s คือ สัญญาณแหล่งจ่าย (Source signal)

อัตราขยายของการป้อนกลับของวงจรขยาย สามารถแทนด้วยสมการ

$$A_f = x_o / x_s = A / (1 + A\beta) \tag{2.13}$$

$A\beta$ คือ Loop gain

$1 + A\beta$ คือ Amount of feedback

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

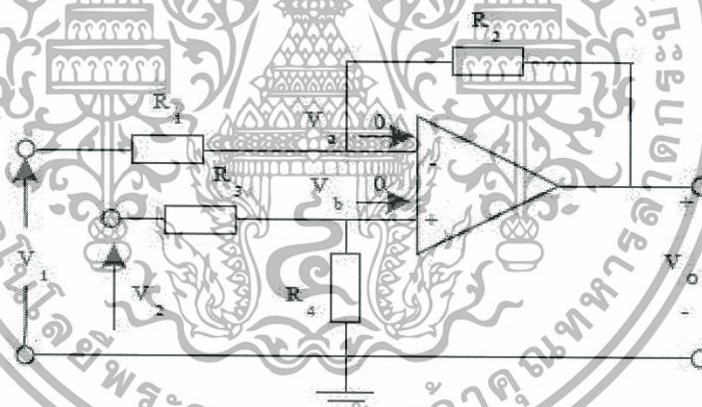
ถ้าให้ Loop gain $A\beta$ มีขนาดใหญ่กว่า 1 มากๆ $A\beta \gg 1$ ดังนั้นสมการที่ 2.12 จะกลายเป็น $A\beta \cong 1/\beta$ อัตราขยายของวงจรเกือบทั้งหมดถูกกำหนดโดย feedback network อย่างเดียว จากสมการที่ 2.11 แทนลงในสมการที่ 2.9 จะได้

$$x_f = (A\beta/(1 + A\beta))x_s \quad (2.14)$$

และถ้า Loop gain $A\beta$ มีขนาดใหญ่กว่า 1 มากๆ $A\beta \gg 1$ จะได้ว่า $x_f \cong x_s$

2.7 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ คือ วงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองอินพุต



รูปที่ 2.21 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ

ใช้ข้อกำหนดของออปแอมป์ที่กล่าวว่าไม่มีกระแสไหลเข้า (ศูนย์ :0) ด้านขาเข้าของออปแอมป์เช่น เดิม เราประยุกต์ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด a เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_1 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)V_a - \frac{R_2}{R_1}V_1 \quad (2.16)$$

ที่จุด b ใช้กฎกระแส KCL จะได้

$$\frac{V_2 - V_{ba}}{R_3} = \frac{V_b - 0}{R_4} \quad (2.17)$$

หรือ
$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4}V_2 \quad (2.18)$$

เมื่อ $V_a = V_b$ แทนสมการ 2.16 ลงในสมการ 2.14 จะได้สมการ

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4}V_2 - \frac{R_2}{R_1}V_1 \quad (2.19)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_1 + 1}{\frac{R_3}{R_4} + 1} \right) V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.20)$$

เมื่อแรงดัน $V_1 = V_2$ วงจรขยายต้องให้แรงดันด้านซ้ายออก $V_o = 0$ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของวงจรที่ขจัดสัญญาณร่วม (Reject a Signal Common) ที่ขาต้านเข้าทั้งสอง ซึ่งจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.21)$$

นั่นคือ เมื่อวงจรเป็นการขยายผลต่างสมการ 2.18 จะกลายเป็น

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.22)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.23)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ วงจรการขยายความแตกต่างจะกลายเป็น ตัวลบ
สัญญาณ ซึ่งมีแรงดันด้านขาออกเป็น

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านไปยังโหลดเพียงทิศทางเดียวสามารถแบ่งวงจรนี้เป็น 2 ประเภท คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier)

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

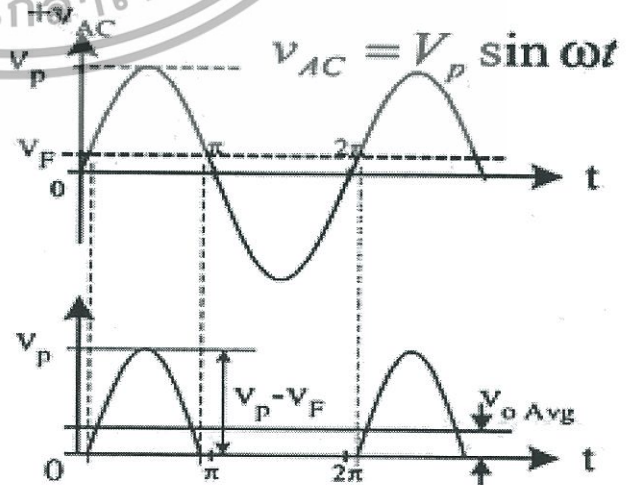
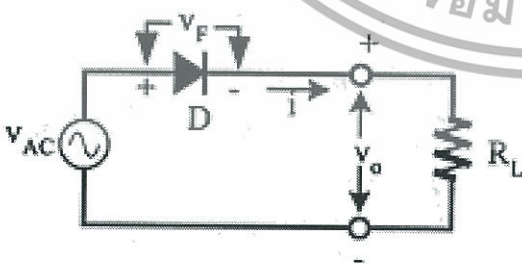
เขียนสมการที่ KVL จะได้

$$V_{AC} = V_D + V_o \tag{2.25}$$

ในขณะที่เฟสลับมีค่าเป็นบวก ($0 < \omega t < \pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็น

$$V_o = V_{AC} - V_D \tag{2.26}$$

$$V_o = V_p \sin \omega t - 0.6 \text{ V} ; 0 < \omega t < \pi$$



รูปที่ 2.22 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ไฟสลัปมีค่าเป็นลบ ($\pi < \omega t < 2\pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสย้อนกลับ จะไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอดแรงดันเอาต์พุตก็จะมีค่าเป็น 0

$$V_0 = 0 \quad ; \quad \pi < \omega t < 2\pi$$

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสจะไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น ถึงแม้ว่าแรงดันที่ R_L และกระแสที่ผ่าน R_L จะเป็นกระแสตรงแต่ก็ยังมีลักษณะคล้ายพัลส์ (Pulsating DC) มีการกระเพื่อมสูงมาก คลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 ลูกคลื่นจะได้ลูกคลื่นของไฟตรง 1 ลูก ดังในรูป 2.22 นั่นคือความถี่ของการกระเพื่อม(Ripple Frequency) จะเป็น

$$F_R \text{ (HW)} = F_{\text{line}} \quad (2.27)$$

ในขณะที่ไฟสลัปเป็นซิกลบ ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับจะไม่มีการไหลผ่านไดโอด แรงดันเอาต์พุตจะเป็น 0 จากสมการที่ (2.25) จะได้

$$v_D = v_{AC} \quad [\pi < \omega t < 2\pi]$$

แรงดันของไฟสลัปทั้งหมดจะตกคร่อมที่ไดโอด ในการเรียงกระแส ไดโอดจะต้องไม่พังทลาย ไดโอดที่ใช้จะต้องมีค่าแรงดันพังทลายอย่างต่ำเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลัป

$$V_{R(\text{MAX})} \geq V_{P(\text{AC})} \quad V$$

ในวงจรทั่วไปค่าสูงสุดของไฟสลัปจะมีค่าสูงกว่าแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมไดโอด ($V_F \approx 0.6$ V) อย่างมากเราจะถือว่าค่าสูงสุดของไฟตรงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลัป ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$v_{0DC}(t) = V_p \sin \omega t \quad ; \quad 0 < \omega t < \pi$$

$$0 \quad ; \quad \pi < \omega t < 2\pi \quad (2.28)$$

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์นั้นนิยมใช้งานอย่างมาก โดยการใช้ไดโอด 4 ตัว ไดโอด 2 ตัว ในวงจรสลับกันทำงานให้มีกระแสไหลผ่านในเวลาครึ่งคาบของไฟสลัปและในเวลาอีกครึ่งคาบ ไดโอดอีก 2 ตัวก็จะทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.23 ในขณะที่ V_{AC} เป็นบวกจะมีกระแสไหลผ่าน D_1, D_3 , i_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ (ถูกไบอัสย้อนกลับ) และเมื่อ V_{AC} เป็นลบ i_1 จะเป็นศูนย์ กระแสจะไหลผ่าน D_2, D_4

ค่าของกระแส $i_0(t), i_1(t), i_2(t)$ กระแสเฉลี่ย I_0, I_1 , และ I_2 ค่าความถี่ของการกระเพื่อมจะอยู่ในรูปแบบเดียวกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบหม้อแปลงมีแทป คือ

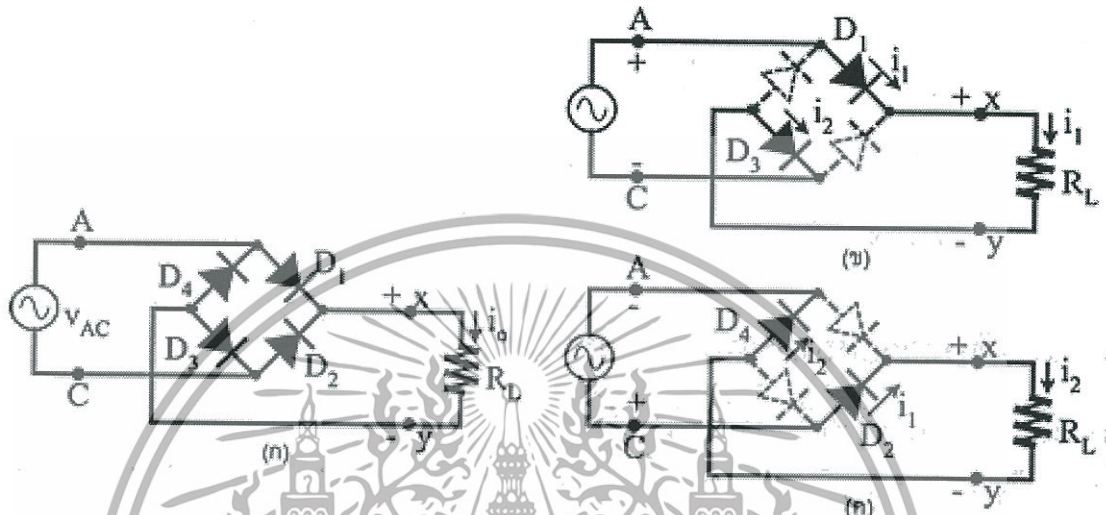
$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2} \quad A \quad (2.29)$$

$$V_{0(pk)} = V_{AC(pk)} - 1.2 \text{ V} \quad (2.30)$$

$$F_R = 2F_{line} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างวงจรบริดจ์ของไดโอด เราอาจจะใช้ไดโอดเดี่ยว 4 ตัวมาต่อวงจรหรืออาจจะใช้ไดโอดบริดจ์ซึ่งภายในเป็นไดโอด 4 ตัว ต่อวงจรในลักษณะของบริดจ์เรียบร้อยแล้วสำหรับบริดจ์ไดโอด มีให้เราเลือกใช้งานได้ตั้งแต่ขนาดของกระแสเอาต์พุตเฉลี่ย 0.5 A ขึ้นไปถึงหลายร้อยแอมป์และทนแรงดันได้มากกว่า 1000V



รูปที่ 2.23 (ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ข, ค) ทิศทางของกระแสในขณะ V_{AC} (ข) เป็นบวก (ค) เป็นลบ

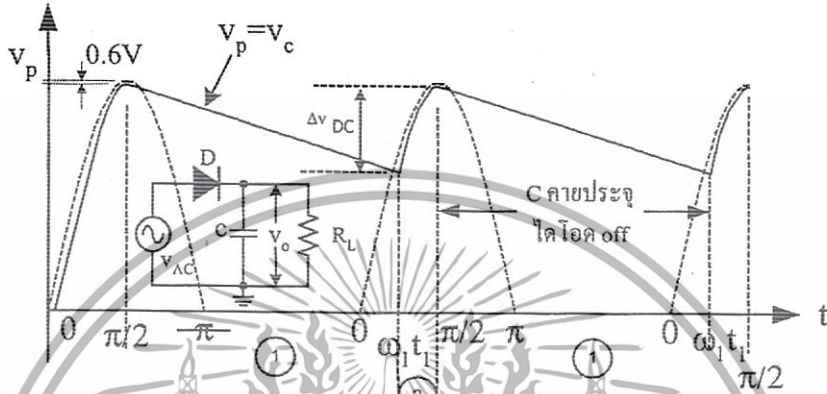
2.9 วงจรกรองสัญญาณ (Ripple Filter)

มีหน้าที่กรองไฟกระแสตรงที่กระเพื่อมให้เรียบขึ้นโดยมีอัตราการกระเพื่อมต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ที่ง่ายที่สุดได้แก่การต่อตัวเก็บประจุขนานกับเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส

วงจรกรองสัญญาณที่ใช้กันมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการต่ออุปกรณ์สามารถใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) หรือตัวเก็บประจุ (C) มาต่อแต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ตัวเก็บประจุเพราะว่ามีราคาถูกขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา แต่ขดลวดเหนี่ยวนำพันยากและไม่สะดวกดังนั้นเราจะกล่าวถึงแต่ตัวเก็บประจุ

การกรองสัญญาณด้วยตัวเก็บประจุ

เป็นวงจรที่ทำงานได้ดีและสร้างได้ง่าย ตัวเก็บประจุจะเก็บประจุเอาไว้ขณะที่ไดโอดนำกระแส และเมื่อไดโอดหยุดนำกระแสก็จะจ่ายประจุให้แก่โหลดแทนหม้อแปลง ดังนั้นในวงจรที่มีโวลต์ตกมากก็ ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากๆ เพื่อเก็บประจุพอที่จะจ่ายแก่โหลด



รูปที่ 2.24 การทำงานของตัวเก็บประจุกรองไฟในสถานะที่มีโวลต์ตก

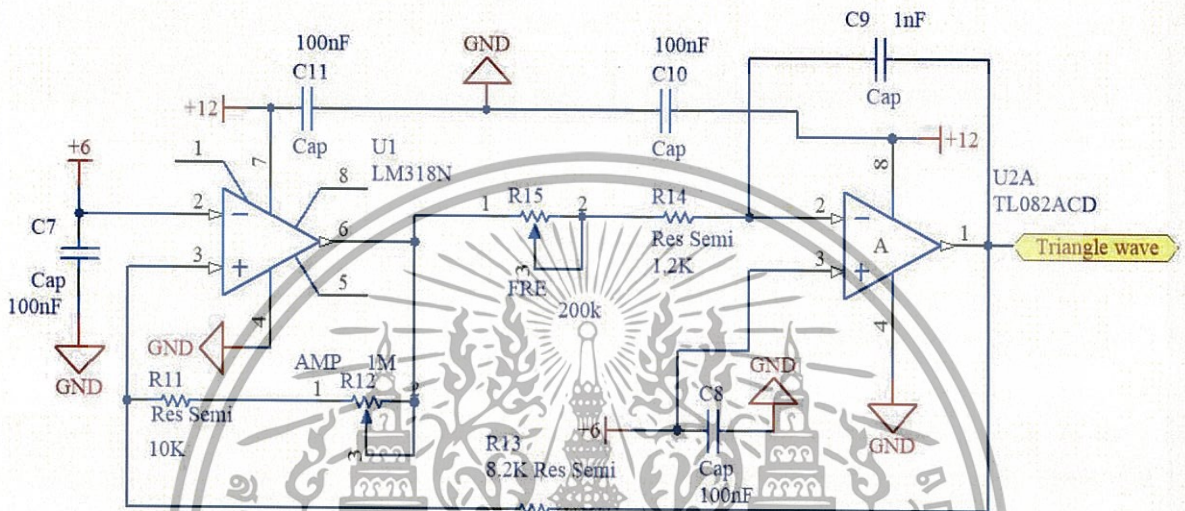
จากรูปที่ 2.24 ในช่วงเวลา T_2 ตัวเก็บประจุจะเก็บประจุ (charge) จนช่วงเวลา T_1 เป็นช่วงเวลาไดโอด cut off ตัวเก็บประจุจะคายประจุ (discharge) เป็นการจ่ายไฟแก่โหลดแทน ดังนั้นกราฟ V_o มีลักษณะเรียบขึ้น ความสามารถของวงจรกรองสัญญาณที่จะทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตเรียบนั้นขึ้นอยู่กับค่า R และ C โดยถ้าค่า $1/RC$ มากจะทำให้ Time Constant สูงทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุได้ช้ากราฟแรงดันเอาต์พุตจะเรียบมากขึ้นสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$CV_r = \frac{I_o}{F_r} \tag{2.32}$$

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

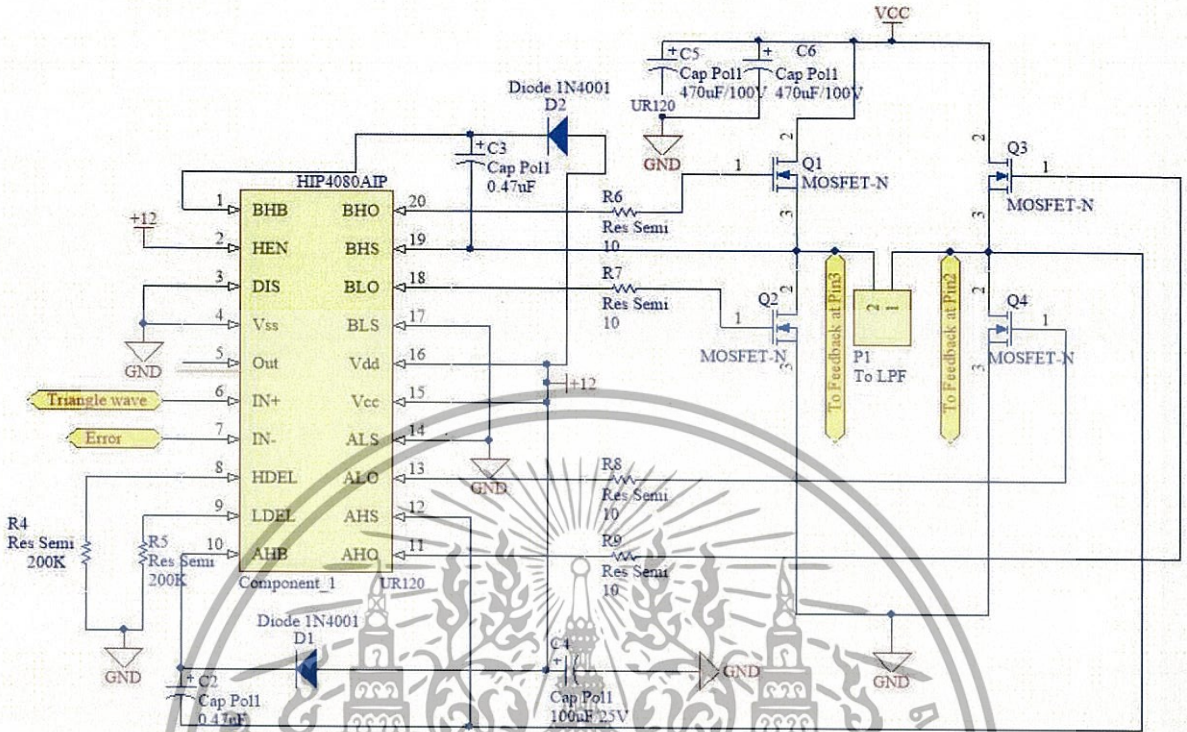
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

วงจร Function Generator ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 12 V ซึ่งสามารถผลิตสัญญาณที่ต้องการความถี่ 150 KHz ขนาด 3 Vpp โดยภาคแรกคือ LM 318N โดยการใช้ Voltage comparator ก็จะทำให้การผลิตสัญญาณ output แบบสี่เหลี่ยม output comparator ของ LM 318N จะถูกโคจรที่จนถึงจุดอิ่มตัว เพราะเช่นนั้นสัญญาณสี่เหลี่ยมอาจมีค่าเป็น +Vcc หรือ -Vcc ก็ได้ ภาคที่ 2 คือ TL 082 เป็นวงจรอินทิเกรเตอร์จะทำการผลิตสัญญาณ output แบบสามเหลี่ยม โดยสัญญาณสามเหลี่ยมจะยกระดับแรงดันที่ 6 V แล้วสัญญาณที่ได้เข้าไปยังวงจร PWM ใน IC HIP4080 เข้าที่ขา 6 โดย % Duty cycle อยู่ที่ 0%-100% เมื่อวงจรมีสัญญาณขาเข้าสูงสุดแต่เมื่อไม่มีสัญญาณขาเข้า % Duty cycle อยู่ที่ 50%

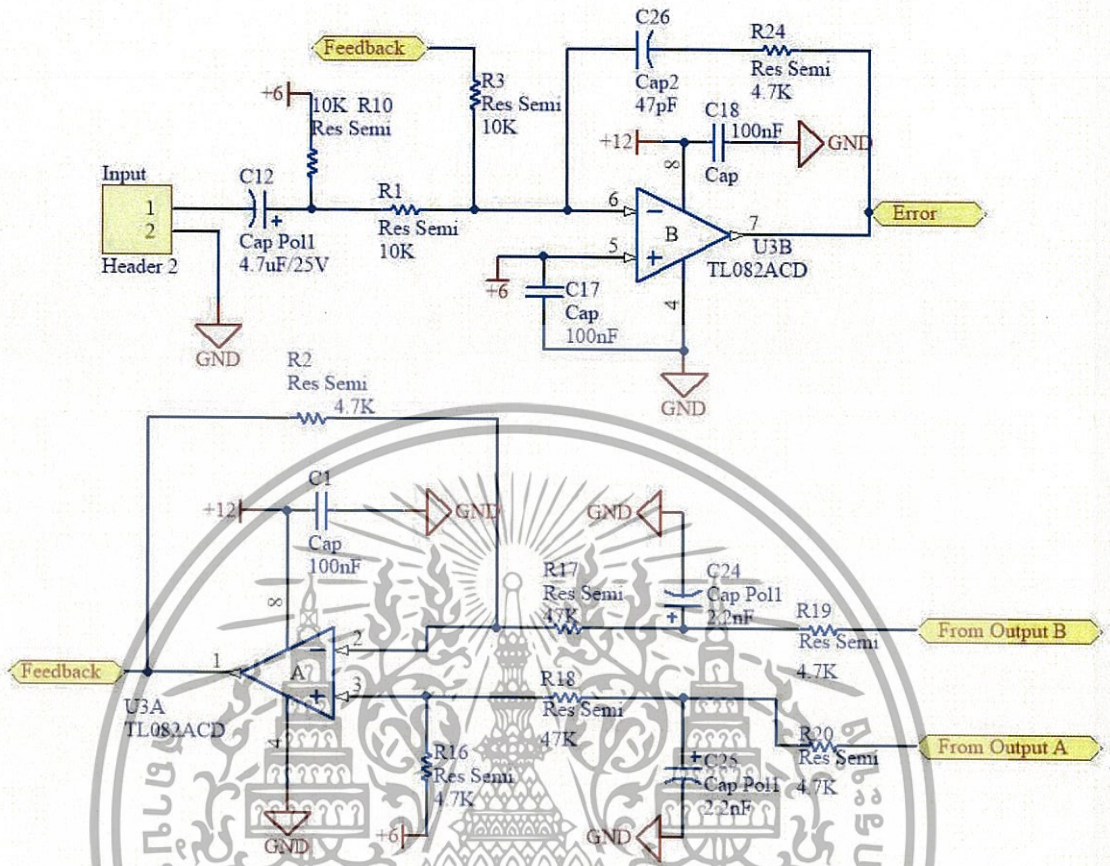
3.2 วงจร Pulse width modulation และ Power state



รูปที่ 3.2 วงจร Pulse width modulation และ Power state

สัญญาณสามเหลี่ยมจะเข้ามาที่ขา 6 และสัญญาณ Error จะเข้ามาที่ขา 7 และจะเปรียบเทียบสัญญาณกันเป็นสัญญาณ PWM และทำการ drive gate โดย Output A จะออกมาอยู่ที่ขา 11 AHO และที่ขา 13 ALO ส่วน Output B จะออกมาที่ขา 18 BLO และขา 20 BHO และมีการใช้เทคนิค Bootstrap Supply ซึ่งมี diode และ Capacitor โดยการต่อ cathode ของ diode และขา capacitor ยังขา BHB และ AHB เพื่อช่วยให้มอเตอร์ส่วนบนสามารถทำงานได้ง่ายขึ้นและ Output A และ B ต่อยังวงจร feedback โดยต่อไปยัง Differential amplifier

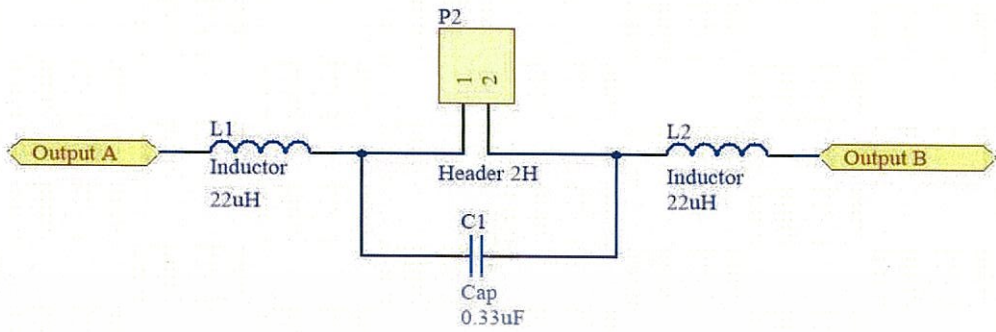
3.3 วงจร Feedback



รูปที่ 3.3 วงจร Feedback

สัญญาณจาก Output ทั้งสองฝั่งจะเข้าสู่วงจร Low Pass filter เพื่อเป็นสัญญาณ sine wave โดยความถี่คัทออฟอยู่ที่ประมาณ 30KHz และสัญญาณเข้าไปที่ Differential amplifier เพื่อขยายผลต่างของสัญญาณจาก Output A และ Output B และผ่านวงจร Negative Feedback แบบ inverting เข้าไปที่ Error amp เพื่อทำการรวมสัญญาณจาก Feedback กับ สัญญาณ Input เราจะได้สัญญาณ Error และส่งต่อไปที่ขา 7 ของ HIP4080 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ สัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อให้เป็นสัญญาณ PWM

3.4 วงจร Low Pass Filter



รูปที่ 3.4 วงจร Low Pass Filter

เพื่อกรองความถี่สูงออกไป เพื่อให้สัญญาณสี่เหลี่ยม เป็นสัญญาณ Sine Wave

3.5 การคำนวณ

3.5.1 หาค่าความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

โดยเราต้องการ ความถี่ 150 KHz

กำหนดให้ $R_{1+2} = 150K\Omega$, $C_1 = 1nF$, $R_{3+4} = 738K\Omega$, $R_5 = 8.2K\Omega$ จะได้

$$F = \frac{1}{4(R_{1+2})C_1} \times \frac{R_{3+4}}{R_5}$$

$$F = \frac{1}{4 \times 150K \times 1n} \times \frac{738K}{8.2K} \quad (3.1)$$

$$F = 150KH_z$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 หาค่าอัตราขยายของวงจร

โดยอัตราขยายแรกเป็นอัตราขยายของวงจร Differential amplifier

จากสมการที่ (2.22) $V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$ Gain ของวงจรสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{V_o}{(V_2 - V_1)} = \frac{R_2}{R_1}$$

เมื่อ $R_1 = 47K\Omega$ และ $R_2 = 4.7K\Omega$ ดังนั้น

$$Gain = \frac{R_2}{R_1} = \frac{4.7K}{47K} = 0.1 \text{ เท่า}$$

การหาอัตราขยายของวงจรทั้งหมดหาได้จาก ใช้กฎกระแส KCL ที่จุด A โดย สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{Gain_{Diff} \times V_{out}}{2R_3} = \frac{V_{in}}{R_1} \quad (3.2)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{2R_3}{Gain_{Diff} \times R_1}$$

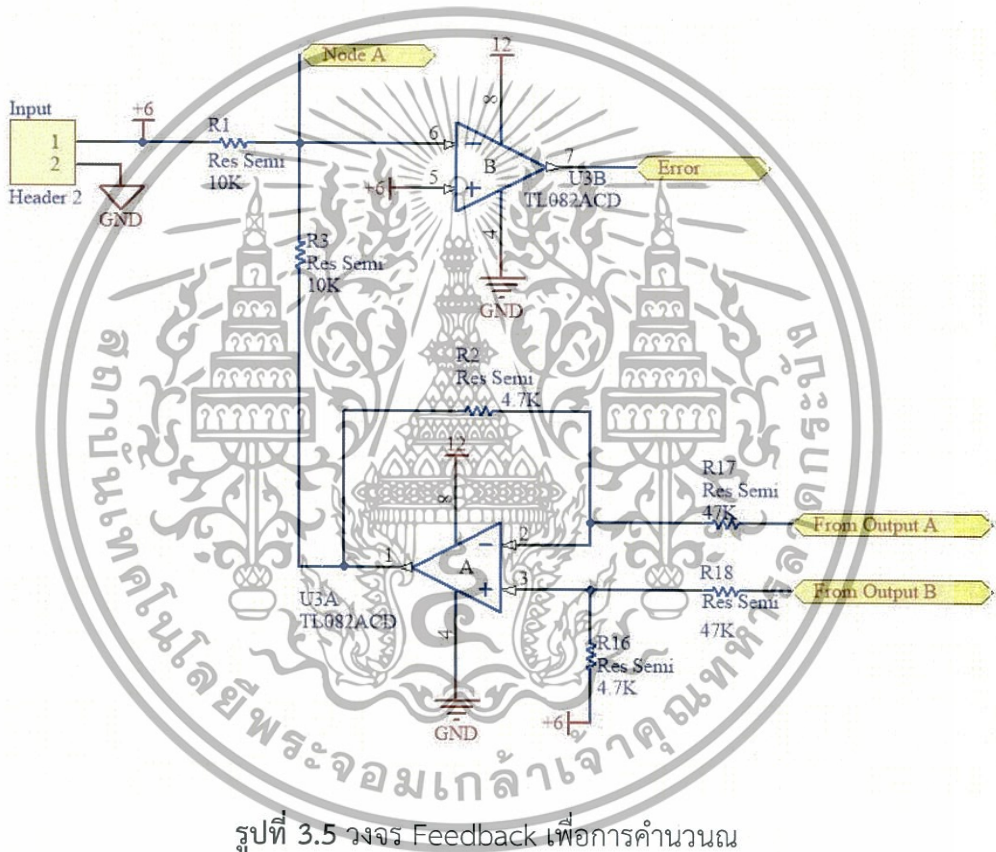
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $Gain_{Diff} = 0.1, R_3 = 10K\Omega, R_1 = 10K\Omega$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{2 \times 10K}{0.1 \times 10K}$$

Gain ของระบบ = 20 เท่า

ดังนั้นอัตราขยายของวงจรเท่ากับ 20 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 หาค่าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำในวงจร Low Pass Filter

3.5.3.1 หาค่าของตัวเก็บประจุ

กำหนดให้ $(R_H) = 8 \Omega$, $f_c = 40 \text{ kHz}$

จาก

$$C_H = \frac{1}{2\pi f_c \sqrt{2} R_H} \quad (3.3)$$

3.5.3.2 หาค่าขดลวดเหนี่ยวนำ

กำหนดให้ $(R_H) = 8 \Omega$, $f_c = 40 \text{ kHz}$

จาก

$$L_H = \frac{\sqrt{2} R_H}{4\pi f_c} \quad (3.4)$$

$$L_H = \frac{\sqrt{2} \times 8}{4\pi \times 40 \text{ kHz}}$$

$$L_H = 22 \mu\text{H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 หาค่าความถี่คัทออฟ

กำหนดให้ $L_H = 22\mu H, C_H = 0.35\mu F$

จาก
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_H C_H}} \quad (3.5)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \times 22\mu H \times 0.35\mu F}}$$

$f_c = 40\text{KHz}$



มหาวิทยาลัยราชภัฏปัตตานี

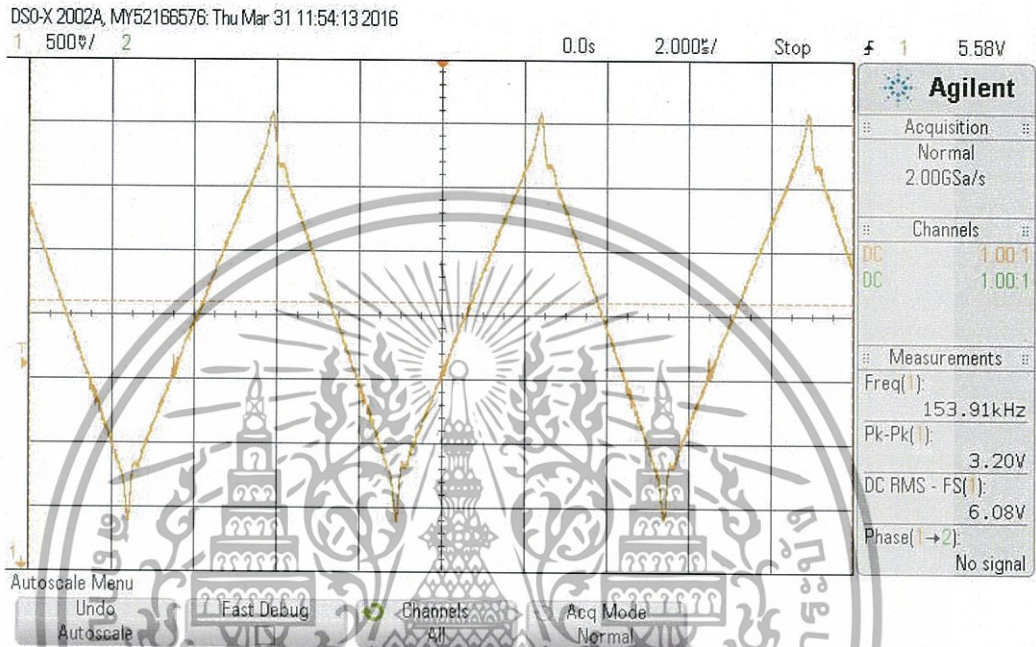
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สัญญาณขาออกของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

Output ของวงจรกำเนิดสามเหลี่ยม

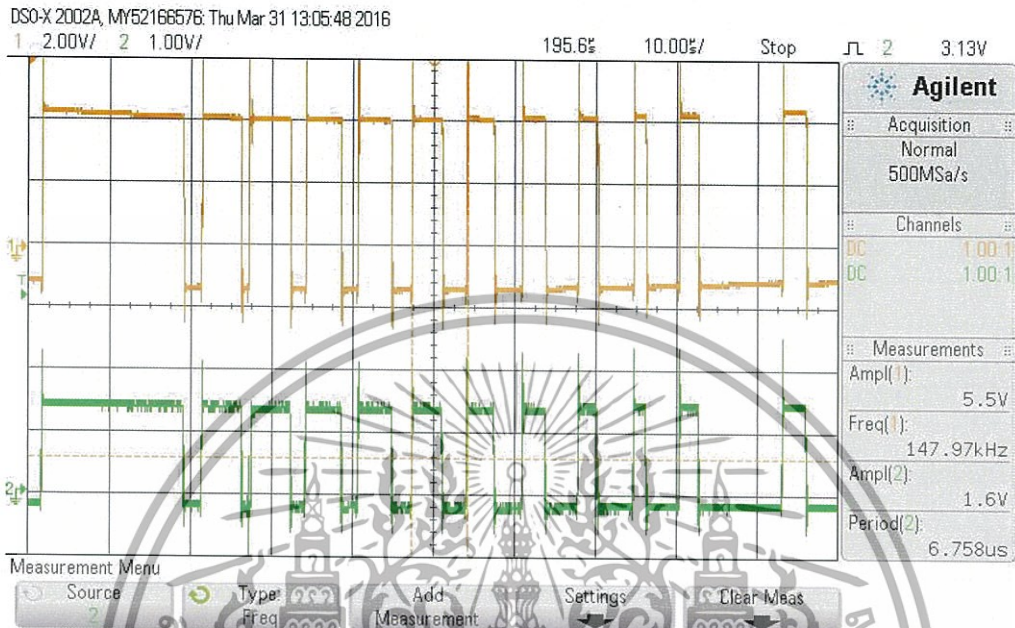


รูปที่ 4.1 Output ของวงจรกำเนิดสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสามเหลี่ยม จะให้กราฟลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม มีความถี่ 153.91 KHz โดยมีแรงดันเท่ากับ 3.20 Vpp

4.2 สัญญาณ Gate drive

Output ของวงจร Gate drive ของ MOSFET Q1 และ Q4 เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟที่ MOSFET เท่ากับ 25 V



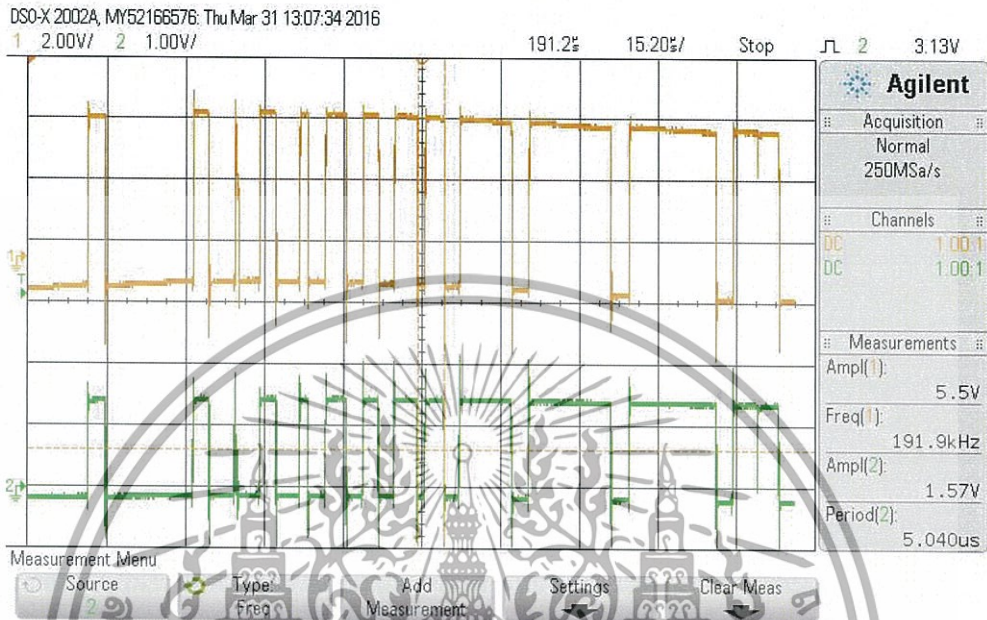
รูปที่ 4.2 สัญญาณ Output Gate drive ของ MOSFET Q1 และ Q4

จากรูปจะได้กราฟสี่เหลี่ยมออกมาโดย

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา BHO ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 147.97 kHz และมีแรงดัน 5.5 V

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา ALO ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 147.97 kHz และมีแรงดัน 1.6 V

Output ของวงจร Gate drive ของ MOSFET Q3 และ Q2 เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟที่ MOSFET เท่ากับ 25 V



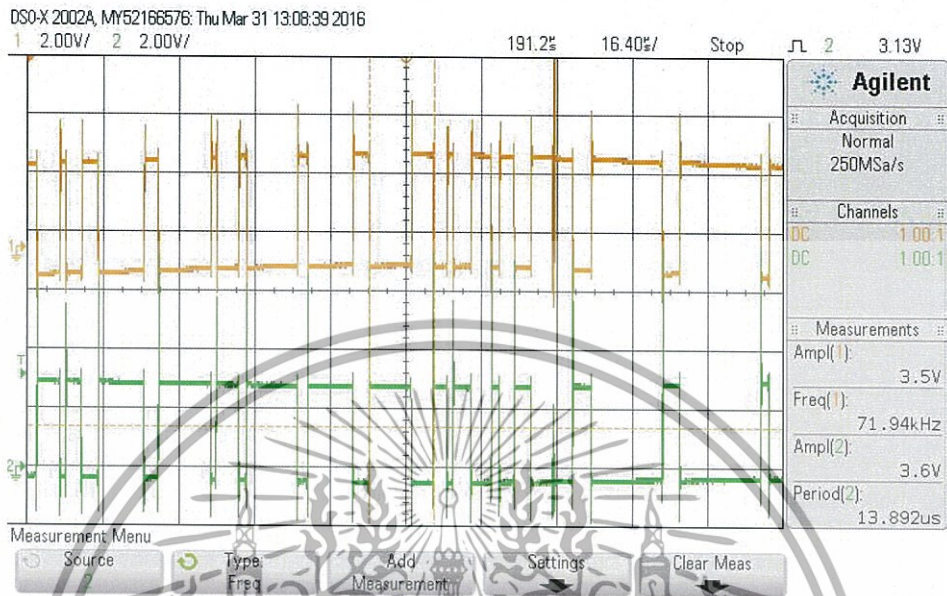
รูปที่ 4.3 สัญญาณ Output Gate-drive ของ MOSFET Q3 และ Q2

จากรูปจะได้กราฟสี่เหลี่ยมออกมาโดย

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา AHO ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 191.90 kHz และมีแรงดัน 55 V

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา BLO ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 198.41 kHz และมีแรงดัน 15.7 V

4.3 สัญญาณขาออกของ Output เมื่อยังไม่ต้องวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน



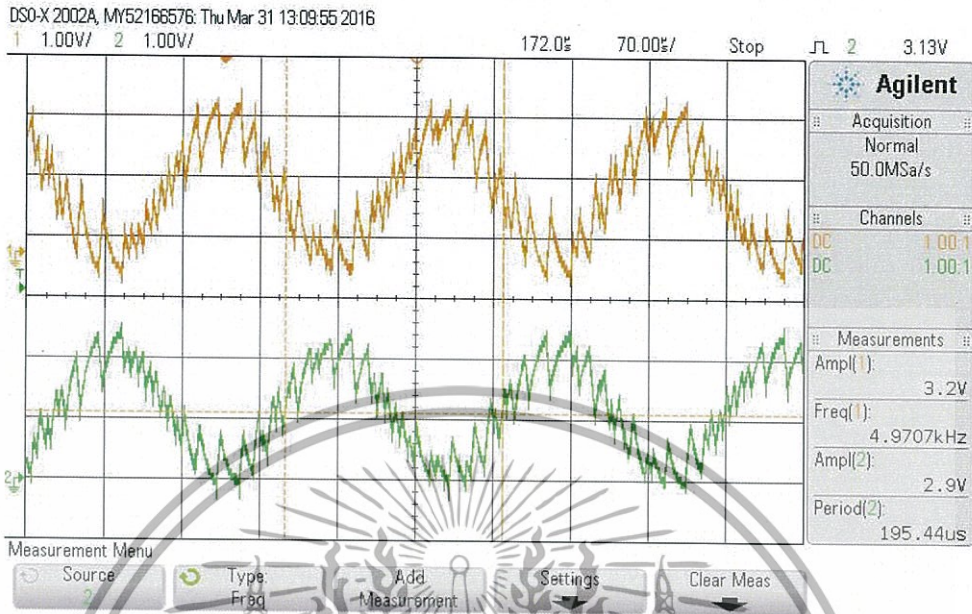
รูปที่ 4.4 สัญญาณ Output เมื่อยังไม่ต้องวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปจะได้กราฟสี่เหลี่ยมออกมาโดย

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา AHS ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 71.94 kHz และมีแรงดัน 35 V

สี่เหลี่ยมคือ Output ที่ขา BHS ของ IC HIP4080 โดยมีความถี่ 71.98 kHz และมีแรงดัน 36 V

4.4 สัญญาณหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 15 KHz ของวงจร Differential Amplifier



รูปที่ 4.5 สัญญาณ Output เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ของวงจร Differential Amplifier

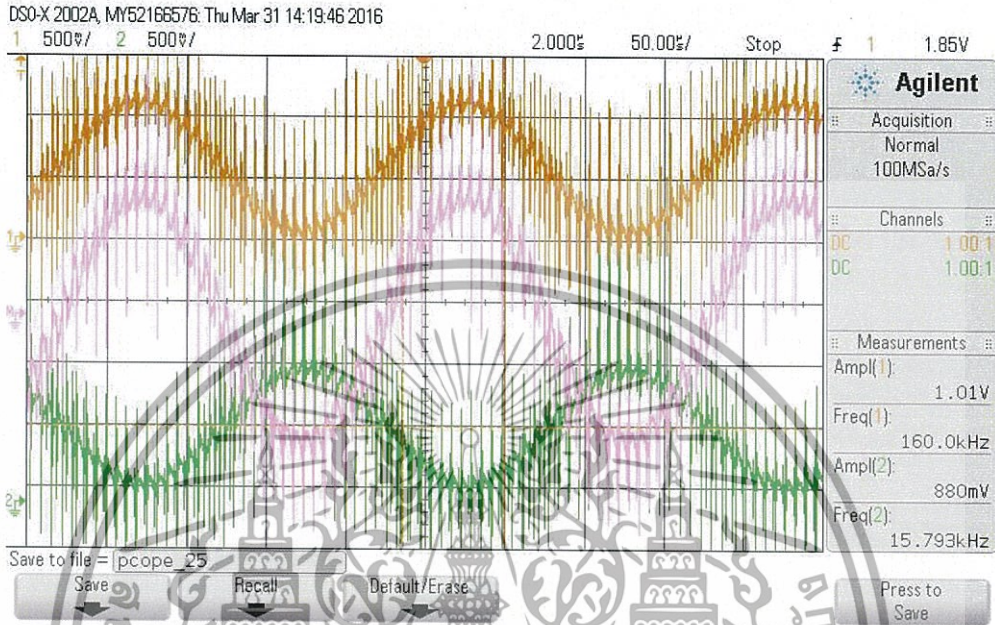
จากรูปจะได้กราฟออกมาโดย

สีเหลืองคือ Output ที่ขา AHS วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีความถี่ 4.97 kHz และมีแรงดัน 32 V

สีเขียวคือ Output ที่ขา BHS วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีความถี่ 5.11 kHz และมีแรงดัน 29 V

4.5 สัญญาณเมื่อผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

โดยสัญญาณขาเข้า รูป Sine wave ซึ่งมีความถี่ 5 kHz และมีแรงดัน 500 mVpp



รูปที่ 4.6 สัญญาณ Output ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปจะได้กราฟออกมาโดย

สีเหลืองคือ Output ที่ขา AHS ซึ่งผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 40 KHz โดยมีความถี่ 5 kHz และมีแรงดัน 10.1 V

สีเขียวคือ Output ที่ขา BHS ซึ่งผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 40 KHz โดยมีความถี่ 5 kHz และมีแรงดัน 8.8 V

สีชมพูคือ Output รวมของวงจร ซึ่งมีความถี่ 5 KHz และมีแรงดัน 20 V

4.6 การทดสอบ Frequency response

วิธีการทดสอบ Frequency response

1. ใส่สัญญาณรูป Sine wave ขนาดสัญญาณ 1 Vpp
2. วัดสัญญาณ Output โดยปรับความถี่ที่ความถี่ต่างๆ
3. นำมาคำนวณ Gain จากสมการ

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.1)$$

และคำนวณในหน่วย dB จากสมการ

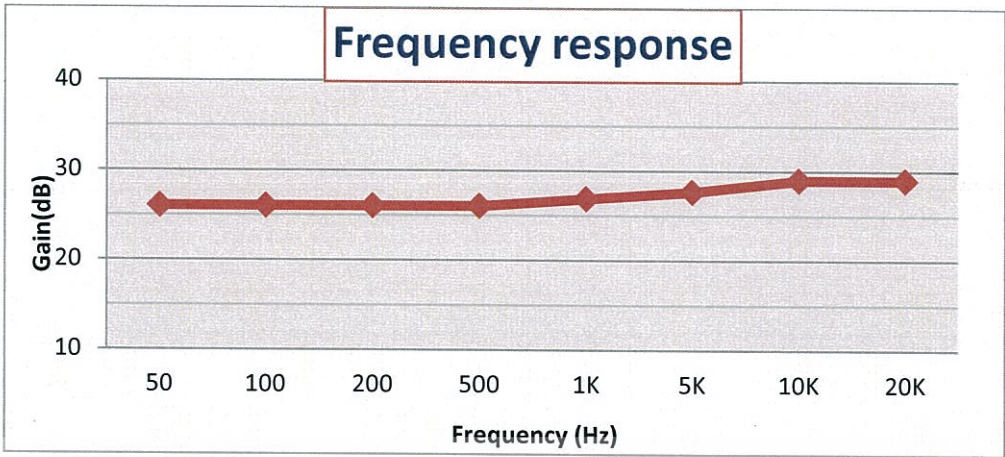
$$Gain(dB) = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.2)$$

วงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1

ตารางที่ 4.1 Frequency response ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$

Frequency (Hz)	Vin (Vpp)	Vout (Vpp)	Gain	Gain(dB)
50	1	20	20	26.02
100	1	20	20	26.02
200	1	20	20	26.02
500	1	20	20	26.02
1K	1	22	22	26.84
5K	1	24	24	27.60
10K	1	28	28	28.94
20K	1	28	28	28.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

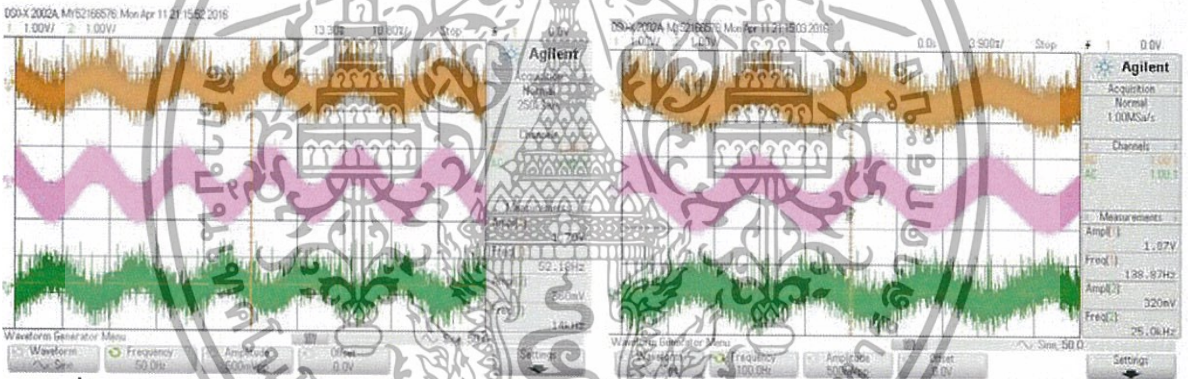


รูปที่ 4.7 กราฟ Frequency response ของวงจรขยายส่วนแรก

สัญญาณของ Output ของวงจรที่ 1 ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$

ที่ความถี่ 50 Hz

ที่ความถี่ 100 Hz

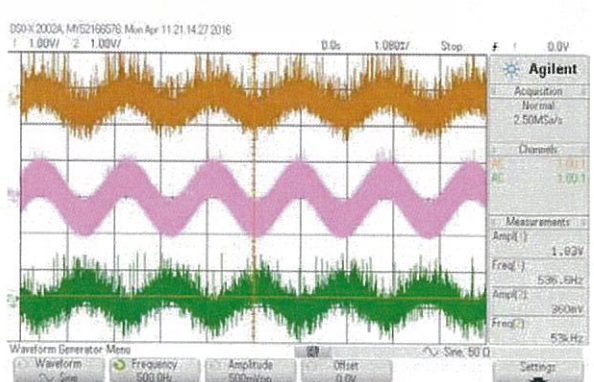
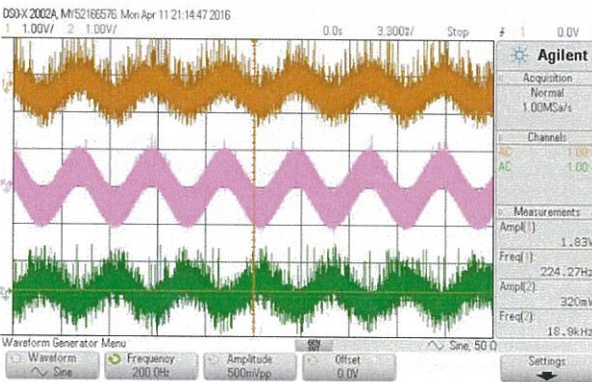


รูปที่ 4.8 สัญญาณของOutputที่ความถี่ 50 Hz

รูปที่ 4.9 สัญญาณของOutputที่ความถี่ 100 Hz

ที่ความถี่ 200 Hz

ที่ความถี่ 500 Hz

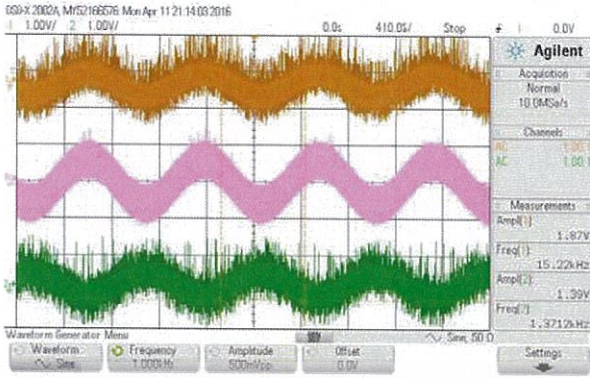


รูปที่ 4.10 สัญญาณของOutputที่ความถี่200Hz

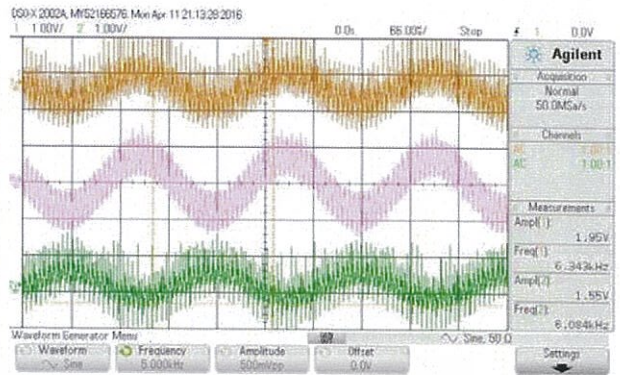
รูปที่ 4.11 สัญญาณของOutputที่ความถี่500Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 1K Hz



ที่ความถี่ 5K Hz



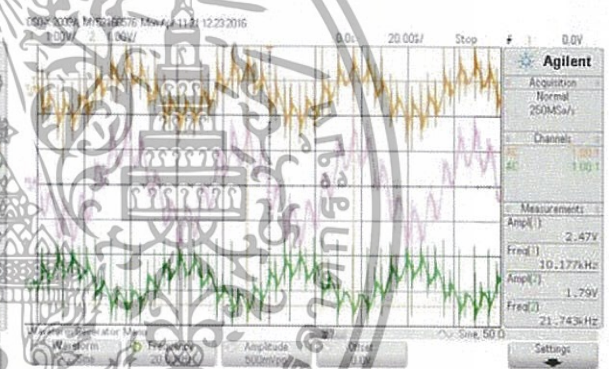
รูปที่ 4.12 สัญญาณของOutputที่ความถี่ 1 KHz

รูปที่ 4.13 สัญญาณของOutputที่ความถี่ 5 KHz

ที่ความถี่ 10K Hz



ที่ความถี่ 20K Hz



รูปที่ 4.14 สัญญาณของOutputที่ความถี่10KHz

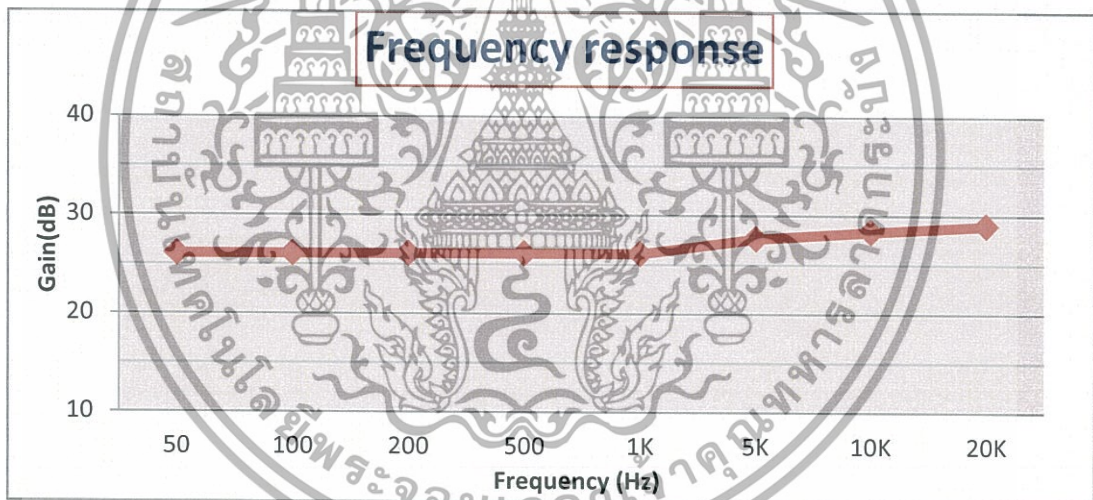
รูปที่ 4.15 สัญญาณของOutputที่ความถี่20KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2

ตารางที่ 4.2 Frequency response ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$

Frequency (Hz)	Vin (Vpp)	Vout (Vpp)	Gain	Gain(dB)
50	1	20	20	26.02
100	1	20	20	26.02
200	1	20	20	26.02
500	1	20	20	26.02
1K	1	20	20	26.02
5K	1	24	24	27.60
10K	1	26	26	28.30
20K	1	28	28	28.94



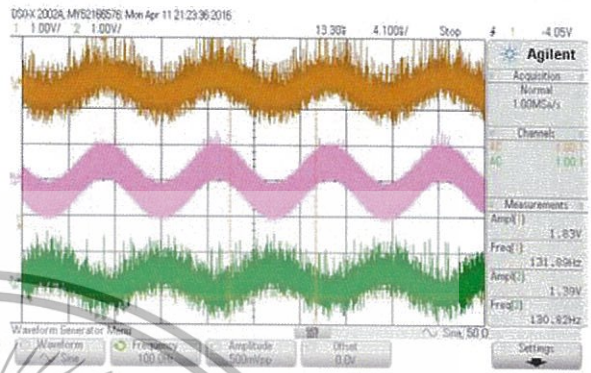
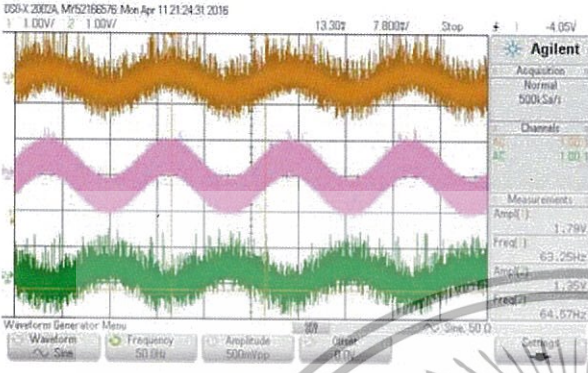
รูปที่ 4.16 กราฟ Frequency response ของวงจรขยายส่วนสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณของ Output ของวงจรที่ 2 ที่ความถี่ต่างๆ ที่ $R_L = 8 \Omega$

ที่ความถี่ 50 Hz

ที่ความถี่ 100 Hz

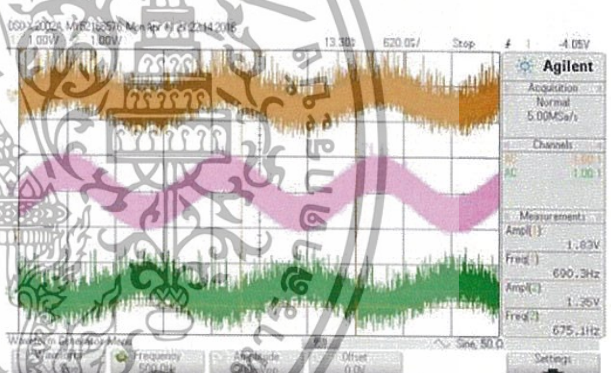
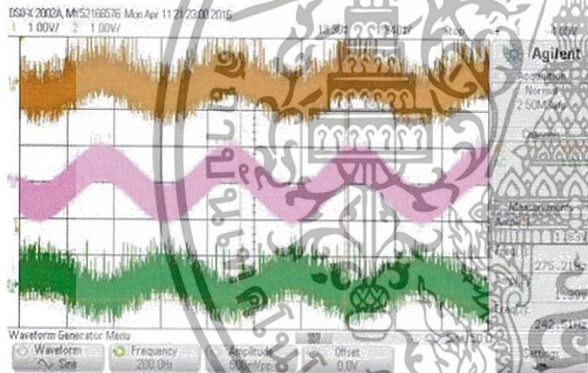


รูปที่ 4.17 สัญญาณของOutputที่ความถี่50Hz

รูปที่ 4.18 สัญญาณของOutputที่ความถี่100Hz

ที่ความถี่ 200 Hz

ที่ความถี่ 500 Hz

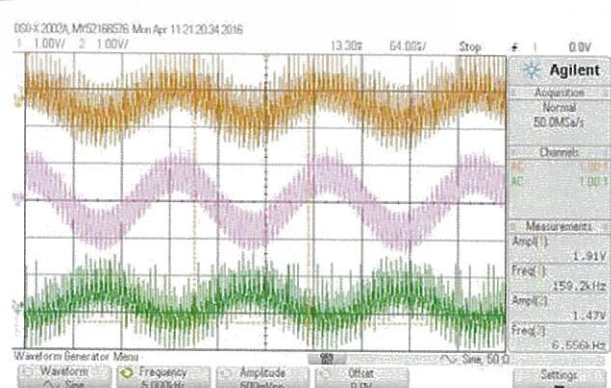
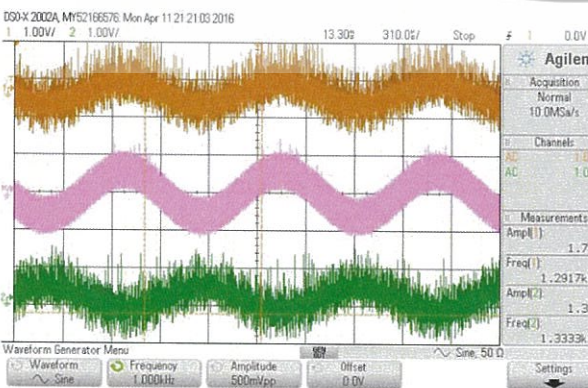


รูปที่ 4.19 สัญญาณของOutputที่ความถี่200Hz

รูปที่ 4.20 สัญญาณของOutputที่ความถี่500Hz

ที่ความถี่ 1K Hz

ที่ความถี่ 5K Hz

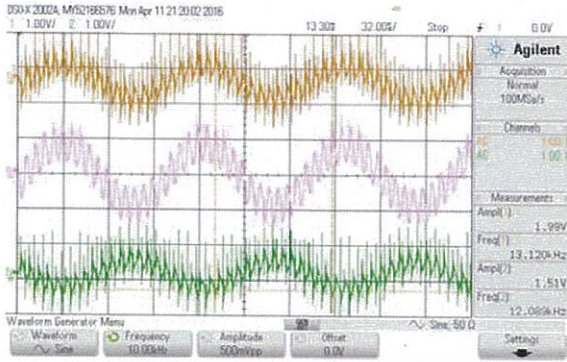


รูปที่ 4.21 สัญญาณของOutputที่ความถี่1KHz

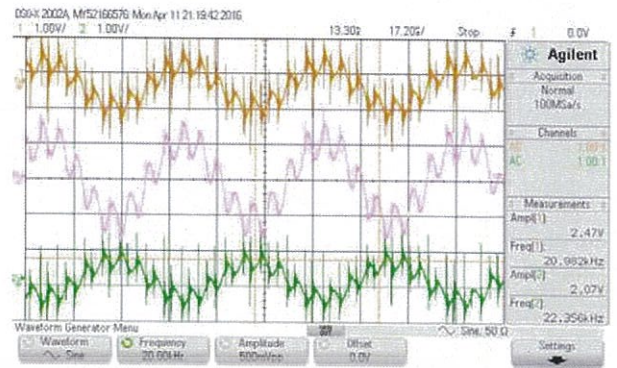
รูปที่ 4.22 สัญญาณของOutputที่ความถี่5KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 10K Hz



ที่ความถี่ 20K Hz



รูปที่ 4.23 สัญญาณของOutputที่ความถี่10KHz

รูปที่ 4.24 สัญญาณของOutputที่ความถี่20KHz

4.7 ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ทางออก (Maximum Electric Power)

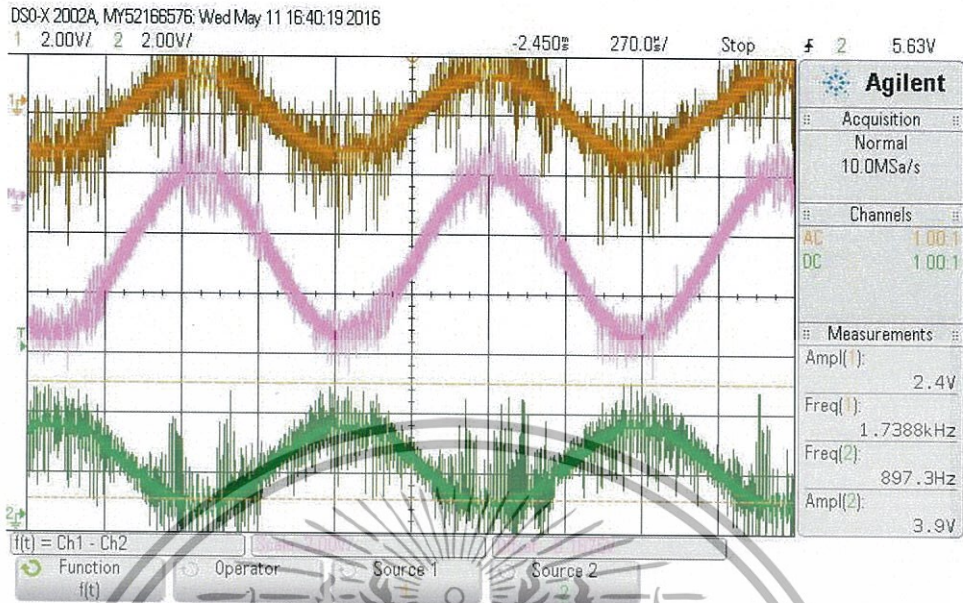
การคำนวณกำลังไฟฟ้า จากสมการ

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

(4.3)

ใส่สัญญาณ Input ขนาด 3 Vpp ความถี่ 10K Hz ที่โหลด Output 8Ω

วงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1



รูปที่ 4.25 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจร PWM Power Amplifier วงจรที่ 1

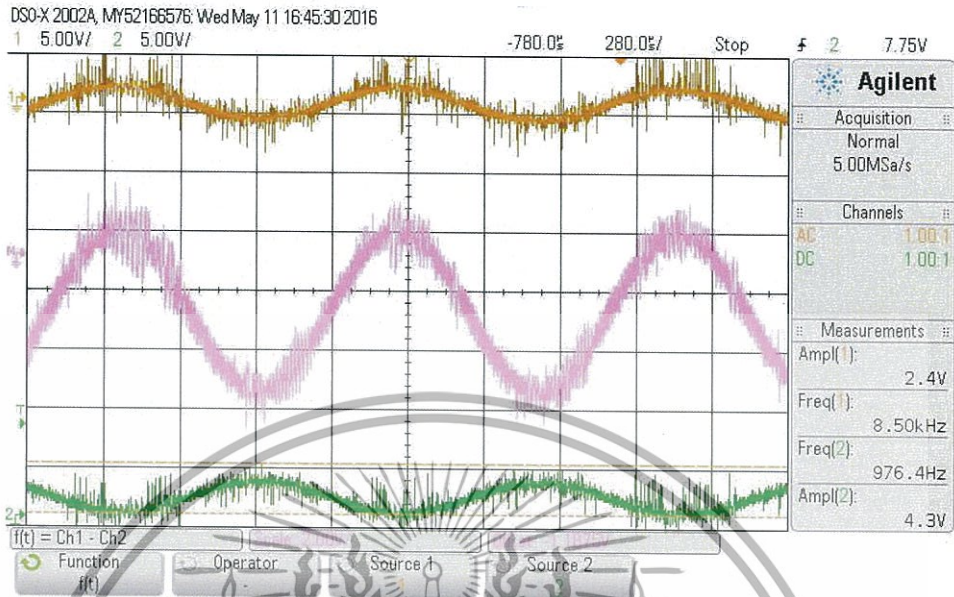
จากรูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเท่ากับ 56 V_{pp} หรือเท่ากับ 19.80 V_{rms}

จากสมการที่ (4.3)

$$P = \frac{19.80^2}{8} = 49 \text{ W}_{rms}$$

กำลังไฟฟ้าของวงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1 ที่เท่ากับ 49 W_{rms}

วงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2



รูปที่ 4.26 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจร PWM Power Amplifier วงจรที่ 2

จากรูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเท่ากับ 56 Vpp หรือเท่ากับ 19.80 Vrms

จากสมการที่ (4.3)

$$P = \frac{19.80^2}{8} = 49W_{rms}$$

กำลังไฟฟ้าของวงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2 ที่เท่ากับ $49W_{rms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การทดสอบประสิทธิภาพ (Efficiency)

คำนวณประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถทำได้จากการคำนวณ จากสมการ

$$\text{Efficiency} = \eta = \frac{R_L}{2r_{DS(on)} + R_L} \quad (4.4)$$

เมื่อ $R_L = 8\Omega$ และ $r_{DS(on)} = 0.150\Omega$

$$\eta = \frac{8}{2 \times 0.15 + 8} \times 100\% \quad (4.5)$$

$$\eta = 96\%$$

ทดสอบประสิทธิภาพของวงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของ PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 1

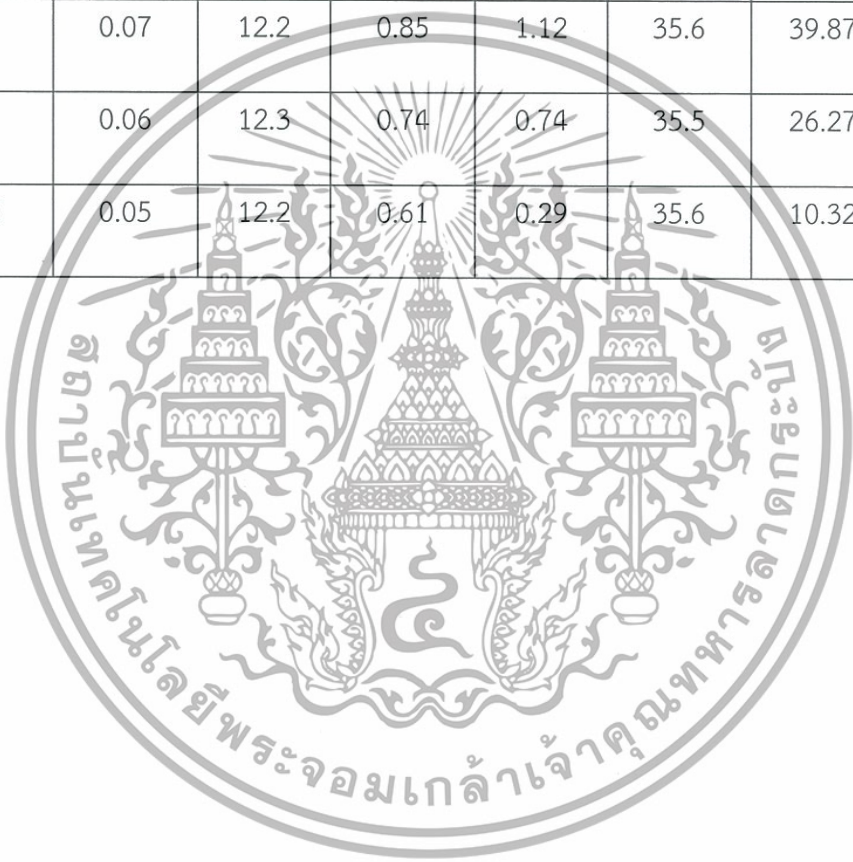
กำลังไฟฟ้า ที่ทางออก (W)	ชุดไฟเลี้ยง IC			ชุดไฟเลี้ยง Power state			η (%)
	กระแส ไฟฟ้า(A)	แรงดัน ไฟฟ้า(V)	กำลัง ไฟฟ้า(W)	กระแส ไฟฟ้า(A)	แรงดัน ไฟฟ้า(V)	กำลัง ไฟฟ้า(W)	
49	0.07	12.2	0.85	1.45	35.5	51.48	93.64
39	0.06	12.2	0.73	1.13	35.5	40.12	95.47
25	0.06	12.3	0.74	0.72	35.6	25.63	94.82
6.25	0.05	12.2	0.61	0.28	35.6	10	58.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบประสิทธิภาพของวงจร PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของ PWM Audio Power Amplifier วงจรที่ 2

กำลังไฟฟ้า ที่ทางออก (W)	ชุดไฟเลี้ยง IC			ชุดไฟเลี้ยง Power state			η (%)
	กระแส ไฟฟ้า(A)	แรงดัน ไฟฟ้า(V)	กำลัง ไฟฟ้า(W)	กระแส ไฟฟ้า(A)	แรงดัน ไฟฟ้า(V)	กำลัง ไฟฟ้า(W)	
49	0.06	12.2	0.73	1.46	35.5	51.83	93.23
39	0.07	12.2	0.85	1.12	35.6	39.87	95.78
25	0.06	12.3	0.74	0.74	35.5	26.27	92.56
6.25	0.05	12.2	0.61	0.29	35.6	10.32	57.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากการทดลองพบว่าสัญญาณ PWM ที่ควบคุม MOSFET ตัวที่ 1 และตัวที่ 4 ซึ่งเป็น output ที่ขา BHO และ ขาALO ซึ่งสัญญาณที่ออกมานั้นเป็นสัญญาณที่ตรงเฟสกันเนื่องจาก การทำงานของ MOSFET ตัวที่ 1 และตัวที่ 4 ต้องทำงานสัมพันธ์กันและในทำนองเดียวกันสัญญาณจากขา AHO และ ขา BLO ที่ควบคุม MOSFET ตัวที่ 2 และ 3 สัญญาณที่ขาทั้งสองนั้นเป็นสัญญาณที่มีเฟสตรงกัน เช่นกัน เมื่อสัญญาณผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่คล้ายคลึงกับ สัญญาณ sine wave ที่ใส่เข้าไป และจากการทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจรนั้นที่ความถี่ต่ำ 50 Hz ถึง 1 KHz วงจรมีอัตราขยายอยู่ที่ 20 เท่าตามที่ออกแบบไว้แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นทำให้อัตราขยายของวงจรนั้นไม่คงที่ซึ่งอัตราขยายเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยและจากการทดสอบวงจรสามารถทำ กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 49+49 W และการทดสอบประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้แต่ที่ กำลังไฟฟ้าน้อย มีค่าประสิทธิภาพของวงจรต่ำเนื่องจาก IC ต้องการไฟเลี้ยงตลอดเวลาจึงเกิดกำลัง สูญเสียที่จุดนี้

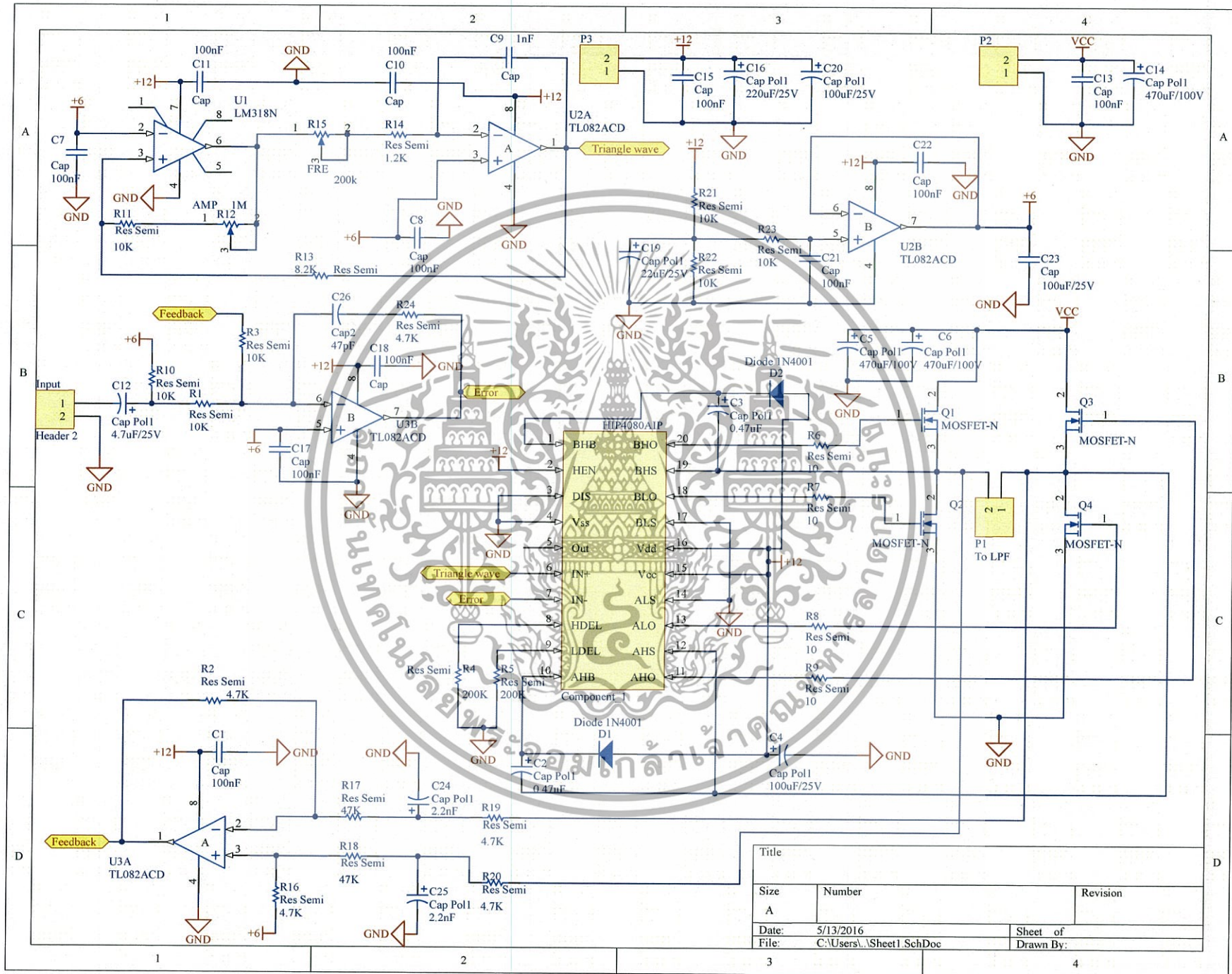
บรรณานุกรม

- [1] Application Note: Op Amp Circuit Collection [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 10 มกราคม 2558 <http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>
- [2] Datasheet: HIP4080AIP [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 18 มกราคม 2558 www.intersil.com/content/dam/Intersil/.../hip4080a.pdf
- [3] Application Note: Class-D Audio 2 [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2558 <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an95/an9525.pdf>
- [4] Datasheet: TL082 [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 28 มกราคม 2558 <http://www.ti.com/cn/lit/gpn/tl082-n.pdf>
- [5] Datasheet: LM318N [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 28 มกราคม 2558 www.ti.com/lit/ds/symlink/lm318-n.pdf
- [6] Bootstrap Supply [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2558 <http://www.silabs.com/Support Documents/TechnicalDocs/AN486.pdf>
- [7] Operational amplifier applications [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2558 https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier_applications
- [8] RC Low pass filter [ออนไลน์] ค้นเมื่อ 1 เมษายน 2558 http://www.ekswai.com/en_lowpass.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title		
Size	Number	Revision
A		
Date:	5/13/2016	Sheet of
File:	C:\Users\... \Sheet1.SchDoc	Drawn By: