# การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์

นายปิ่นนเรศ อุตตมะเวทิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ.2540

ISBN 974-637-926-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T 187774X

# DESIGN OF A SWITCHMODE AMPLIFIER

MR.PINNARATE UTTAMAWATIN

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1997

ISBN 974-637-926-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์

โดย : นายปิ่นนเรศ อุตตมะเวทิน

ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสาตราจารย์.ดร.โคทม อารียา

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

( รองศาสตราจารย์.ดร.โคทม อารียา )

..... กรรมการ

( อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ )

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ปิ่นนเรศ อุตตนะเวทิน : การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ (DESIGN OF A SWITCHMODE AMPLIFIER) อ. ที่ปรึกษา : อ. เจิดกุล โสภาวนิตย์ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. โคทม อารียา , 106 หน้า , ISBN 974-637-926-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่สามารถจ่ายกำลังได้ 120 W แก่โหลด 4 โอห์ม ทำการขยายเสียงในย่านความถี่ 20 Hz ถึง 20 kHz โดยการป้อนแรงดันไฟตรงประมาณ 40 โวลต์ ผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ซึ่งใช้เทคนิคมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ใช้มอสเฟตจำนวน 4 ตัวเป็นสวิตช์และใช้ IC เบอร์ HIP4080 เป็นวงจรขับนำ ซึ่งทำให้ภาคขับนำมีขนาดเล็กลง การควบคุมอินเวอร์เตอร์ใช้การป้อนกลับแรงดันโดยสุ่มจากด้านออกของอินเวอร์เตอร์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันด้านเข้า ในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่การสวิตช์ 250 kHz ส่วนความถี่การมอดูเลตเท่ากับความถี่เสียง ภาควงจรกรองผ่านต่ำใช้วงจรกรองแบบราบสุด อันดับ 4 จำนวน 2 ชุด ประสิทธิภาพของวงจรขยายเสียงสูงกว่า 70 % ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกน้อยกว่า 5 % และเป็นวงจรขยายเสียงที่มีขนาดเล็ก

| | |
|---|---|
| ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า | ลายมือชื่อนิสิต ..... |
| สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... |
| ปีการศึกษา 2540 | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... |

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

## C715645 : MAJOR POWER ELECTRONICS
KEY WORD: SWITCHMODE AMPLIFIER

PINNARATE UTTAMAWATIN : DESIGN OF A SWITCHMODE AMPLIFIER . THESIS ADVISOR: CHERDKUL SOPAVANIT. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. GOTHOM ARYA .106 pp ISBN 974-637-926-7

This thesis presents the design , construction and testing of a switchmode amplifier which can deliver a power of 120 W to a load of 4 ohms and can amplify signals in the audio frequency range of 20 Hz to 20 kHz. A DC power supply of approximately 40 V feeds a bridge-type inverter which uses PWM modulation technique. Four MOSFETs are used as switches having the IC No. HIP4080 as their driving circuit to minimize component count. The inverter uses a voltage feedback control. In this thesis, a switching frequency of 250 kHz is used while the modulation frequency is in the audio frequency range. A 4th order Butterworth low-pass filter was used. The designed switchmode amplifier is small in size and has an overall efficiency of more than 70 % as well as a total harmonic distortion of less than 5 %.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.โคทม อารียา, อ.เจิดกุล โสภาวนิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีมาตลอด อีกทั้ง ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต, รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัศมี และ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวนามมาข้างต้น

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนวิจัยวิจัยจากองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย และได้รับการสนับสนุนการลาศึกษาต่อจาก ผู้อำนวยการฝ่ายจัดการแปรสภาพ (คุณประไพ นุตจรัส) ผู้อำนวยการส่วนจัดการงานพันธมิตรร่วมลงทุน (คุณประทุม มากกิตติ) ผู้อำนวยการกองประเมินผล (คุณชาติชาย ชม-เชย) ผู้อำนวยการกองสรรหาพันธมิตรร่วมลงทุน (คุณน้ำจิตต์ โล่ห์ตระกูล)จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย และขอขอบคุณ คุณสุกัลยา จิตรแสวง,คุณนันทิภร จุโฬทก,คุณศิรินภา ทองเจิม,คุณประยุทธ์ ผาสุก ยืนยง, คุณธารทิพย์ ผิวตาลดี, คุณเสมอมาศ บุญศิริ, คุณสรพงษ์ ล่องวิลัย และคุณนัยนา พัฒนกูล ที่มีส่วนช่วยข้าพเจ้าในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนพนักงานฝ่ายจัดการแปรสภาพทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจตลอดมา

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และคุณป้า ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมข้าพเจ้าในด้านการศึกษารวมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ปิ่นนเรศ อุตตมะเวทิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ช
สารบัญภาพ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ..... 1
2. วงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์..... 4
3. แบบจำลองโดยคอมพิวเตอร์..... 27
4. ผลการทดสอบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์..... 50
5. สรุป และข้อเสนอแนะ..... 86

รายการอ้างอิง..... 87
ภาคผนวก..... 88
ภาคผนวก ก. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ..... 89
ภาคผนวก ข. HIP4081..... 92
ประวัติผู้เขียน..... 106

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 2 V..... 34

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 1.5 V..... 34

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 1 V..... 34

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 0.5 V..... 35

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 0.3 V..... 35

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันกรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 0.1 V..... 35

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันเมื่อมีการป้อนกลับ กรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 1 V..... 44

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันเมื่อมีการป้อนกลับ กรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 0.5 V..... 44

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าแรงดันด้านออกและค่าอัตราขยายแรงดันเมื่อมีการป้อนกลับ กรณี $V_S$ เท่ากับ 40 V แรงดันอินพุตมีแอมพลิจูด 0.1 V..... 45

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบวัดค่าแรงดันด้านออกที่ความถี่ต่างๆ เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 52

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบวัดค่าแรงดันด้านออกที่ความถี่ต่างๆ เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V..... 53

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเฟสระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบเฟสระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 1 V..... 65
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 0.6 V..... 68
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 1 V..... 69
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเมื่อความถี่หลักมูล เท่ากับ 1 kHz..... 69
ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 1.2 V..... 73
ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 1.9 V..... 74
ตารางที่ 4.10 ผลการวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 0.6 V..... 77
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 1 V..... 77

# สารบัญภาพ


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 1.1 | แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ | 2 |
| รูปที่ 2.1 | แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ | 4 |
| รูปที่ 2.2 | อัตราขยายที่เป็นเชิงเส้นของวงจร ในรูปที่ 2.1 | 5 |
| รูปที่ 2.3 | แสดงวงจรในรูปที่ 2.1 เมื่อแทนสวิตช์ S ด้วย MOSFET | 5 |
| รูปที่ 2.4 | แสดงวงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์แบบวงจรบริดจ์ขณะวงรอบเปิด | 6 |
| รูปที่ 2.5 | แสดงการป้อนกลับในวงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์แบบวงจรบริดจ์ | 7 |
| รูปที่ 2.6 | แสดงส่วนประกอบภาคต่างๆของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ | 7 |
| รูปที่ 2.7 | แสดงวงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์ขับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์โดยใช้ IC HIP4080 | 8 |
| รูปที่ 2.8 | แสดงลักษณะของสัญญาณ PWM | 10 |
| รูปที่ 2.9 | วงจรและกราฟคุณสมบัติของวงจรปรับเสียงทุ้มแบบพาสซีฟ | 12 |
| รูปที่ 2.10 | วงจรและกราฟคุณสมบัติของวงจรปรับเสียงแหลมแบบพาสซีฟ | 13 |
| รูปที่ 2.11 | วงจรและกราฟคุณสมบัติของวงจรปรับเสียงทุ้ม-แหลมแบบพาสซีฟ | 14 |
| รูปที่ 2.12 | ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำ | 16 |
| รูปที่ 2.13 | แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองราบสุด | 16 |
| รูปที่ 2.14 | แสดงวงจรกรองแบบราบสุด เมื่อ n เป็นจำนวนคี่และคู่ | 17 |
| รูปที่ 2.15 | รูปวงจรกรองผ่านต่ำที่ใช้ | 19 |
| รูปที่ 2.16 | รูปวงจรกรองแบบราบสุดที่จะใช้ (ออกแบบครึ่งเดียว) | 19 |
| รูปที่ 2.17 | แสดงวงจรกรองราบสุดอันดับ 4 ที่ใช้ในงานวิจัย | 22 |
| รูปที่ 2.18 | แสดงแผนภาพบล็อกการควบคุมอินเวอร์โดยดารป้อนกลับแรงดัน | 22 |
| รูปที่ 2.19 | วงจรคุมค่าที่ใช้ในการขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์ | 23 |
| รูปที่ 2.20 | แสดงอัตราขยายวงรอบที่ต้องการ | 24 |
| รูปที่ 3.1 | วงจรปรับเสียงทุ้ม – แหลม ที่ใช้ในงานวิจัย | 27 |

สารบัญภาพ(ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 3.2 | รูปแบบจำลองวงจรและผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรปรับเสียงทุ้ม กรณีเพิ่มเสียงทุ้ม | 28 |
| รูปที่ 3.3 | รูปแบบจำลองวงจรและผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรปรับเสียงทุ้ม กรณีลดเสียงทุ้ม | 28 |
| รูปที่ 3.4 | รูปแบบจำลองวงจรและผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรปรับเสียงแหลม กรณีเพิ่มเสียงแหลม | 29 |
| รูปที่ 3.5 | รูปแบบจำลองวงจรและผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรปรับเสียงแหลม กรณีลดเสียงแหลม | 29 |
| รูปที่ 3.6 | แบบจำลองวงจรกรองแบบเรียบสุด $f_C$ = 33 kHz | 30 |
| รูปที่ 3.7 | แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่วงจรกรองแบบเรียบสุด อันดับ 4 กรณีโหลดเท่ากับ 4 โอห์ม | 30 |
| รูปที่ 3.8 | แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่วงจรกรองแบบเรียบสุด อันดับ 4 กรณีโหลดเท่ากับ 8 โอห์ม | 31 |
| รูปที่ 3.9 | แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่วงจรกรองแบบเรียบสุด อันดับ 4 กรณีโหลดเท่ากับ 16 โอห์ม | 31 |
| รูปที่ 3.10 | แสดงแบบจำลองวงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตช์ทำงานแบบวงรอบเปิด | 32 |
| รูปที่ 3.11 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 500 Hz | 33 |
| รูปที่ 3.12 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz | 33 |
| รูปที่ 3.13 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 5 kHz | 33 |
| รูปที่ 3.14 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 10 kHz | 33 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต
เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 15 kHz..... 33

รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุต
เท่ากับ 2 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 kHz..... 33

รูปที่ 3.17 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 2 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.9)..... 36

รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1.5 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.68)..... 37

รูปที่ 3.19 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.45)..... 38

รูปที่ 3.20 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.5 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.22)..... 39

รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.3 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.136)..... 40

รูปที่ 3.22 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.1 V (อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.04)..... 41

รูปที่ 3.23 แสดงแบบจำลองวงจรขยายเสียงวิธีสวิตช์ทำงานวงรอบปิด..... 42

รูปที่ 3.24 รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V
ความถี่หลักมูลเท่ากับ 500 Hz..... 43

รูปที่ 3.25 รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V
ความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz..... 43

รูปที่ 3.26 รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V
ความถี่หลักมูลเท่ากับ 5 kHz..... 43

สารบัญภาพ(ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 3.27 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 10 kHz | 43 |
| รูปที่ 3.28 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 15 kHz | 44 |
| รูปที่ 3.29 | รูปคลื่นแรงดันด้านออกตกคร่อมโหลด 4 โอห์ม เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 kHz | 44 |
| รูปที่ 3.30 | กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดันกรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V | 46 |
| รูปที่ 3.31 | กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดันกรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.5 V | 47 |
| รูปที่ 3.32 | กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดันกรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.1 V | 48 |
| รูปที่ 3.33 | แสดงวงจรคุมค่า | 49 |
| รูปที่ 3.34 | แสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายวงรอบของวงจรคุมค่า | 49 |
| รูปที่ 4.1 | วงจรที่ใช้ทดสอบวงจรขยายแบบสวิตช์ | 51 |
| รูปที่ 4.2 | แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญานอินพุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 Hz | 54 |
| รูปที่ 4.3 | แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญานอินพุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 100 Hz | 54 |
| รูปที่ 4.4 | แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญานอินพุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 500 Hz | 55 |
| รูปที่ 4.5 | แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญานอินพุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz | 55 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า


รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 5 kHz..... 56

รูปที่ 4.7 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 10 kHz..... 56

รูปที่ 4.8 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 15 kHz..... 57

รูปที่ 4.9 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 0.6 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 kHz..... 57

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 58

รูปที่ 4.11 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 Hz..... 59

รูปที่ 4.12 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 100 Hz..... 59

รูปที่ 4.13 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 500 Hz..... 60

รูปที่ 4.14 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz..... 60

รูปที่ 4.15 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 5 kHz..... 61

รูปที่ 4.16 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 10 kHz..... 61

รูปที่ 4.17 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 15 kHz..... 62

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า


รูปที่ 4.18 แสดงแรงดันด้านออกของวงจรขยาย เมื่อสัญญาณอินพุตมีแอมพลิจูด
เท่ากับ 1 V ความถี่หลักมูลเท่ากับ 20 kHz..... 62
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยายแรงดัน
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V..... 63
รูปที่ 4.20 การวัดเฟสระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรขยาย..... 64
รูปที่ 4.21 วิธีการวัดมุมต่างเฟสของสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตที่ใช้ในการทดลอง..... 64
รูปที่ 4.22 รูปร่างของการต่างเฟสต่างๆ และวิธีการวัด..... 65
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงมุมต่างเฟสของวงจรขยายกรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 66
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงมุมต่างเฟสของวงจรขยายกรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V..... 67
รูปที่ 4.25 วงจรที่ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของวงจร..... 68
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพ ($\eta$) ของวงจรขยาย
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 70
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพ ($\eta$) ของวงจรขยาย
กรณีแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V..... 71
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพ ($\eta$) ของวงจรขยาย
กรณีความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz..... 72
รูปที่ 4.29 แสดงการวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก..... 73
รูปที่ 4.30 แสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยาย
เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1.2 V..... 75
รูปที่ 4.31 แสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยาย
เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1.9 V..... 76
รูปที่ 4.32 แสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยาย
เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 0.6 V..... 78

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.33 แสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (THD) ของวงจรขยาย
เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 V..... 79
รูปที่ 4.34 แสดงสัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนอินพุตด้วยสัญญาณสามเหลี่ยม
ความถี่ 1 kHz (กรณีกำลังด้านออกเท่ากับ 60 W)..... 80
รูปที่ 4.35 แสดงสัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนอินพุตด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม
ความถี่ 1 kHz (กรณีกำลังด้านออกเท่ากับ 60 W)..... 80
รูปที่ 4.36 แสดงสัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนอินพุตด้วยสัญญาณสามเหลี่ยม
ความถี่ 1 kHz (กรณีกำลังด้านออกเท่ากับ 120 W)..... 81
รูปที่ 4.37 แสดงสัญญาณเอาต์พุต เมื่อป้อนอินพุตด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม
ความถี่ 1 kHz (กรณีกำลังด้านออกเท่ากับ 120 W)..... 81
รูปที่ 4.38 แสดงการทดสอบเสียงพูด..... 82
รูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันด้านออก ณ ความถี่หลักมูลเท่ากับ 1 kHz..... 84
รูปที่ 4.40 แสดงกล่องใส่วงจรขยายเสียงแบบวิธีสวิตซ์..... 85