

เครื่องขยายเสียงที่สามารถปรับแต่งเสียงได้เฉพาะความถี่

EQUALIZER



โดย
นายกฤษณะ ทาวงศ์ยศ รหัส 41013243
นายประภัสชัย อุ่นอกพันธ์ รหัส 41013253

เลขหน้.....
เลขทะเบียน..... 42732
วัน, เดือน, ปี - 7 อ.ย. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องขยายเสียงที่สามารถปรับแต่งเสียงได้เฉพาะความถี่

EQUALIZER

โดย

นายกฤษณะ ทาวงศ์ยศ รหัส 41013243

นายประภัสชัย อุ่nökพันธ์ รหัส 41013253

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อีเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง เครื่องขยายเสียงที่สามารถปรับแต่งเสียงได้เฉพาะความถี่

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษณะ ทาวงศ์ยศ รหัส 41013243
2. นายประภัสชัย อุ่นอกพันธ์ รหัส 41013253



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องขยายเสียงที่สามารถปรับแต่งได้เฉพาะความถี่

กฤษณะ ทาวงศ์ยศ

ประภัสชญ์ อุ่นอกพันธ์

อ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

อีควอไลเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแต่งเสียงในย่านความถี่ต่าง ๆ ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต้องการ เป็นการประยุกต์ใช้งานวงจรฟิลเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งในสมัยก่อนนั้นเรายังไม่มียูนิฟิเคชันที่ง่าย ๆ เราจะใช้ขดลวดตัวนำมาใช้งานในวงจรฟิลเตอร์ ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีการรบกวนจากภายนอกได้ง่าย แต่ปัจจุบันนี้ยูนิฟิเคชันที่ง่าย ๆ มีประโยชน์อย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยขดลวดตัวนำจะถูกแทนที่ด้วยวงจรใจเรเตอร์ ซึ่งในวงจรใจเรเตอร์จะประกอบไปด้วยตัวความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และออปแอมป์ โครงการนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นวงจรกราฟฟิก อีควอไลเซอร์ ส่วนที่สองเป็นวงจรครอสโอเวอร์ อีควอไลเซอร์ โดยวงจรครอสโอเวอร์ อีควอไลเซอร์ จะใช้หลักการเดียวกันกับกราฟฟิกอีควอไลเซอร์ แต่ครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์ จะมีการปรับย่านความถี่ที่กว้างกว่า ประโยชน์ของวงจรทั้งสองชนิดคือสามารถเพิ่มคุณภาพของเสียงให้ดีขึ้นเหมาะแก่ความต้องการฟังของแต่ละบุคคล ปัญหาสำคัญที่พบของทั้งสองวงจร คือ ความเพี้ยนที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ความผิดพลาดของค่าอุปกรณ์และการออกแบบลายวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EQUALIZER

Kritsana Tawongyot

Prapatchai Unokpan

Polsart Lertprasert Adviser

2000

Abstract

Equalizer architecture is a device that used for increase or decrease sound frequency interval. It is applied for filter circuit. In the past we don't have semiconductor device. We use the inductor instead of filter circuit, so it made that the circuit is too large and had a external noise effect .In the present the semiconductor devices is very useful for electronics circuit. Inductor is instead of Gyrator circuit. It is consists of resistor, capacitor and op-amp. This circuit consists of 2 parts, one is a Graphic equalizer and the other is a Crossover equalizer. The operations of Cross over equalizer same as Graphic equalizer but there is a change of frequency is less than Graphic equalizer. Both of Graphic equalizer and Crossover equalizer circuit are very useful to increase the quality of sound to one who need the difference. The main problem of these circuit is the signal error that is effected from noise signal, the error of device and the design of circuit board.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 ชี้ความสามารถของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 เนื้อหาและทฤษฎี	
2.1 ระบบอ็อกวไลเซอร์	3
2.2 ชนิดของอ็อกวไลเซอร์	5
2.2.1 กราฟฟิคอ็อกวไลเซอร์	5
2.2.2 พารามตริกอ็อกวไลเซอร์	10
2.2.3 พารากราฟฟิคอ็อกวไลเซอร์	10
2.2.4 ดิจิตอลอ็อกวไลเซอร์	10
2.3 วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ	10
2.3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำ	10
2.3.2 วงจรกรองความถี่สูง	12
2.3.3 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่	13
2.3.4 วงจรกรองหลักเฉพาะแถบความถี่	15
2.4 วงจรกรองความถี่ที่ใช้ Bridged-T RC	17
2.5 The Three Amplifier Biquad	19
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างอ็อกวไลเซอร์	
3.1 ระบบอ็อกวไลเซอร์	23
3.2 กราฟฟิคอ็อกวไลเซอร์	23
3.2.1 การออกแบบส่วนของกราฟฟิคอ็อกวไลเซอร์	23
3.2.2 การออกแบบในส่วนวงจรไฮพาสฟิลเตอร์	32
3.3 ครอสโอเวอร์อ็อกวไลเซอร์	34
3.3.1 การออกแบบวงจรในส่วน Low Pass	37
3.3.2 การออกแบบวงจรในส่วน High Pass	38
3.3.3 การออกแบบวงจรในส่วน Mid Band	39

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
การทดลองที่ 1 การทดลองโดยใช้การ Simuled จากโปรแกรม PSpice	41
การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพ การทำงานจากการต่อวงจรจริง	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้	
ภาคผนวก ข รายละเอียดของวงจรที่ใช้ในกราฟฟิคอีควอไลเซอร์	
ภาคผนวก ค รายละเอียดของวงจรที่ใช้ในครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 จุดประสงค์ของการใช้ขบวนการอิกวอไลเซอร์ในการบันทึกเสียงลงเทป	3
รูปที่ 2.2 การใช้ขบวนการอิกวอไลเซอร์เพื่อเพิ่มระดับเสียง	4
รูปที่ 2.3 ระบบเพลย์แบคในห้องฟังเพลงที่ใช้ขบวนการอิกวอไลเซอร์	4
รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของวงจรขยายเฉพาะความถี่ที่ใช้ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ	7
รูปที่ 2.5 Requirements for band-pass	7
รูปที่ 2.6 Three amplifier biquad cascade realization of Band Pass filter	8
รูปที่ 2.7 Passive realization for band- pass example	8
รูปที่ 2.8 Gyrator RC – equivalent for passive circuit	9
รูปที่ 2.9 รูปแสดง Pass Band ของวงจรทั้ง 3 แบบ	9
รูปที่ 2.10 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองความถี่ต่ำ	11
รูปที่ 2.11 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสอง	12
รูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองความถี่สูง	12
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรกรองความถี่สูง	13
รูปที่ 2.14 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองเฉพาะแถบความถี่	14
รูปที่ 2.15 แสดงวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่อันดับที่สอง	15
รูปที่ 2.16 แสดงแถบผลตอบสนองของวงจรขจัดเฉพาะแถบความถี่	15
รูปที่ 2.17 แสดงวงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่	16
รูปที่ 2.18 แสดงวงจรกรองความถี่ที่ใช้ Bridged – T RC	17
รูปที่ 2.19 แสดงบล็อกไดอะแกรม ที่ได้จากสมการ Low pass filter	20
รูปที่ 2.20 แสดงวงจร Low pass filter แบบ Three Amplifier Biquad	21
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอิกวอไลเซอร์	23
รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของกราฟฟิคอิกวอไลเซอร์	23
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรกรองความถี่ใช้ Bridged – T RC	24
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรกรองความถี่หลังทำการลดอัตราขยายสัญญาณ	27
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรที่ใช้งานในส่วนของ High Pass Filter	32
รูปที่ 3.6 แสดงวงจร High Pass filter เมื่อทำการเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ลงไปในวงจร	33

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของคลอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์	34
รูปที่ 3.8 แสดงกราฟของจุดตัดขณะยังไม่ได้ทำการปรับค่าความต้านทาน	34
รูปที่ 3.9 แสดงวงจร Three Amplifier Biguad ที่ใช้งานในส่วนของ Low Pass	35
รูปที่ 3.10 แสดงวงจร Three Amplifier Biguad ที่ใช้งานในส่วนของ High Pass	36
รูปที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟฟิคอีควอไลเซอร์เมื่อปรับเพิ่มอัตราขยาย	41
รูปที่ 4.2 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของกราฟฟิคอีควอไลเซอร์เมื่อปรับลดทอนอัตราขยาย	42
รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจร High Pass Filter เพื่อปรับค่าความต้านทานปรับ ค่าให้เป็น 0	43
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจร High Pass Filter เมื่อปรับค่าความต้านทาน ปรับค่าให้เป็น 1	43
รูปที่ 4.5 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์	44

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงช่วงความถี่แบบ 1 ออกเตฟ และ 1/3 ออกเตฟตามมาตรฐาน ISO	5
ตารางที่ 3.1	แสดงความถี่กลาง และช่วงความถี่ที่ใช้ในการออกแบบกราฟฟิคควอไลเซอร์	25
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการออกแบบ	26
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าความต้านทานหลังจากลดอัตราขยายสัญญาณ	28
ตารางที่ 3.4	แสดงค่าอุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบ	29
ตารางที่ 3.5	แสดงค่าอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง	31
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟฟิค EQ ปรับเพิ่มอัตราขยายในบางความถี่	42
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟฟิค EQ เพื่อปรับลดทอนอัตราขยายในบางความถี่	42
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าจริง เมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราขยาย	45
ตารางที่ 4.4	แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าจริงเมื่อทำการปรับลดทอนอัตราขยาย	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

อีควอไลเซอร์ (Equalizer) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านความบันเทิงและในงานอุตสาหกรรมจากคุณสมบัติพิเศษของอีควอไลเซอร์ คือ จะสามารถชดเชยการสูญเสียพลังงานที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ และยังสามารถเพิ่มพลังงานในความถี่ที่เราต้องการได้ คุณสมบัติพิเศษดังที่กล่าวมา ทำให้อีควอไลเซอร์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในโลกของเครื่องเสียง ซึ่งปัจจุบันการผลิตอีควอไลเซอร์ไม่ได้ให้ความสำคัญกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกของตัวอุปกรณ์เอง อีกทั้งช่วงความถี่ที่ใช้งานก็เป็นช่วงความถี่ที่กว้างเกิน ซึ่งอาจไม่เพียงพอกับความต้องของผู้ใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มช่วงความถี่ให้มีความละเอียดมากกว่าเดิม เพื่อให้เพียงพอความต้องการของผู้ใช้งาน

1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

อีควอไลเซอร์ (Equalizer) มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ กราฟฟิอีควอไลเซอร์ (Graphic Equalizer) และครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์ (CrossOver Equalizer)

กราฟฟิอีควอไลเซอร์ จะสามารถเพิ่มหรือลดขนาดของสัญญาณที่ความถี่ใด ๆ ได้ 31 ช่วงความถี่ โดยช่วงความถี่จะเพิ่มขึ้นครั้งละ $1/3$ เท่า ความถี่เริ่มต้นจะอยู่ที่ 20 Hz ความถี่ถัดมาจะเป็น 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800 Hz และ 1.25, 1.6, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20 KHz ตามลำดับ โดยแต่ละช่องความถี่สามารถปรับเพิ่มหรือลดขนาดของสัญญาณได้ ± 7.5 dB หรือ ± 15 dB

ครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์ จะสามารถทำการปรับจุดตัดของผลการตอบสนองความถี่ได้ 2 จุดตัดบนช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 20 KHz โดยที่จุดตัดทั้ง 2 จุดจะเป็นอิสระต่อกัน แต่จะถูกจำกัดไม่ให้เกิดการทับซ้อนของช่วงความถี่ จุดตัดทั้ง 2 ทำให้เกิดช่วงความถี่ขึ้นมา 3 ช่วง คือ ช่วงความถี่ต่ำ ช่วงความถี่กลาง และช่วงความถี่สูง ช่วงความถี่แต่ละช่วงสามารถปรับเพิ่มหรือลดอัตราขยายสัญญาณได้ ± 15 dB

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

บทที่ 2 อีควอไลเซอร์และวงจรกรองความถี่แบบแอ็คทีฟ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงประโยชน์และการใช้งานอีควอไลเซอร์ในระบบเครื่องเสียง ชนิดของอีควอไลเซอร์ ลักษณะพื้นฐานการทำงานของอีควอไลเซอร์ชนิดต่าง ๆ คุณสมบัติจำเพาะของวงจรฟิลเตอร์ หลักการและพื้นฐานการทำงานของวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างอีควอไลเซอร์

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระบบอีควอไลเซอร์ การออกแบบวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ที่ใช้ในกราฟฟิเคอไลเซอร์ การออกแบบอัตราขยายของวงจร รวมไปถึงการออกแบบวงจรบาลานซ์อินพุทและบาลานซ์เอาต์พุท การออกแบบทรีแอมป์ลิไฟ์ไบควอด(Three Amplifier biquad) สำหรับใช้งานในส่วนของครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทดลองสองการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยการทดลองที่ 1 ที่ขมิ้มเลขการทำงานของวงจรกราฟฟิเคอไลเซอร์ และครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์ ส่วนการทดลองที่ 2 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรกราฟฟิเคอไลเซอร์ที่ต่อใช้งานจริง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

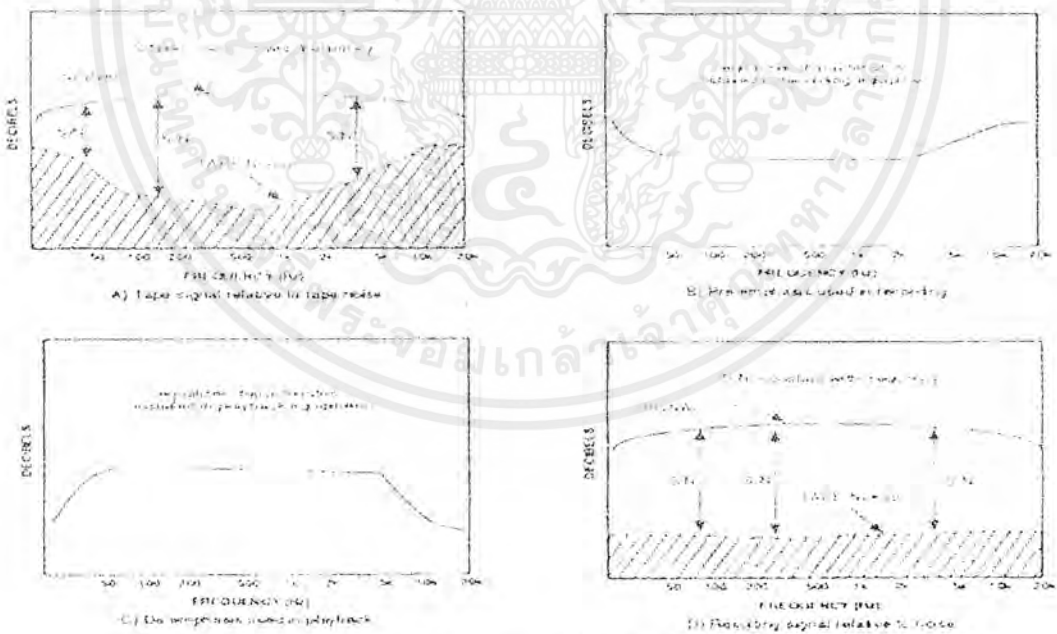
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปของการทดลองที่ได้จากการขมิ้มเลขและการต่ออีควอไลเซอร์ที่ใช้งานจริง ปัญหาที่เกิดจากการใช้งานกราฟฟิเคอไลเซอร์ รวมทั้งกล่าวถึงแนวทางการแก้ไข ปัญหาที่เกิดจากการใช้งานและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ

บทที่ 2 เนื้อหาและทฤษฎี

2.1 ระบบอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดการสัญญาณ เพื่อที่จะเปลี่ยนผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณที่ผ่านเข้ามา เพื่อชดเชยการสูญเสียความถี่บางช่วงในระบบเครื่องเสียง ระบบเสียงเหล่านี้ ได้แก่ ระบบบันทึกและเพลย์แบค ระบบเสียงสาธารณะ หรือกระทั่งระบบเสียงไฮไฟ คำว่า Equalizer มาจากความหมายว่า การต้องการสร้างสัญญาณให้เท่ากับสัญญาณต้นแบบเดิม วัตถุประสงค์ที่เราใช้งานอีควอไลเซอร์แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบแก้ไขสัญญาณให้ถูกต้องกับแบบ เพิ่มคุณภาพการทำงาน

อีควอไลเซอร์แบบแก้ไขสัญญาณ จะใช้ในระบบบันทึกเสียงในอุปกรณ์เสียงระบบดิจิตอล ตัวอย่างของการใช้งาน คือการใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ในเทปคาสเซตทั้งตอนบันทึกและตอนเพลย์แบค ขบวนการนี้ใช้มานานแล้ว ซึ่งจำเป็นต้องมีเพื่อชดเชยความถี่บางช่วงที่สูญเสียในขบวนการบันทึก ดังรูปที่ 2.1

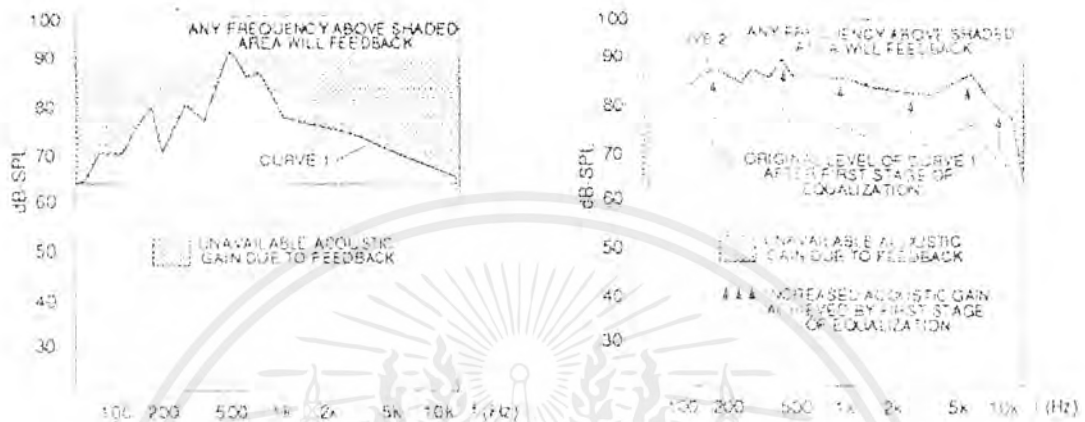


รูปที่ 2.1 จุดประสงค์ของการใช้ขบวนการอีควอไลเซอร์ในการบันทึกเสียงลงเทป

ในการใช้อีควอไลเซอร์ในระบบเสียงภายในห้องฟังเพลงมีหน้าที่แก้ไขผลตอบสนองเชิงความถี่ให้ถูกต้อง ผลตอบสนองเชิงความถี่ในห้องฟังเพลงทั่วไป จะเป็นมาจากปฏิกิริยาต่อกัน

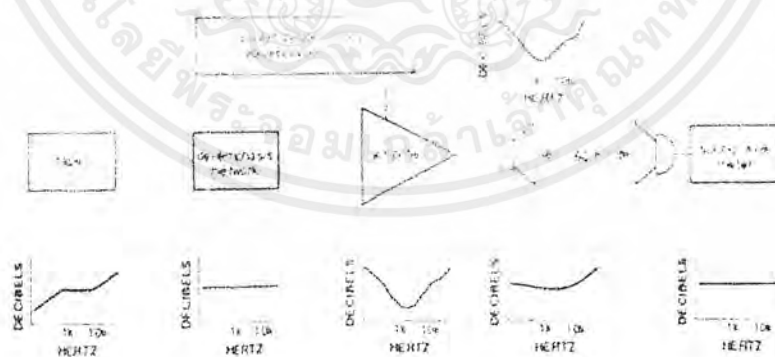
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างตู้ลำโพง ตำแหน่งการวางลำโพง และรูปแบบสภาพทางเสียงภายในห้อง ในการใช้งานแบบนี้วัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นพลังเสียง และคุณภาพเสียงภายในห้อง หรือเพื่อให้ได้ยินชัดเจนในระบบเสียงสาธารณะจากรูปที่ เราจะใช้งานเป็นเพิ่มพลังเสียง



รูปที่ 2.2 การใช้ขบวนการอีควอไลเซอร์เพื่อเพิ่มระดับเสียง

ดังนั้นชุดอีควอไลเซอร์ที่ใช้กับระบบเครื่องเสียงไฮไฟ จึงไม่จำเป็นต้องมีรูปแบบการใช้งานเหมือนเครื่องเสียงสาธารณะ แม้วัตถุประสงค์หลักจะเหมือนกัน วิธีการปรับแต่งจึงเหมือนกัน และคล้ายกับระบบเทปบันทึกเสียงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบเพลย์แบคในห้องฟังเพลงที่ใช้ขบวนการอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์เพื่อเพิ่มคุณภาพสัญญาณ อีควอไลเซอร์แบบนี้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในหมู่นักเสียงในงานบันทึกดนตรีเพื่อใช้ในการเน้นหรือเสริมแต่งดนตรีบางชิ้นเป็นพิเศษ เช่นในกรณีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการบันทึกเสียงดนตรีจากเครื่องดนตรี 2 ชั้น ลงในแทร็คเดียวกันเราอาจใช้อีควอลไลเซอร์ ก่อนการบันทึกเพื่อนำเสียงดนตรีหนึ่งๆ ให้ดูชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น เป็นเสียงกลอง เป็นต้น

2.2 ชนิดของอีควอลไลเซอร์

โดยหลักการแล้วอีควอลไลเซอร์ทุกชนิดล้วนทำงานในแบบเดียวกัน แต่จะประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ต่างๆ จำนวนหนึ่งเพื่อตัดทอนหรือยกระดับสัญญาณช่วงความถี่หนึ่งๆ ในแถบสเปกตรัมเสียง อีควอลไลเซอร์ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปมีหลายแบบ ได้แก่

2.2.1 กราฟฟิเคิลอีควอลไลเซอร์

เป็นอีควอลไลเซอร์แบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดนิยมใช้กันในระบบเครื่องเสียงภายในบ้านทั่วๆ ไป

กราฟฟิเคิลอีควอลไลเซอร์จะประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ชุดหนึ่ง เพื่อทำการลดทอนหรือเพิ่มขนาดสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่กลางปริมาณการตัดหรือเพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปุ่มควบคุม ที่มาในรูปของสไลด์โพเทนชิโอเมเตอร์วางอยู่ด้านหน้า ตำแหน่งการจัดวางพ็อดเหล่านี้จึงปรากฏในรูปของกราฟ แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการ การแบ่งซอยย่อยแถบความถี่การควบคุมแล้วแต่ช่วงเท่าของความถี่กลาง เช่นแบบ 1/3 ออกแคฟ เป็นต้น ช่วงความถี่ต่างๆ ที่เรานิยมใช้จะมีมาตรฐานเป็นตัวกำหนด เราเรียกมาตรฐานนี้ว่า ISO (International Standards Organization) แสดงค่าดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงความถี่แบบ 1 ออกแคฟ และ 1/3 ออกแคฟ ตามมาตรฐานของ ISO

ลำดับที่ตาม ISO	ค่าความถี่กลาง(Hz)	ช่วงความถี่ 1/3 ออกแคฟ (Hz)	ช่วงความถี่ 1 ออกแคฟ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

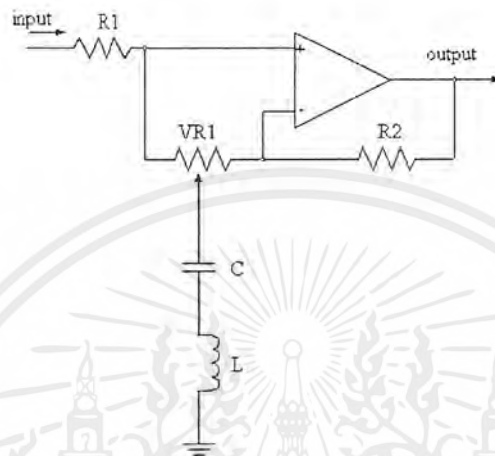
22	160	141-178	
23	200	178-224	
24	250	224-282	178-355
25	315	282-355	
26	400	355-447	
27	500	447-562	355-708
28	630	562-708	
29	800	708-891	
30	1000	891-1120	708-1401
31	1250	1120-1410	
32	1600	1410-1780	
33	2000	1780-2240	1410-2820
34	2500	2240-2820	
35	3150	2820-3550	
36	4000	3550-4470	2820-5620
37	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	

ในสมัยก่อนวงจรรกราฟฟิคอ็ควอไลเซอร์ จะใช้ตัวเหนี่ยวนำจริงๆ ตามรูปที่ 4 แต่เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำมีราคาแพง พันให้ค่าที่ตรงตามที่ต้องการยากและมีโอกาสรับสัญญาณฮัมเข้ามารบกวนได้ง่าย

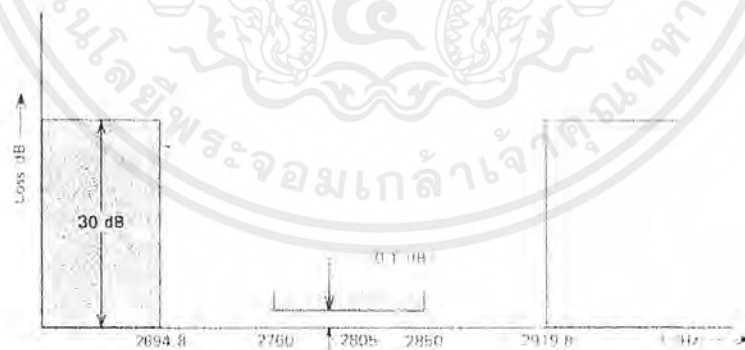
จึงทำให้ภายหลังไม่นิยมใช้กัน เราจึงใช้วงจรรไจเรเตอร์แทนเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติ ของออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุให้กลายเป็นตัวเหนี่ยวนำคือการเปลี่ยนคุณสมบัติของตัวเก็บประจุให้กลายเป็นคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำซึ่งหมายความว่าถ้าใส่วงจรไจเรเตอร์นี้ลงไปเทียบเท่ากับใส่ตัวเหนี่ยวนำลงไปนั่นเอง

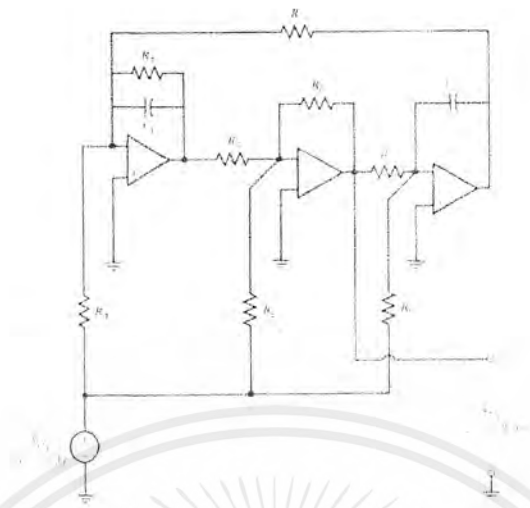


รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของวงจรขยายเฉพาะความถี่ที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงคุณสมบัติของวงจรไจเรเตอร์โดยจะเปรียบเทียบวงจรกรองค่าความถี่แบบ pass band ได้จากการต่อวงจรสามแบบแบบแรกเป็นการต่อแบบ Active cascade แบบที่สองเป็นแบบ Passsive แบบที่สามเป็นการต่อวงจรแบบ Gyrator

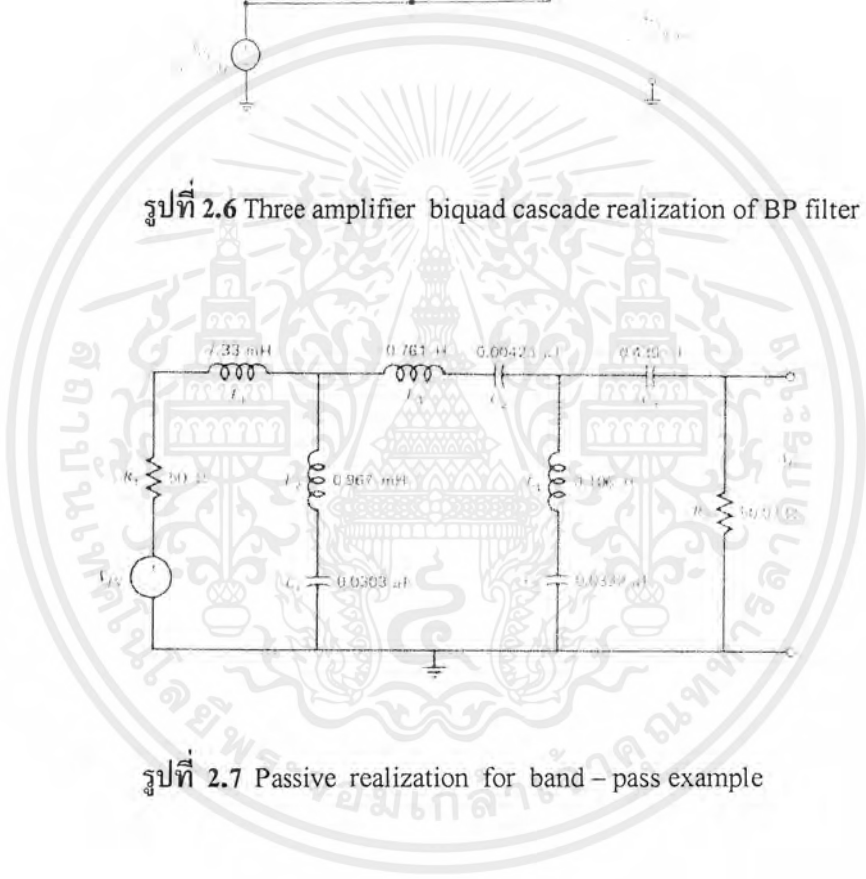


รูปที่ 2.5 Requirements for band-pass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

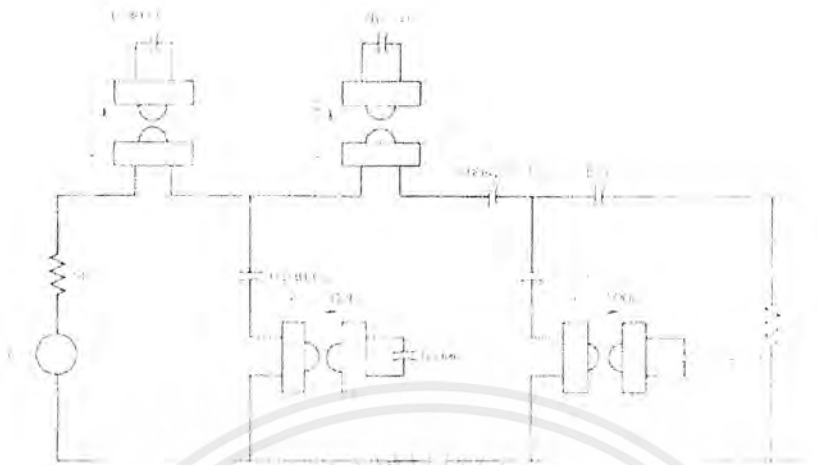


รูปที่ 2.6 Three amplifier biquad cascade realization of BP filter



รูปที่ 2.7 Passive realization for band - pass example

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 Gyrator RC-equivalent for passive circuit



รูปที่ 2.9 รูปแสดง Passband ของวงจรที่ 3 แบบ

จากวงจรทั้ง 3 แบบจะเห็นว่า ช่วง Passband ของวงจร Active cascade จะมี ripple มาก จึงไม่เป็นที่นิยมในการออกแบบ ส่วนวงจรที่ต่อแบบ passive ripple ใน Passband จะน้อย แต่เราไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งเหตุผลได้กล่าวไปแล้ว และในการต่อวงจรแบบ Gyrator ripple ใน passband จะน้อย จึงสามารถนำมาใช้งานได้ ในวงจร filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 พารามตริกอีควอไลเซอร์

ในวงจรอีควอไลเซอร์ชนิดนี้นอกจากมีการควบคุมช่วงตัดหรือเพิ่มระดับสัญญาณในวงจรกรองนิลเตอร์แต่ละชุดแล้ว อีควอไลเซอร์แบบนี้ยังมีปุ่มแยกเพื่อใช้ในการควบคุมสำหรับความถี่กลางของฟิลเตอร์ค่า Q และขนาดของแบนด์วิธ อย่างไรก็ตามปุ่มควบคุมเพิ่มลดของฟิลเตอร์เหล่านี้มักใช้เป็นปุ่มหมุนแทนแบบสไลด์ อีควอไลเซอร์แบบนี้จึงมีการใช้งานที่ยุงยากกว่าแบบกราฟฟิก และยังมีราคาแพงกว่ามาก

2.2.3 พารากราฟิกอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์แบบนี้เป็นลูกผสมระหว่างอีควอไลเซอร์แบบกราฟฟิกและพารามตริก กล่าวคือ ไม่เหมือนกัน พารามตริกอีควอไลเซอร์ตรงที่มีปุ่มควบคุมแยกปรับค่า แบนวิธ ค่า Q และค่าความถี่กลางของฟิลเตอร์แต่ละชุด แทนที่จะใช้เพื่อปรับแบบ โรตารีก็มาใช้เพื่อปรับแบบเลื่อนขึ้นลงในวงจรควบคุม อัตราขยายของวงจรฟิลเตอร์แต่ละตัวแทน ทำให้มีขอบเขตการใช้งานกว้างขวางในขณะเดียวกันจะมองเห็นช่วงการปรับแต่งความถี่ได้ง่ายจากหน้าปัดเครื่อง

2.2.4 ดิจิตอลอีควอไลเซอร์

เป็นการใช้ CPU มาควบคุมปกติจะมีอินพุท และเอาต์พุทให้ทั้งในแบบดิจิตอลและแบบอนาล็อก ข้อดีเด่นของอีควอไลเซอร์แบบนี้คือ ความสามารถในการเปลี่ยน โปรแกรมได้ ความถี่ต่างที่กำหนดสามารถดูได้จากหน่วยความจำ

2.3 วงจรกรองความถี่ แบบแอคทีฟ (Active filters)

วงจรกรองความถี่หรือวงจรฟิลเตอร์ มีหน้าที่สำคัญคือ ยอมให้สัญญาณที่ต้องการผ่านไป ได้ ในขณะเดียวกันก็จะกำจัดหรือลดทอนความถี่อื่นนอกเหนือที่ต้องการสามารถแบ่งชนิดได้ดังนี้

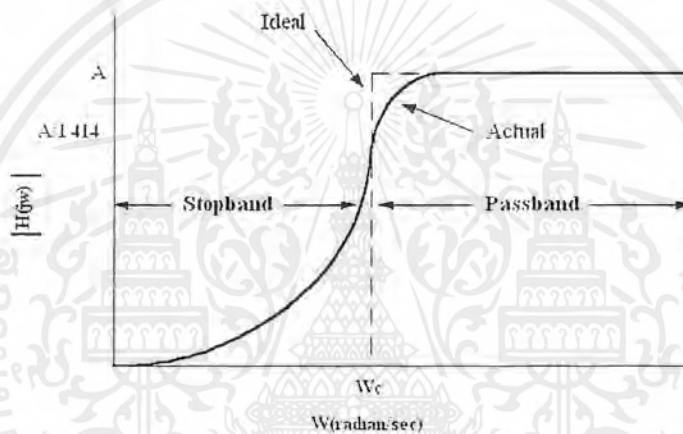
2.3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำ (LOW-PASS FILTER)

เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณความถี่ต่ำกว่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่สูงกว่า ค่าที่เลือกไว้ คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจร LOW-PASS-FILTER แสดงให้เห็นค่ากราฟ การตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ (Amplitude response) ซึ่งเป็นการผลิตระหว่างขนาด เป็นสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน $H(s)$ กับความถี่ ω (rad/Sec) หรือ ความถี่ f (Hz) โดยที่ $\omega = 2\pi f$ และที่ทุกความถี่จะได้ว่า

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)}$$

โดยที่ V_2 เป็นแรงดัน O/P , V_1 เป็นแรงดันอินพุต

สำหรับเส้นกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 นั้น เส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในอุดมคติ ส่วนเส้นทึบที่เหลื่อแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในการใช้งานจริง ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะเฉพาะใกล้เคียงผลตอบสนองทางอุดมคติมากที่สุด ค่า W_c เป็นความถี่คัทออฟ (cut off frequency) กำหนดที่จุด มีค่า 0.707 เท่า หรือ $1/\sqrt{2}$ เท่าของแอมพลิจูดสูงสุดในที่นี้แสดงด้วยค่า A ความถี่ในย่านที่สามารถผ่านไปได้จะอยู่ในช่วง $0 \leq w \leq w_c$ และความถี่ที่เกิดจาก W_c จะไม่สามารถผ่านได้



รูปที่ 2.10 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่ต่ำ

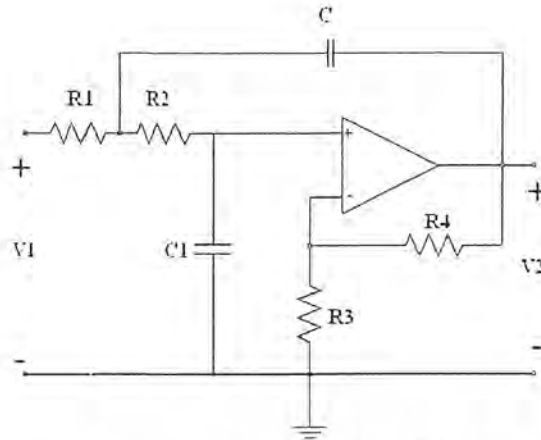
สมการ โพลีโนเมียลอันดับที่สองสามารถเทียบเคียงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรกรองความถี่ต่ำทางอุดมคติ โดยการหาออกมาในรูปของสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ดังนี้

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K}{s^2 + as + b}$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ที่กำหนดขึ้น K เป็นอัตราขยายของระบบ ส่วนอันดับที่สองได้มาจากกำลังสูงสุดของสมการ โพลีโนเมียลของตัวส่วนหรือตัวหารนั่นเอง สามารถหาอัตราขยายของวงจรกรองความถี่ต่ำ โดยกำหนดให้ s ให้สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน เป็น 0 ดังนั้นสมการที่จะได้จะมีอัตราขยายเป็น K/b

การใช้อุปกรณ์แอคทีฟแทนขดลวดที่เหนี่ยวนำในวงจรกรองความถี่ต่ำนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในที่นี้เราจะใช้วิธี Sallen and Key ซึ่งจะใช้อุปกรณ์แอคทีฟประเภทออปแอมป์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ จะเป็นการต่อวงจรความถี่ต่ำแบบ Sallen and Key

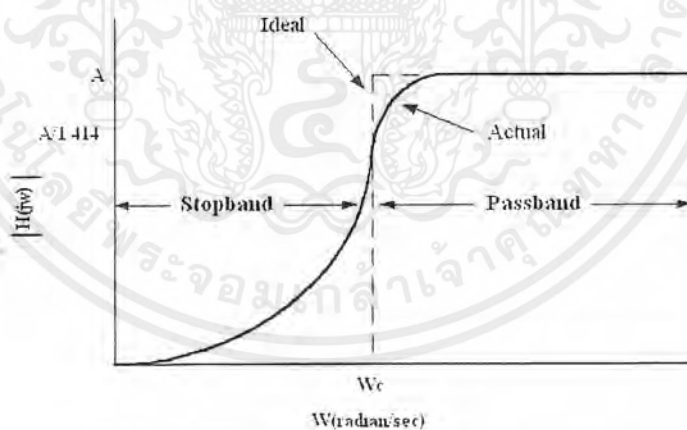
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสอง

2.3.2 วงจรกรองความถี่สูง (High-pass-Filter)

HIGH-PASS-FILTER เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งที่จะส่งผ่านสัญญาณความถี่สูงกว่าค่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอน ความถี่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้ คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจร HIGH-PASS-FILTER แสดงให้เห็นดังรูปกราฟการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ ในรูปที่ 12 โดยเส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางอุดมคติ ส่วนเส้นที่บั้นนั้นแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่สูง

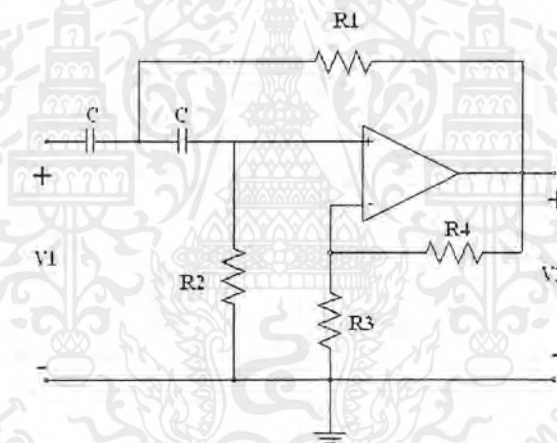
สมการ โพลีโนเมียลอันดับที่สอง สามารถเทียบเคียงกับคุณลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงทางอุดมคติ โดยการหาออกมาในรูปสมการทรานส์ฟอร์มฟังก์ชันฟังก์ชันได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K}{s^2 + as + b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่คัทออฟ คือ ω_c ในหน่วยเรเดียน/วินาที หรือ $f_c = \omega_c / 2\pi$ (Hz) อัตราขยายของวงจรรองความถี่หามาจากสมการที่ 3 คือ $H(s)$ เมื่อ s เข้าสู่อนันต์ ($s \rightarrow \infty$) ในสมการที่ 3 จะเท่ากับ K วงจรรองความถี่สูงแบบบัตเตอร์เวิร์ทมีคุณลักษณะเฉพาะที่เหมือนกันกับกรณียวงจรรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ท คือวงจรรองความถี่สูงแบบบัตเตอร์เวิร์ท จะให้การตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ ณ แถบความถี่ที่ยอมให้ผ่านได้ราบเรียบกว่าแบบ เชบีเชฟ โดยที่ เชบีเชฟจะมีการกระเพื่อมในช่วงความถี่ที่ผ่านได้ทั้งสองกรณีค่าแอมพลิจูดได้จากสมการ 1 ขึ้นเดียวกับกรณียวงจรรองความถี่ต่ำ เพียงแต่ค่า W เป็น $1/W$ เท่านั้น

ในกรณีของวงจรรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทจะใช้ f_c เป็นจุดคัทออฟ แต่ในกรณีของวงจรรองความถี่สูงแบบเชบีเชฟนั้นจะใช้ f_c เป็นจุดเริ่มต้นของระยะการกระเพื่อม (Ripple channel)

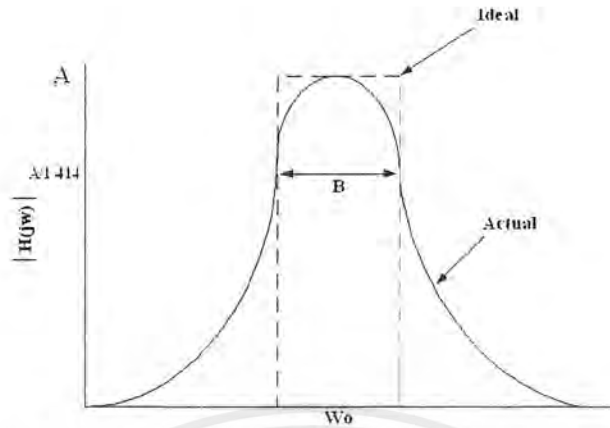


รูปที่ 2.13 แสดงวงจรรองความถี่สูง

2.3.3 วงจรรองเฉพาะแถบความถี่ (BAND - PASS - FILTER)

เป็นวงจรรองความถี่แบบหนึ่งจึงจะยอมให้แถบความถี่ช่วงหนึ่งที่ถูกเลือกไว้ผ่านวงจรชนิดนี้ไปได้เท่านั้น โดยจะลดทอนความถี่อื่นใดนอกเหนือจากช่วงความถี่กว้างของแถบความถี่ที่ได้เลือกไว้ ในที่นี้ตามรูปที่ 14 สมมุติให้มีความถี่กว้างเท่ากับ B และมีค่าความถี่ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่เป็น ω_0 สำหรับค่า B และ ω_0 กำหนดให้อยู่ในหน่วย เรเดียน/วินาที หรือ B อาจกำหนดให้หน่วย Hz และมีความถี่กลางเป็น $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ (Hz) คุณสมบัติที่กล่าวมาของวงจร BAND - PASS FILTER แสดงให้เห็นรูปกราฟแสดงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณตามรูปที่ 14 โดยเส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในทางอุดมคติ ส่วนเส้นที่ไปถึงการตอบสนองเชิงขนาดใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองเฉพาะแถบความถี่

สมการ โพลีโนเมียลอันดับที่สองสามารถเทียบเคียงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ทางอุดมคติ โดยกำหนดค่า B และ ω_0^2 ให้เหมาะสมจึงจะได้อยู่ในรูปของสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ดังนี้

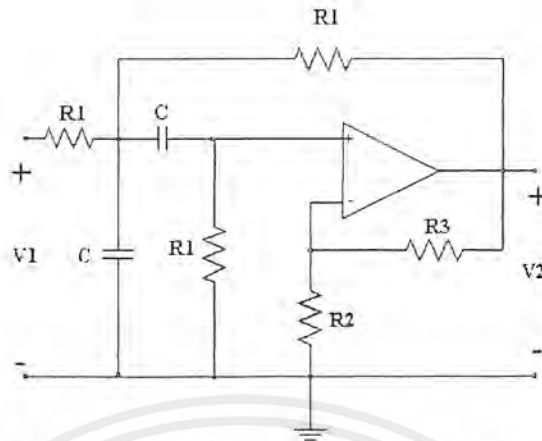
$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{Ks}{s^2 + Bs + \omega_0^2}$$

ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ควรสนใจอยู่ค่าหนึ่งในการออกแบบวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่นี้คือ ค่า Q คือ ควอลิตี้ แฟคเตอร์ ซึ่งหาได้จาก

$$Q = \frac{\omega_0}{B}$$

หรือ $Q = f_0/B$ เมื่อกำหนด B ในหน่วย Hz

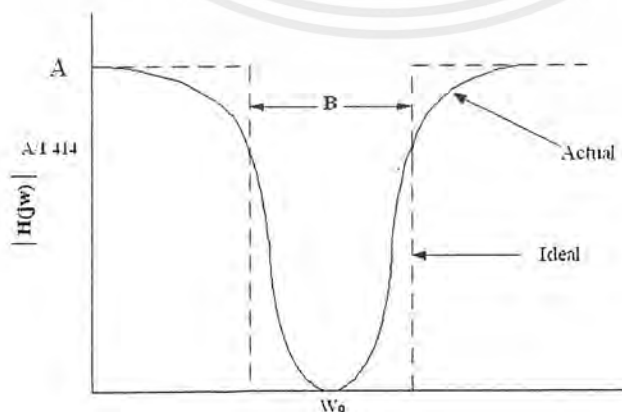
โดย Q จะบ่งบอกให้ทราบถึงความกว้างของช่วงความถี่ ที่จะยอมให้ผ่าน ถ้า Q ยังมีค่ามากวงจรที่ออกแบบนั้น จะทำการกรองแถบความถี่ให้ผ่านไปได้ในช่วงแคบมากขึ้น นั่นคือจะผ่านแถบความถี่ไปได้น้อยลง มีความชันหรือ Sharpness มากขึ้น เมื่อเทียบกับความถี่กึ่งกลาง ω_0 (หรือ f_0) โดยที่ค่า Gain ของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่นี้กำหนด ได้จากค่าแอมพลิจูดของ $H(s)$ ในสมการ ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่ (ω_0 หรือ f_0) ซึ่งจะได้ค่า $\text{Gain} = K/B$ ตัวอย่างวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่อันดับที่สองตามรูปที่ 15 เป็นวงจรที่คิดค้นโดย Kerwin และ Huelsman



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่อันดับที่สอง

2.3.4 วงจรกรองหลักเฉพาะแถบความถี่ (BAND - REJECT FILTER)

เป็นวงจรกรองความถี่อีกแบบหนึ่งซึ่งยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านตลอดไปได้หมด ยกเว้น แถบความถี่ช่วงหนึ่งที่จะไม่ยอมผ่านไปคุณสมบัติของวงจรกรองชนิดเฉพาะของแถบความถี่ แสดงให้เห็นตามรูปกราฟตอบสนองเชิงขนาดตามรูปเส้นแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในทาง อุดมคติ ส่วนเส้นทึบที่เหลื่อแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในการใช้งานจริง แถบความถี่ซึ่งถูกลด ทอนหรือขจัดน้ำนี้มีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ ω_0 โดยประมาณและมีความกว้างของแถบความถี่เป็น B ซึ่ง อยู่ในเทอมหรือหน่วยของ H_2 ความถี่กึ่งกลางนี้มาจาก $f_0 = \omega_0/2\pi$ ในกรณีกรองขจัดเฉพาะแถบ ความถี่นี้ก็เช่นเดียวกันกับกรณีของเฉพาะแถบความถี่ที่จะต้องกำหนดค่า คอวลิตีดี แฟกเตอร์ หรือ ค่า Q ซึ่งเท่ากับ ω_0/B (หรือ f_0/B ที่มีหน่วยเป็น H_2) ค่า Q นี้จะเป็นตัวชี้ความกว้างหรือแถบของ แถบความถี่ที่จะถูกลดทอนหรือขจัดทิ้ง Q มาก ความถี่ก็ยิ่งแคบ Q แถบความถี่ก็ยิ่งมากขึ้น



รูปที่ 2.16 แสดงแถบผลตอบสนองของวงจรขจัดเฉพาะแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ โพลีโนเมียลอันดับสองสามารถเทียบเคียงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรจัดเฉพาะแถบความถี่อยู่ในรูปสมการทรานเฟอร์ ฟังก์ชัน ดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K(s^2 + \omega_0)^2}{s^2 + Bs + \omega_0^2}$$

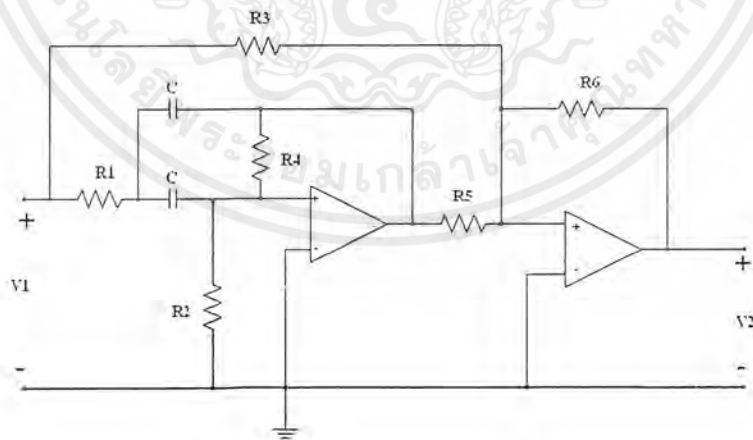
โดยที่ ω_0 เป็นความถี่กึ่งกลางในหน่วยเรเดียน/วินาที และ $B = \omega_0/Q$ จะมีค่าความกว้างของแถบความถี่ที่ถูกขจัดทิ้ง ค่าอัตราขยายของวงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่ได้จาก $H(s)$

ที่ s มีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าอนันต์ ผลที่ได้ออกมามีค่าเท่ากับ K วงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่ แสดงดังรูปที่ 16 และจากการวิเคราะห์ห้วงจรถ้าเรากำหนดคให้ $R_3R_4 = 2R_1R_5$

$$B = \frac{2}{R_4 C}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_4 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

และมีอัตราขยายกลับขั้วเท่ากับ R_6/R_3

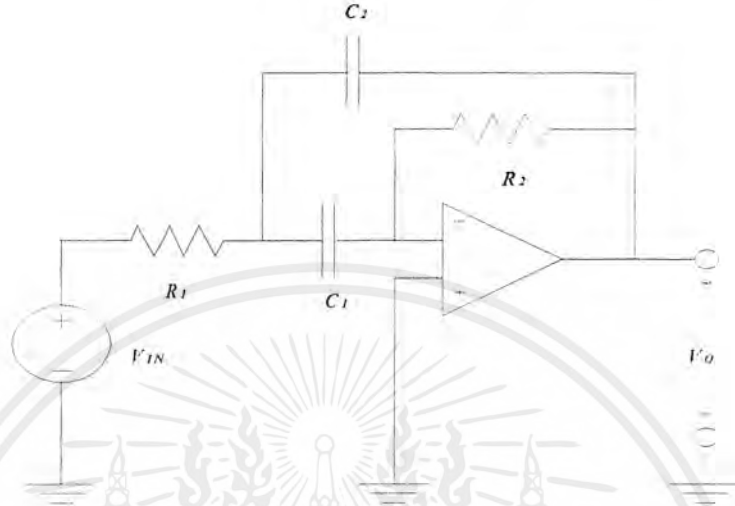


รูปที่ 2.17 แสดงวงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรกรองความถี่ที่ใช้ Bridged-T RC

ในที่นี้จะป็น Band-pass ที่ให้ Negative feedback topology แสดงดังรูป



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรกรองความถี่ที่ใช้ Bridged - T RC

จากวงจรจะแสดง feedback และ feedforward transfer functions ของ RC Network ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} sC_1 + sC_2 + \frac{1}{R_1} & -sC_1 \\ -sC_1 & sC_1 + \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_X \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & sC_2 \\ 0 & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

สามารถแสดงสมการ feedback transfer functions ได้ดังนี้

$$T_{FB} = \frac{V_1}{V_3} \Big|_{V_2=0} = \frac{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

และสมการ feedforward transfer functions ได้ดังนี้

$$T_{FF} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{V_3=0} = \frac{\frac{s}{R_1 C_2}}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหา transfer function ของ Negative feedback ที่ว่า

$$T_V = -\frac{T_{FF}}{T_{FB}}$$

เมื่อ T_{FF} (feedforward transfer function) และ T_{FB} (feedback transfer function) เกิดจาก Pole ของวงจรเดียวกัน จึงทำให้ได้สมการ transfer function คือ

$$T_V = -\frac{N_{FF}}{N_{FB}}$$

ดังนั้น

$$T_{BP} = \frac{-\frac{s}{R_1 C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

ซึ่งจากสมการที่ได้เป็นรูปแบบของ second-order band-pass filter function ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$T_{BP} = K_1 \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_P}{Q_P} s + \omega_P^2}$$

หากเราวิเคราะห์สมการทั้งสองเปรียบเทียบกันจะได้

$$\omega_P = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$Q_P = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}}{\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2}} = \frac{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}{\sqrt{\frac{C_2}{C_1} + \frac{C_1}{C_2}}}$$

ในการสังเคราะห์สมการเพื่อหาค่าอุปกรณ์ เพื่อความง่ายจึงกำหนดให้

$$C_1 = C_2 = 1$$

จากสมการค่าของ ω_P และ Q_P สามารถสังเคราะห์ห่ออกเป็นค่าอุปกรณ์ดังนี้

$$R_2 = 2\frac{Q_P}{\omega_P}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\omega_P Q_P}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า Gain ของวงจรจะเป็นดังนี้

$$K_1 = \frac{-1}{R_1 C_2} = -2\omega_p Q_p$$

จากสมการแสดงค่าของ ω_p และ Q_p ทำให้สามารถหาค่า Sensitivities เป็นดังนี้

$$S_{R_1, R_2, C_1, C_2}^{\omega_p} = -\frac{1}{2}$$

$$S_{R_1}^{Q_p} = -\frac{1}{2}, \quad S_{R_2}^{Q_p} = +\frac{1}{2}$$

$$S_{C_1}^{Q_p} = -\frac{1}{2} + Q_p \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}$$

$$S_{C_2}^{Q_p} = -\frac{1}{2} + Q_p \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}}$$

$$S_{R_1, C_2}^{K_1} = -1$$

ในการออกแบบจะให้ค่า $C_1 = C_2 = 1$ และ

$$\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 2Q_p \quad \text{จะทำให้ได้}$$

$$S_{C_1}^{Q_p} = S_{C_2}^{Q_p} = 0$$

2.5 The Three Amplifier Biquad

วงจรนี้จะเป็นการนำเอา Op Amp 3 ตัวมาสังเคราะห์ทำวงจรที่คุณสมบัติเป็น Low Pass Filter โดยเริ่มจากการสังเคราะห์สมการของ Low Pass function ที่ว่า

$$T_{LP}(s) = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{-d}{s^2 + as + b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$(s^2 + as + b)V_O = -dV_{IN}$$

$$(s + a + \frac{b}{s})V_O = -\frac{dV_{IN}}{s}$$

$$\left(1 + \frac{b}{s(s+a)}\right)V_O = -\frac{d}{s(s+a)}V_{IN}$$

$$V_O = \frac{b}{s(s+a)}V_O - \frac{d}{s(s+a)}V_{IN}$$

แปลงรูปแบบของสมการได้ใหม่ คือ

$$V_O = (-1)\left(\frac{-K_1}{s}\right)\left[\frac{K_2}{s+a}\right]V_O + \left(\frac{d/K_1}{s+a}\right)V_{IN}$$

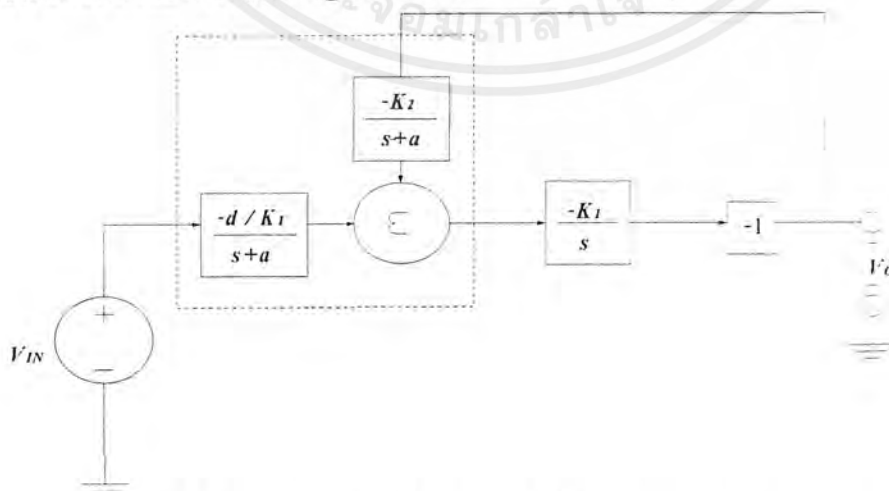
จากสมการสามารถแบ่งออกเป็นส่วนตัวย่อยๆ ได้ 3 ส่วน คือ

(ก) -1

(ข) $\frac{K_1}{s}$

(ค) $\frac{K_2}{s+a}$ และ $\frac{d/K_1}{s+a}$

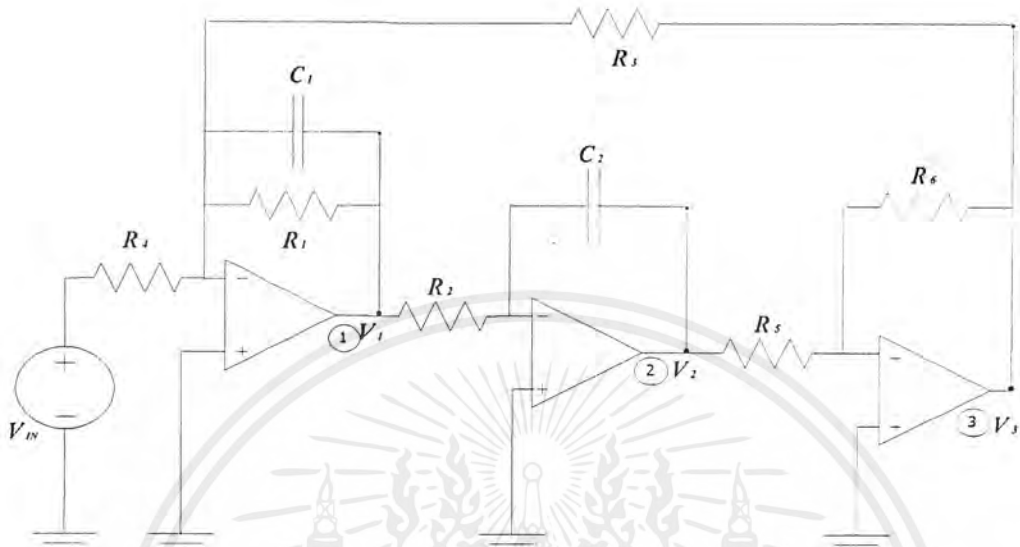
และสามารถวาดเป็น Block Diagram ได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 แสดงบล็อกไดอะแกรม ที่ได้จากสมการ Low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเพื่อนำมาทำเป็นวงจรจะได้ดังนี้



รูปที่ 2.20 แสดงวงจร Low pass filter แบบ Three Amplifier Biquad

เมื่อวิเคราะห์จากวงจรจะได้สมการ ดังนี้

$$V_3 = (-1) \left(\frac{1}{R_2 C_2} \right) \left[\frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} V_3 + \frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} V_{IN} \right]$$

หรือจะได้ว่า

$$\frac{V_3}{V_{IN}} = \frac{-R_2 R_4 C_1 C_2}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ Lowpass function ที่ว่า

$$T_{LP}(s) = \frac{-K_1}{s^2 + \frac{\omega_P}{Q} + \omega_P^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ได้จากวงจร และรูปแบบของสมการ Low Pass filter จะได้ดังนี้

$$\omega_p^2 = \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}$$

$$K = \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_2}$$

$$\frac{\omega_p}{Q} = \frac{1}{R_1 C_1}$$

ในการออกแบบจะเลือกกำหนดค่าของอุปกรณ์ดังนี้

$$C_1 = 1 \quad C_1 = 1 \quad R_2 = R_3 = R_4 = R$$

เมื่อวิเคราะห์จากสมการจะได้ค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_p}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{\omega_p}$$

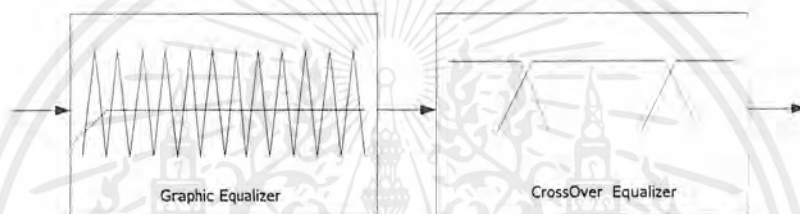
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างอีควอไลเซอร์

3.1 ระบบ อีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์ ที่มีใช้กันอยู่ปัจจุบันจะเป็น กราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ และ Crossover ต่ออยู่ด้วยกันโดยหน้าที่หลักของ กราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ จะทำการปรับแต่งสัญญาณเฉพาะที่ความถี่หนึ่ง ในช่วงแคบ ๆ แต่ Crossover จะทำหน้าที่ในการปรับเพิ่มหรือลดขนาดของสัญญาณในช่วงความถี่กว้าง



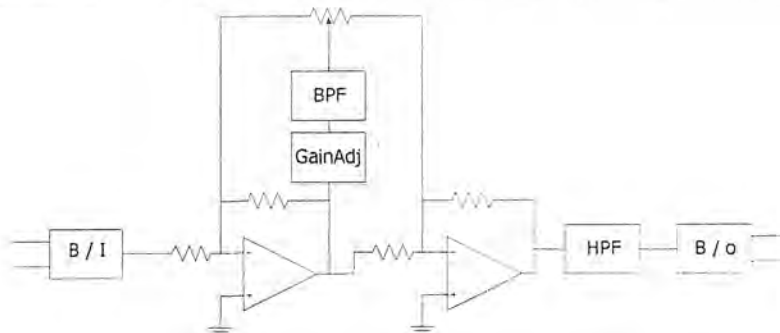
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอีควอไลเซอร์

โดยปกติในการออกแบบเราจะกำหนดค่า Q ของ กราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ ไว้ที่ค่า Q มาก ๆ เนื่องจากมี Band width แคบ ๆ แต่ค่า Q ของ Crossover จะเนื่องจากค่า Band width จะกว้างกว่า ซึ่งก็เป็นไปตามสมการที่ว่า

$$Q = \frac{\omega_p}{bw}$$

3.2 กราฟฟิเคออีควอไลเซอร์

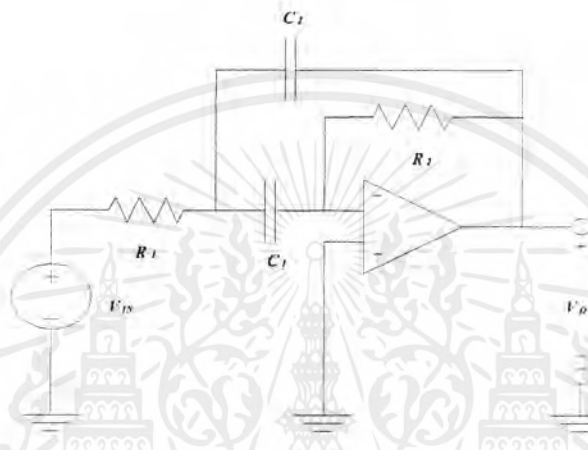
3.2.1 การออกแบบส่วนของกราฟฟิเคออีควอไลเซอร์ จะใช้หลักในการต่อวงจร ดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของกราฟฟิเคออีควอไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรจะมีอยู่ว่าหากไม่ใช่ความถี่ที่ถูกออกแบบมา หรือความถี่ที่ต้องการก็จะไม่ถูกขยายสัญญาณหรือจะไม่ถูกลดทอนสัญญาณ เมื่อทำการปรับ วีอาร์ (VR-Gain) แต่หากเป็นความถี่ที่ตรงกับการกำหนดไว้ในวงจรแบนด์พาสฟิวเตอร์ (Band Pass Filter) ก็จะถูกเพิ่มหรือลดสัญญาณตามการปรับ วงจรแบนด์พาส จะใช้วงจรแบบเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) ต่อ Bridged-T RC เพื่อใช้ได้คุณสมบัติเป็นแบนพาส (Band Pass) ดังรูป



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรกรองความถี่ใช้ Bridged - T RC

โดยที่ Tranfer function ของวงจรเป็นดังนี้

$$T_{BP} = \frac{-s}{R_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

โดยที่ในการออกแบบจะอาศัยสมการที่กำหนดให้ $C_1 = C_2 = 1$

และ $R_2 = \frac{2Q_p}{\omega_p}$

$$R_1 = \frac{1}{2\omega_p Q_p}$$

ถ้าหากในการสร้าง กราฟฟิคอีควไลเซอร์ (Graphic Equalizer) จะใช้การกำหนดช่วงความถี่กลาง และช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ ไว้ดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงความถี่กลาง และช่วงความถี่ที่ใช้ในการออกแบบกราฟฟิคควอไลเซอร์

ค่าความถี่กลาง (Hz)	ช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ (Hz)	ค่าความถี่กลาง (Hz)	ช่วงความถี่ 1/3 ออกเตฟ (Hz)
20	17.8-22.4	800	708-891
25	22.4-28.2	1,000	891-1,120
31.5	28.2-35.5	1,250	1,120-1,410
40	35.5-44.7	1,600	1,410-1,780
50	44.7-56.2	2,000	1,780-2,240
63	56.2-70.8	2,500	2,240-2,820
80	70.8-89.1	3,150	2,820-3,550
100	89.1-112	4,000	3,550-4,470
125	112-141	5,000	4,470-5,620
160	141-178	6,300	5,620-7,080
200	178-224	8,000	7,080-8,910
250	224-282	10,000	8,910-11,200
315	282-355	12,500	11,200-14,100
400	355-447	16,000	14,100-17,800
500	447-562	20,000	17,800-22,400
630	562-708		

ค่า Q ถูกกำหนดโดยช่วงความถี่ หรือ Band Width เช่นที่ความถี่กลาง คือ 20 Hz จะมี Band Width เท่ากับ $22.4 - 17.8 = 4.6$ Hz

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } Q &= \frac{\omega_p}{bw} \\ &= \frac{20 \text{ (Hz)}}{4.6 \text{ (Hz)}} \end{aligned}$$

$$Q = 4.349$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า Q จะเท่ากันที่ทุก ๆ ความถี่กลาง ดังนั้นจะยึดเอาค่า Q นี้ ในการออกแบบ เพราะฉะนั้นจะได้ค่า C_1, C_2, R_1 และ R_2 ดังนี้

$$C_1 = C_2 = 1$$

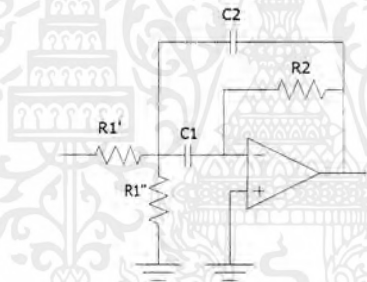
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการออกแบบ

f (๐)	ω (๐)	R_1	R_2
20	125.714	9.15×10^{-4}	0.06917
25	157.143	7.32×10^{-4}	55.340×10^{-3}
31.5	198.000	5.80×10^{-4}	43.920×10^{-3}
40	251.429	4.57×10^{-4}	34.585×10^{-3}
50	314.286	3.66×10^{-4}	27.670×10^{-3}
63	396.000	2.90×10^{-4}	21.960×10^{-3}
80	502.857	2.29×10^{-4}	17.293×10^{-3}
100	628.571	1.83×10^{-4}	13.830×10^{-3}
125	785.714	1.46×10^{-4}	11.067×10^{-3}
160	1,005.714	1.14×10^{-4}	8.646×10^{-3}
200	1,257.114	9.15×10^{-5}	6.914×10^{-3}
250	1,571.429	7.32×10^{-5}	55.340×10^{-4}
315	1,980.000	5.80×10^{-5}	43.920×10^{-4}
400	2,514.286	4.57×10^{-5}	34.585×10^{-4}
500	3,142.857	3.66×10^{-5}	27.670×10^{-4}
630	3,960.000	2.90×10^{-5}	21.960×10^{-4}
800	5,028.571	2.29×10^{-5}	17.293×10^{-4}
1,000	6,285.710	1.83×10^{-5}	13.830×10^{-4}
1,250	7,857.140	1.46×10^{-5}	11.067×10^{-4}
1,600	10,057.140	1.14×10^{-5}	8.646×10^{-4}
2,000	12,571.430	9.15×10^{-6}	6.914×10^{-4}
2,500	15,714.290	7.32×10^{-6}	55.340×10^{-5}
3,150	19,800.000	5.80×10^{-6}	43.920×10^{-5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4,000	25,142.860	4.57×10^{-6}	34.585×10^{-5}
5,000	31,428.570	3.66×10^{-6}	27.670×10^{-5}
6,300	39,600.000	2.90×10^{-6}	21.960×10^{-5}
8,000	50,285.700	2.29×10^{-6}	17.293×10^{-5}
10,000	62,857.140	1.83×10^{-6}	13.830×10^{-5}
12,000	75,428.570	1.46×10^{-6}	11.067×10^{-5}
16,000	100,571.430	1.14×10^{-6}	8.646×10^{-5}
20,000	125,714.290	9.15×10^{-7}	6.914×10^{-5}

แต่เนื่องจากค่าเกน (Gain) รวมของวงจรจะต้องถูกลดลงมา 20 เท่า (เหตุผลการลดจะอธิบายใช้ในการออกแบบอัตรายาย/ลดทอน) ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนวงจรจากวงจรเดิมเป็นวงจรใหม่ ดังรูป



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรรองความถี่หลังทำการลดอัตรายายสัญญาณ

จากการลดอัตรายายลง 20 เท่า จะทำให้

$$\frac{R_1''}{R_1' + R_1''} = \frac{1}{20}$$

และข้อจำกัดที่ว่า

$$\frac{R_1' \cdot R_1''}{R_1' + R_1''} = R_1$$

$$\text{จะได้ค่า } R_1' = \frac{20}{19} R_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $R_1'' = 19R_1'$ จะได้ค่าออกมาดังตาราง

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความต้านทานหลังจากลดอัตราขยายสัญญาณ

f (0)	ω (0)	R_1	R_1'	R_1''
20	125.714	9.15×10^{-4}	183×10^{-4}	9.63×10^{-4}
25	157.143	7.32×10^{-4}	146.36×10^{-4}	7.703×10^{-4}
31.5	198.000	5.80×10^{-4}	116×10^{-4}	6.11×10^{-4}
40	251.429	4.57×10^{-4}	91.48×10^{-4}	4.815×10^{-4}
50	314.286	3.66×10^{-4}	73.18×10^{-4}	3.85×10^{-4}
63	396.000	2.90×10^{-4}	58×10^{-4}	3.053×10^{-4}
80	502.857	2.29×10^{-4}	45.24×10^{-4}	2.41×10^{-4}
100	628.571	1.83×10^{-4}	36.59×10^{-4}	1.92×10^{-4}
125	785.714	1.46×10^{-4}	29.27×10^{-4}	1.54×10^{-4}
160	1,005.714	1.14×10^{-4}	22.871×10^{-4}	1.201×10^{-4}
200	1,257.114	9.15×10^{-5}	183×10^{-5}	9.63×10^{-5}
250	1,571.429	7.32×10^{-5}	146.36×10^{-5}	7.703×10^{-5}
315	1,980.000	5.80×10^{-5}	116×10^{-5}	6.11×10^{-5}
400	2,514.286	4.57×10^{-5}	91.48×10^{-5}	4.815×10^{-5}
500	3,142.857	3.66×10^{-5}	73.18×10^{-5}	3.85×10^{-5}
630	3,960.000	2.90×10^{-5}	58×10^{-5}	3.053×10^{-5}
800	5,028.571	2.29×10^{-5}	45.24×10^{-5}	2.41×10^{-5}
1,000	6,285.710	1.83×10^{-5}	36.59×10^{-5}	1.92×10^{-5}
1,250	7,857.140	1.46×10^{-5}	29.27×10^{-5}	1.54×10^{-5}
1,600	10,057.140	1.14×10^{-5}	22.871×10^{-5}	1.201×10^{-5}
2,000	12,571.430	9.15×10^{-6}	183×10^{-6}	9.63×10^{-6}
2,500	15,714.290	7.32×10^{-6}	146.36×10^{-6}	7.703×10^{-6}
3,150	19,800.000	5.80×10^{-6}	116×10^{-6}	6.11×10^{-6}
4,000	25,142.860	4.57×10^{-6}	91.48×10^{-6}	4.815×10^{-6}
5,000	31,428.570	3.66×10^{-6}	73.18×10^{-6}	3.85×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6,300	39,600.000	2.90×10^{-6}	58×10^{-6}	3.053×10^{-6}
8,000	50,285.700	2.29×10^{-6}	45.24×10^{-6}	2.41×10^{-6}
10,000	62,857.140	1.83×10^{-6}	36.59×10^{-6}	1.92×10^{-6}
12,000	75,428.57	1.46×10^{-6}	29.27×10^{-6}	1.54×10^{-6}
16,000	100,571.43	1.14×10^{-6}	22.871×10^{-6}	1.201×10^{-6}
20,000	125,714.29	9.15×10^{-7}	183×10^{-7}	9.63×10^{-7}

และทำการ Scaling Impaadece โดยเพื่อใช้ง่ายต่อการออกแบบ จะใช้ $C_1 = C_2 = 1$
 เมื่อ $C = 100 \text{ nF}$ ที่ความถี่ 20 Hz - 200 Hz
 $C = 10 \text{ nF}$ ที่ความถี่ 250 Hz - 2000 Hz
 $C = 1 \text{ nF}$ ที่ความถี่ 2.5 KHz - 20 KHz
 จากหลักการสเกล Impedance ที่ว่า

$$C_{\text{new}} = \frac{1}{K_m} C_{\text{old}}$$

$$R_{\text{new}} = K_m R_{\text{old}}$$

ที่ความถี่ 20 Hz - 200 Hz จะให้ $K_m = 1 \times 10^7$

ที่ความถี่ 250 Hz - 2 Hz จะให้ $K_m = 1 \times 10^8$

ที่ความถี่ 2.50 KHz - 20 KHz จะให้ $K_m = 1 \times 10^9$

เมื่อทำการสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance) ทั้งหมดจะได้ค่าอุปกรณ์ในวงจรแบนพาสฟิวเตอร์ (Band Pass Filter) ดังนี้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าอุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบ

f (0)	R_1'	R_1''	R_2	$C_1 = C_2$
20	183 K	9.63 K	691 K	100 nF
25	146.36 K	7.703 K	553 K	100 nF
31.5	116 K	6.11 K	439 K	100 nF
40	91.48 K	4.815 K	345.8 K	100 nF
50	73.18 K	3.85 K	276.7 K	100 nF
63	58 K	3.053 K	219.6 K	100 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80	45.24 K	2.41 K	172.9 K	100 nF
100	36.59 K	1.92 K	138.3 K	100 nF
125	29.27 K	1.54 K	110.6 K	100 nF
160	22.871 K	1.201 K	84.6 K	100 nF
200	183 K	9.63 K	69.1 K	100 nF
250	146.36 K	7.703 K	553 K	10 nF
315	116 K	6.11 K	439 K	10 nF
400	91.48 K	4.815 K	345.8 K	10 nF
500	73.18 K	3.85 K	276.7 K	10 nF
630	58 K	3.053 K	219.6 K	10 nF
800	45.24 K	2.41 K	172.9 K	10 nF
1,000	36.59 K	1.92 K	138.3 K	10 nF
1,250	29.27 K	1.54 K	110.6 K	10 nF
1,600	22.871 K	1.201 K	84.6 K	10 nF
2,000	183 K	9.63 K	69.1K	10 nF
2,500	146.36 K	7.703 K	553 K	1 nF
3,150	116 K	6.11 K	439 K	1 nF
4,000	91.48 K	4.815 K	345.8 K	1 nF
5,000	73.18 K	3.85 K	276.7 K	1 nF
6,300	58 K	3.053 K	219.6 K	1 nF
8,000	45.24 K	2.41 K	172.9 K	1 nF
10,000	36.59 K	1.92 K	138.3 K	1 nF
12,000	29.27 K	1.54 K	110.6 K	1 nF
16,000	22.871 K	1.201 K	84.6 K	1 nF
20,000	183 K	9.63 K	69.1 K	1 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าอุปกรณ์ที่ต้องการถูกจำกัดด้วยค่าที่มีในตลาด จึงได้อุปกรณ์ดังนี้
 ตารางที่ 3.5 แสดงค่าอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง

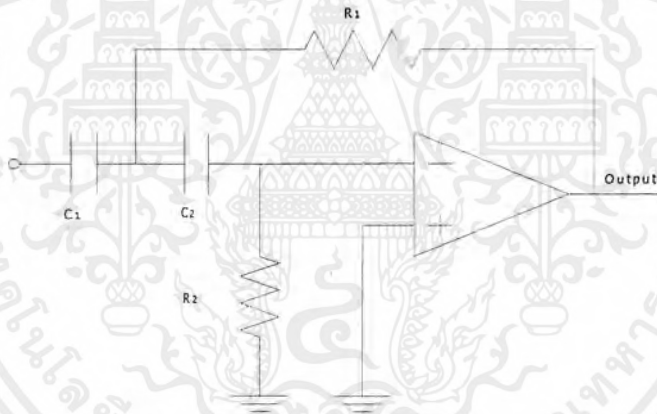
F (0)	R_1'	R_1''	R_2	$C_1 = C_2$
20	182 K	9.3 K	681 K	100 nF
25	147 K	7.5 K	560 K	100 nF
31.5	115 K	6.19 K	432 K	100 nF
40	91.3 K	4.99 K	348 K	100 nF
50	75 K	3.9 K	274 K	100 nF
63	57.6 K	3 K	220 K	100 nF
80	45.3 K	2.43 K	174 K	100 nF
100	36 K	1.91 K	138 K	100 nF
125	30 K	1.0 K	110 K	100 nF
160	22.4 K	1.2 K	86.6 K	100 nF
200	19 K	930 -	69.1 K	100 nF
250	147 K	7.5 K	560 K	10 nF
315	115 K	6.19 K	432 K	10 nF
400	91.3 K	4.99 K	348 K	10 nF
500	75 K	3.9 K	274 K	10 nF
630	57.6 K	3 K	220 K	10 nF
800	45.3 K	2.43 K	174 K	10 nF
1,000	36 K	1.91 K	138 K	10 nF
1,250	30 K	1.0 K	110 K	10 nF
1,600	22.4 K	1.2 K	86.6 K	10 nF
2,000	19 K	930 Ω	69.1 K	10 nF
2,500	147 K	7.5 K	560 K	1 nF
3,150	115 K	6.19 K	432 K	1 nF
4,000	91.3 K	4.99 K	348 K	1 nF
5,000	75 K	3.9 K	274 K	1 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6,300	57.6 K	3 K	220 K	1 nF
8,000	45.3 K	2.43 K	174 K	1 nF
10,000	36 K	1.91 K	138 K	1 nF
12,000	30 K	1.0 K	110 K	1 nF
16,000	22.4 K	1.2 K	86.6 K	1 nF
20,000	19 K	930 Ω	69.1 K	1 nF

3.2.2 การออกแบบวงจรในส่วนวงจรไฮพาสฟิวเตอร์ (High Pass Filter)

สำหรับวงจร High Pass Filter จะใช้วงจร Positive feedback ดังรูป



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรที่ใช้ในงานในส่วนของ High Pass Filter

$$T_{HP} = \frac{s^2}{s^2 + s \left[\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right] + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

ในการออกแบบใช้ $R_1 = R_2$ และ $C_1 = C_2$

เมื่อกำหนดให้ความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 10 Hz

$$\text{จาก } \omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 10 \text{ Hz}$$

$$= 62.857 \text{ rad/sec}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } \omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\text{ให้ } C_1 = C_2 = 1 \text{ F}$$

$$\therefore \omega_0 = \frac{1}{R}$$

$$\text{ได้ } R = \frac{1}{62.857} = 0.016$$

$$\text{จะได้ค่า } C_1 = C_2 = 1 \text{ F}$$

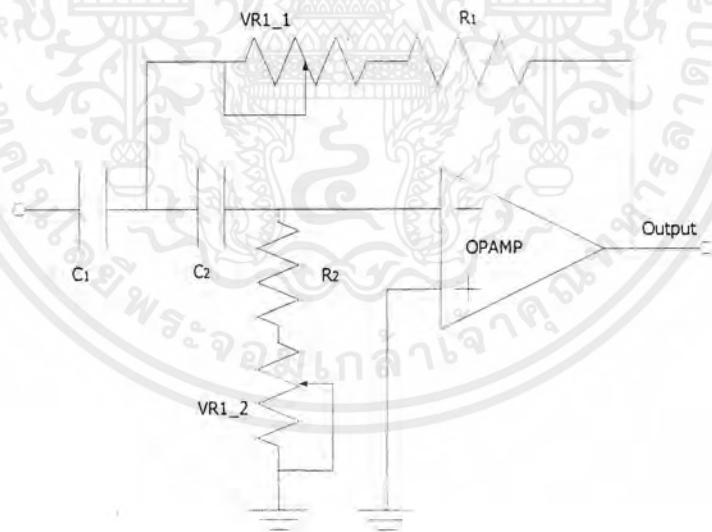
$$R_1 = R_2 = 0.016 \text{ Ohm}$$

$$\text{ทำการสเกลด้วย } Km = 6666666.667$$

$$\text{จะได้ค่า } R_1 = R_2 = 106 \text{ KOhm}$$

$$C_1 = C_2 = 150 \text{ nF}$$

ต้องการที่จะเปลี่ยนความถี่ของ High Pass filter จึงทำการใส่ตัวต้านทานปรับค่าได้ลงไปแทน R_1 และ R_2 เดิม ดังรูป

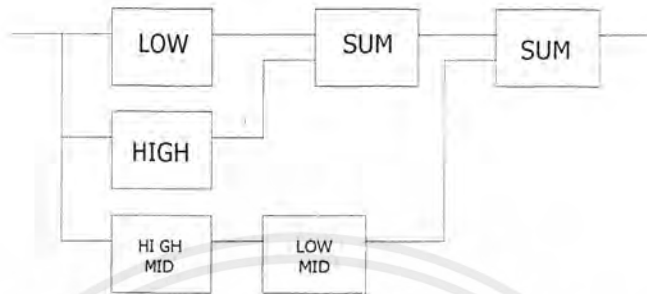


รูปที่ 3.6 แสดงวงจร High Pass filter เมื่อทำการเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ลงไปวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

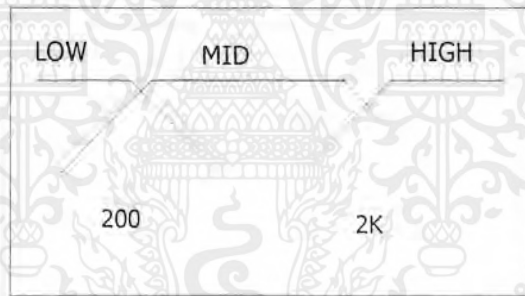
3.3 ครอสโอเวอร์ อีควอไลเซอร์

การออกแบบในส่วนของครอสโอเวอร์ อีควอไลเซอร์ จะใช้ลักษณะการต่อวงจรตามรูป



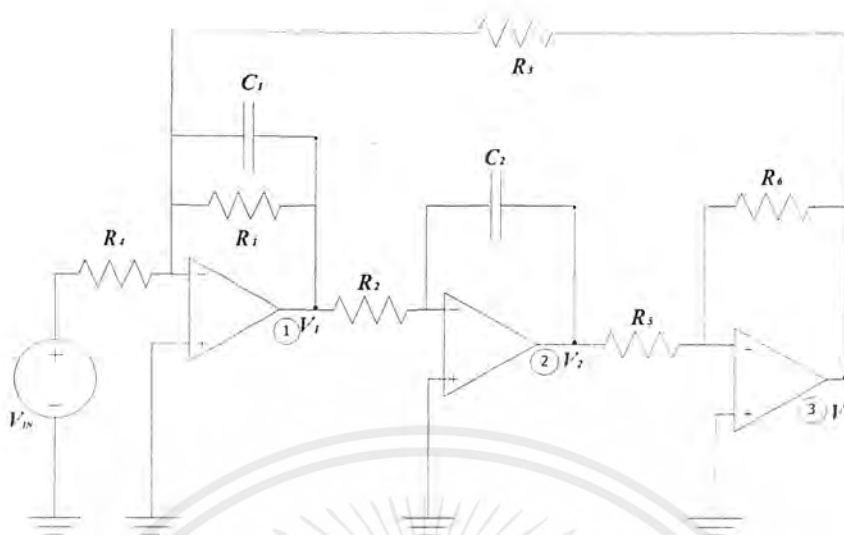
รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์

โดยที่เมื่อยังไม่มีการปรับแต่งใด ๆ จุดตัดของกราฟต้องอยู่ตามรูป



รูปที่ 3.8 แสดงกราฟของจุดตัดขณะยังไม่ได้ทำการปรับค่าความต้านทาน

จุดประสงค์หลักในการออกแบบคือ จะต้องปรับเลื่อนจุดตัดทั้ง 2 จุดได้อย่างอิสระ และสามารถปรับ Gain ในแต่ละช่วงได้อิสระเช่นกัน ในส่วนของค่า Q ที่ใช้จะเลือกใช้ค่า $Q = 0.707$ สาเหตุที่ใช้ ค่า Q เป็น 0.707 เนื่องจากว่าจะเป็นค่า Q ที่ให้โอกาสการเกิดโอเวอร์ชูทน้อยที่สุดขณะที่ยังคงให้ค่าสโลปอัตราการลดทอนที่ยังคงถือว่ามากอยู่ในการออกแบบจะใช้วงจร Three Amplifier biguad ซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูป



รูปที่ 3.9 แสดงวงจร Three Amplifier Biguad ที่ใช้งานในส่วนของ Low Pass

สำหรับการต่อวงจรแบบนี้จะใช้ Transfer function ดังนี้

$$\frac{V_3}{V_{in}} = \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2}}$$

ซึ่งเป็นลักษณะของ Low Pass filter สำหรับการออกแบบจะใช้

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_p}$$

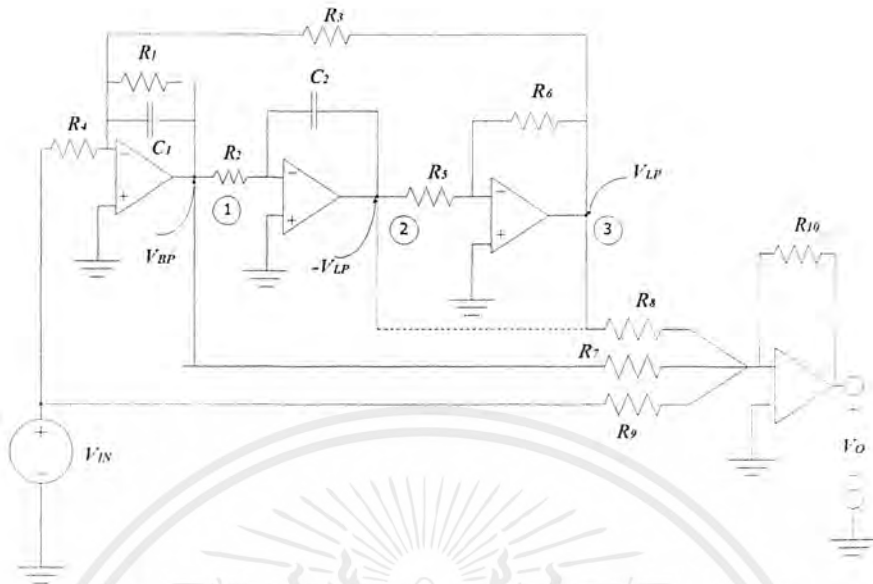
$$R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{\omega_p}$$

$$C_1 = C_2 = 1$$

$$R_5 = R_6$$

และมีการต่อวงจรอีกลักษณะหนึ่ง เพื่อใช้ทำในส่วนของ High Pass Filter ซึ่งจะมีการต่อลักษณะวงจรดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงวงจร Three Amplifier Biguad ที่ใช้งานในส่วนของ High Pass

จะได้ Transfer function ดังนี้

$$T_{HP} = \frac{-\frac{R_{10}}{R_9} s^2}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

จาก Transfer function จะใช้ค่าในการออกแบบดังนี้

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_0}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{Q\omega_P}$$

$$C_1 = C_2 = 1$$

$$R_6 = R_5 ; R_7 = R_8 = R_9 = R_{10}$$

ในการออกแบบจะกำหนดการออกแบบใช้ 3 ครั้ง คือ

1. ส่วน Low Pass
2. ส่วน Mid bond
3. ส่วน High Pass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่จุดตัดระหว่าง Low Pass กับ Mid bond จะปรับได้ในช่วงนี้ตั้งแต่ 80 Hz ถึง 300 Hz และมีจุดตัดระหว่าง Mid bond กับ High Pass จะปรับได้ตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3 KHz

3.3.1 การออกแบบวงจรในส่ว Low Pass

จะกำหนดให้ความถี่ต่ำสุดที่จะสามารถยอมให้ผ่านได้อยู่ที่ 500 Hz

จาก

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi f \\ &= 2\pi \cdot 500 \\ &= 3142.857 \text{ rad/sec}\end{aligned}$$

จากวงจรในส่ว Low Pass ที่กำหนดการหาค่าอุปกรณ์อยู่ว่า

$$\begin{aligned}C_1 = C_2 &= 1 \\ R_1 &= \frac{Q}{\omega_p} \\ &= \frac{0.707}{3142.857} = 2.250 \times 10^{-4} \\ R_2 = R_3 = R_4 &= \frac{1}{\omega_p} \\ &= \frac{1}{3142.857} \\ &= 3.182 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

ต้องการกำหนดค่า R_2 ให้ที่ 10 K Ω เนื่องจากถูกจำกัดที่ ค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่มีขายในท้องตลาด จึงต้องหาค่า Km ใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}K_m &= \frac{R_{\text{new}}}{R_{\text{old}}} \\ &= \frac{10 \text{ K}\Omega}{3.182 \times 10^{-4}} \\ K_m &= 31428751.02\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \text{จะได้ว่า } C_1 = C_2 &= \frac{1}{31428751.02} \\ &= 31.818 \text{ nF}\end{aligned}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ K}$$

$$\begin{aligned}R_1 &= 31428751.020 \times 2.250 \times 10^{-4} \\ &= 7.069 \text{ K}\Omega\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การออกแบบวงจรในส่วน High Pass

กำหนดให้ความถี่ต่ำสุดที่จะเป็นค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 1600 Hz
จะได้

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi \cdot 1600 \text{ Hz} \\ &= 10057.140\end{aligned}$$

จากการเลือกค่าในวงจร High Pass จะใช้ค่า

$$\begin{aligned}C_1 = C_2 &= 1 \\ R_1 &= \frac{Q}{\omega_0} = \frac{0.707}{10057.140} \\ &= 7.0298 \times 10^{-5} \\ R_2 = R_3 = R_4 &= \frac{1}{0.707 \times 10057.140} \\ &= 1.406 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

การสเกลค่าอุปกรณ์จะถูกกำหนดใช้ในค่าของ R_2 ที่ $R_2 = 5 \text{ K}$ ดังนั้นจึงต้องใช้ Km ที่มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}Km &= \frac{R_{\text{new}}}{R_{\text{old}}} \\ &= \frac{5000}{1.406 \times 10^{-4}} \\ &= 35551989.9\end{aligned}$$

∴ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}C_1 = C_2 &= \frac{1}{35551989.900} \\ &= 7.0298 \times 10^{-5} \\ R_2 = R_3 = R_4 &= 5 \text{ K} \\ R_1 &= 7.030 \times 10^{-5} \times 35551989.900 = 2.5 \text{ K}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การออกแบบวงจรในส่วน Mid Bond

สำหรับวงจรในส่วนของ Mid Bond จะประกอบด้วยวงจร High Pass ต่อ Cascade กับ วงจร Low Pass เพื่อให้ได้ส่วน Mid Bond Pass ที่สามารถปรับจุดตัดได้อย่างอิสระ โดยที่ ส่วน Low Cut จะปรับให้อยู่ต่ำสุดที่ 160 Hz และส่วน High Cut จะตัดสูงสุดที่ 5 KHz จาก Low Cut ที่ 160 Hz จะได้

$$\omega_0 = 1005.714 \text{ rad/sec}$$

และวงจรในส่วน High Pass Filter จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ F}$$

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_0} = \frac{0.707}{1005.714} \\ = 7.029 \times 10^{-4}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{0.707 \times 1005.714} \\ = 1.406 \times 10^{-5}$$

การสเกลจะกำหนดค่าของ R_2 ใ้ที่ 5 K ดังนั้นค่า K_m จึงควรเท่ากับ

$$K_m = \frac{R_{\text{new}}}{R_{\text{old}}} \\ = \frac{5000}{1.406 \times 10^{-5}} \\ = 3555176.337$$

จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{3555176.337} \\ = 281 \text{ nF}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = 5 \text{ K}$$

$$R_1 = 7.029 \times 10^{-4} \times 3555176.337 \\ = 2.499 \text{ K}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก High Cut ที่ระดับ 5 KHz จะได้

$$\omega_0 = 31428.57143$$

และวงจรในส่วน Low Pass Filter จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 = 1 \text{ F}$$

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_p} = \frac{0.707}{31428.571} \\ = 2.249 \times 10^{-5}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{\omega_p} \\ = 3.182 \times 10^{-5}$$

จากสเกลจะกำหนดค่าของ R_2 ใ้ที่ 10 K จะทำให้ได้ Km ออกมาที่

$$K_m = \frac{R_{\text{new}}}{R_{\text{old}}} \\ = \frac{10 \text{ K}}{3.182 \times 10^{-5}} \\ = 314287510.200$$

จะได้ว่า

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{314287510.200} \\ = 3.180 \text{ nF}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ K}$$

$$R_1 = 2.249 \times 10^{-5} \times 314287510.200 \\ = 7.069 \text{ KOhm}$$

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 การทดลองโดยใช้การ Simuled จากโปรแกรม Pspice

จุดประสงค์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร ที่ได้จากการทดลองออกแบบเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการประกอบวงจรต่อไป

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

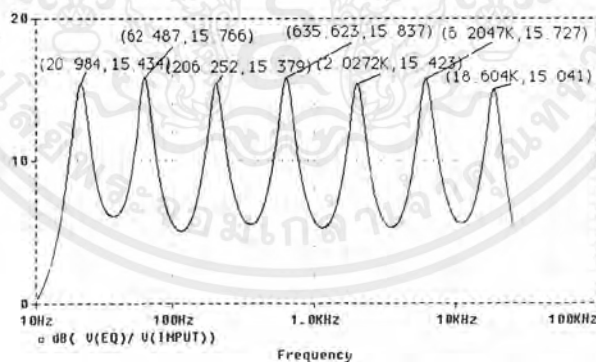
1. ทดลองวงจรในส่วน Graphic Equalisor

1.1 สุ่มความถี่ที่ใช้งานออกมา 7 ความถี่ตามนี้ 20 Hz, 63 Hz, 200 Hz, 630 Hz, 2 KHz, 6.3 KHz และ 20 KHz

ความถี่ที่ถูกสุ่มออกมาทดลองจะอยู่ห่างกันเพียงพอที่จะทำให้เห็นความแตกต่างของอัตราขยาย ที่แต่ละความถี่ ต้องจรงตามรูป เพื่อทำการ Simuled โดย Set Pot ของอัตราขยายแต่ละความถี่ใช้เป็น 1 และ 0 ตามลำดับ

1.2 บันทึกผลการทดลองที่ได้เป็นกราฟผลการตอบสนองความถี่ และตารางแสดงผลการตอบสนองความถี่

Pot set "1"



รูปที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟฟิควอลเทจอีควอลไลเซอร์ เมื่อปรับเพิ่มอัตราขยาย

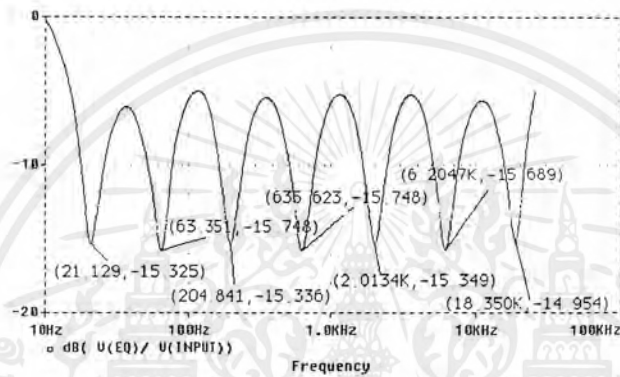
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นว่าอัตราขยายที่ละความถี่จะเท่ากับ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟพิก EQ ปรับเพิ่มอัตราขยายในบางความถี่

ความถี่ (Hz)	20	63	200	630	2K	6.3K	20K
อัตราขยาย (dB)	15.44	15.76	15.37	15.84	15.42	15.73	15.04

• Pot set "o"



รูปที่ 4.2 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของกราฟพิก อีควอไลเซอร์ เมื่อปรับลดทอนอัตราขยาย

จากกราฟจะเห็นว่าอัตราขยายที่แต่ละความถี่เท่ากับ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของกราฟพิก EQ เพื่อปรับลดทอนอัตราขยายในบางความถี่

ความถี่ (Hz)	20	63	200	630	2K	6.3K	20K
อัตราขยาย (dB)	-15.33	-15.75	-15.34	-15.75	-15.35	-15.69	-14.95

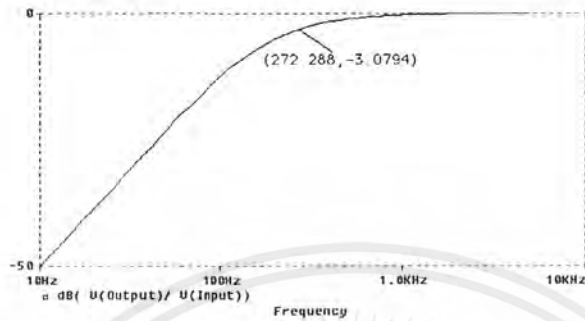
2. ทดลองวงจรในส่วน High Pass filter

2.1 ต่อวงจรดังรูปเพื่อทำการ Simuled ผลการทดลองของวงจร High Pass filter โดยการ Set Pot ที่ "o" ทั้งหมด และ "1" ทั้งหมด อีก 4 ครั้ง

2.2 บันทึกผลการทดลองที่ได้ในรูปกราฟ ผลการตอบสนองความถี่ และบอกถึงจุด -3 dB ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

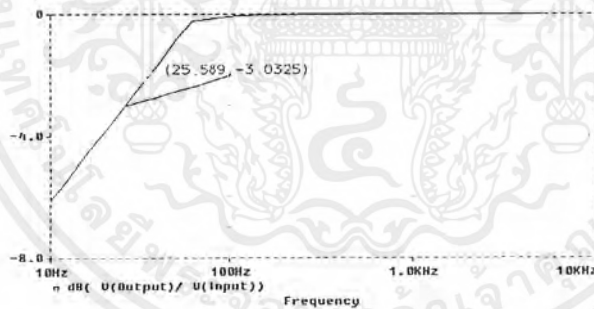
• Pot Set "0"



รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจร High Pass Filter เพื่อปรับค่าความต้านทานปรับค่าให้เป็น 0

จุด -3 dB อยู่ที่ 272 Hz

• Pot Set "1"



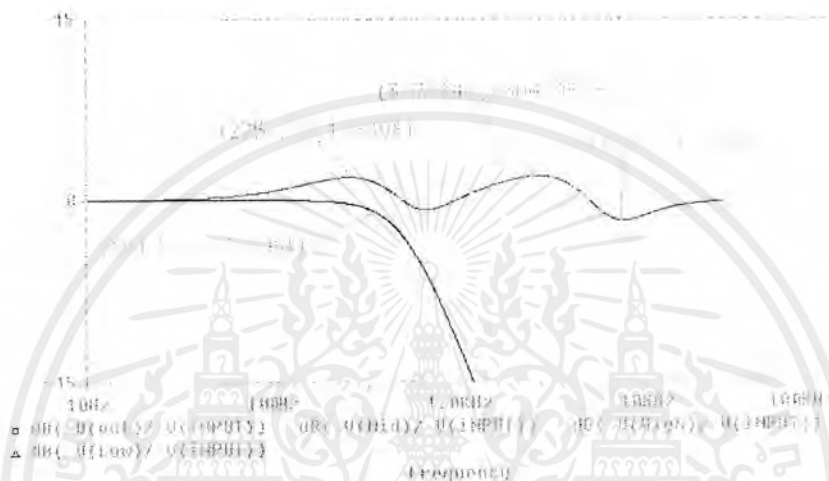
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจร High Pass Filter เมื่อปรับค่าความต้านทานปรับค่าให้เป็น 1

จุด -3 dB อยู่ที่ 25.59 Hz

3. ทดลองวงจรในส่วน Crossover

3.1 ตัวอย่างตามรูปเพื่อทำการ Simuladd ผลการทดลองของวงจร ส่วน Cross over โดยการ Set Pot ให้เท่ากับ “1”

3.2 บันทึกผลการทดลองการ Simuladd ในรูปกราฟผลการตอบสนองความถี่พร้อมทั้งบอกถึงจุดตัดที่เลื่อนเปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 4.5 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของครอสโอเวอร์ อีควอไลเซอร์

เมื่อปรับ pot ให้เท่ากับ 1 ทั้งหมด จุดตัดแรกจะอยู่ที่ 275 Hz และจุดตัดที่ 2 จะอยู่ที่ 7.4 KHz

เมื่อปรับ pot ให้เท่ากับ 0 ทั้งหมด จุดตัดแรกจะอยู่ที่ 35.59 Hz และจุดตัดที่ 2 จะอยู่ที่ 273 Hz

การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงานจากการต่อวงจรจริง

จุดประสงค์ ทดสอบผลการทำงานของวงจรที่ต่อใช้งานจริง และทำการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง
ของวงจร

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทดลองวงจรในส่วนกราฟฟิควอลไลเซอร์ (Graphic Equalizer)

1.1 ทดสอบวงจรในส่วนกราฟฟิควอลไลเซอร์ (Graphic Equalizer) โดยการปรับ
เพิ่มอัตราขยายที่ละความถี่ป้อนสัญญาณเข้าที่ Input ค่อย ๆ ปรับความถี่จนได้ความถี่ที่ใช้ค่าแรงดัน
Output ออกมามากที่สุด บันทึกผลลงตาราง

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าจริง เมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราขยาย

ความถี่ที่ออกแบบใช้ (Hz)	ความถี่ที่วัดได้จริง (Hz)	แรงดัน O/P (V)	อัตราขยาย (dB)
20	20	2.2	6.85
25	24	2.2	6.85
31.5	31.54	2.3	7.24
40	40	2.2	6.85
50	50	2.2	6.85
63	66.67	2.4	7.61
80	76.92	2.2	6.85
100	105.26	2.2	6.85
125	125	2.2	6.85
160	160	2.4	7.61
200	208.3	2.1	6.44
250	238	2.2	6.85
315	312.5	2.2	6.85
400	384.6	2.3	7.24
500	467.2	2.4	7.61
630	645.2	2.2	6.85
800	755	2.3	7.24
1 K	1.05 K	2.2	6.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.25 K	1.212 K	2.3	7.24
1.6 K	1.515 K	2.3	7.24
2 K	1.96 K	2.3	7.24
2.5 K	2.5 K	2.2	6.85
3.15 K	3.125 K	2.4	7.61
4 K	3.70 K	2.2	6.85
5 K	5.13 K	2.4	7.61
6.3 K	6.35 K	2.2	6.85
8 K	8 K	2.4	7.61
10 K	10 K	2.2	6.85
12.5 K	12.5 K	2.4	7.61
16 K	16.13 K	2.4	7.61
20 K	21.276 K	2.2	6.85

1.2 ปรับลดทอนสัญญาณที่ละความถี่ป้อนสัญญาณเข้าที่ Input ค่อย ๆ ปรับทีละความถี่ที่ใช้แรงดัน O/P ออกมาน้อยที่สุด บันทึกผลลงตาราง ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าจริงเมื่อทำการปรับลด

ความถี่ที่ออกแบบใช้ (Hz)	ความถี่ที่วัดได้จริง (Hz)	แรงดัน O/P (V)	อัตราขยาย (dB)
20	20	0.45	-6.94
25	24	0.40	-7.95
31.5	31.54	0.45	-6.94
40	40	0.50	-6.02
50	50	0.47	-6.56
63	66.67	0.47	-6.56
80	76.92	0.47	-6.56
100	105.26	0.50	-6.02
125	125	0.40	-7.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

160	160	0.45	-6.94
200	208.3	0.45	-6.94
250	238	0.45	-6.94
315	312.5	0.47	-6.56
400	384.6	0.45	-6.94
500	467.2	0.45	-6.94
630	645.2	0.47	-6.56
800	755	0.47	-6.56
1 K	1.05 K	0.40	-7.95
1.25 K	1.212 K	0.43	-7.33
1.6 K	1.515 K	0.43	-7.33
2 K	1.96 K	0.40	-7.95
2.5 K	2.5 K	0.45	-6.94
3.15 K	3.125 K	0.45	-6.94
4 K	3.70 K	0.40	-7.95
5 K	5.13 K	0.40	-7.95
6.3 K	6.35 K	0.42	-7.53
8 K	8 K	0.44	-7.13
10 K	10 K	0.45	-6.94
12.5 K	12.5 K	0.45	-6.94
16 K	16.13 K	0.45	-6.94
20 K	21.27 K	0.45	-6.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

จากผลการทดลองในบทที่ 4 ซึ่งมีผลการทดลองที่ได้จากการซิมูเลทจากโปรแกรม PSpice และผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าที่ได้ในการทดลองกับวงจรจริง ซึ่งในผลการทดลองพบว่า ในส่วนของกราฟฟิสิกส์อควอไลเซอร์ เมื่อทำการซิมูเลทจากโปรแกรม Pspice จะพบว่าค่าความถี่ กลางและค่าอัตราการขยายในแต่ละช่วงความถี่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบมา แต่เมื่อทำการวัด และทดลองเปรียบเทียบค่าอัตราการขยายระหว่างค่าที่ออกแบบและค่าที่ได้จากวัดทดลอง ในการ ออกแบบจะกำหนดค่าอัตราการขยายไว้ที่ ± 7.5 dB แต่เมื่อได้ทำการทดลองวัดตรวจสอบจะพบ ว่าค่าอัตราการขยายจะอยู่ที่ 6.44 dB และอัตราการขยายสูงสุดอยู่ที่ 7.24 dB ในส่วนของอัตรา การลดทอนของสัญญาณจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ -7.95 dB และอัตราการลดทอนต่ำสุดเท่ากับ 6.02 dB หากเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กำหนดไว้จะพบว่ายังคงกระเพื่อมอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 3 dB จากค่าที่กำหนด จึงถือว่าเป็นค่าที่ใช้ได้อยู่ แต่ในส่วนของค่าความถี่กลางจะมีการเปลี่ยนแปลง ไปค่อนข้างมาก สาเหตุที่ทำให้อัตราการขยายและค่าความถี่กลางเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องมา จากค่าอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไม่สามารถหาซื้อได้ จึงต้องใช้ค่าใกล้เคียงและเป็นผลทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความจริง

ในส่วนของผลการทดลองของวงจรครอส โอเวอร์อควอไลเซอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการทดลอง ซิมูเลทอย่างเดียวยังถือว่าเป็นผลการทดลองที่ยอมรับได้ ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราการกระเพื่อมของ อัตราการขยายที่ขาออกมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 3 dB คือ อยู่ที่อัตราขยายสูงสุดเท่า กับ 1.85 dB และอัตราการขยายต่ำสุด -1.79 dB อีกทั้งการปรับจุดตัดของความถี่ของวงจรยัง สามารถทำได้อิสระ โดยจะจุดตัดระหว่างค่าความถี่ต่ำและค่าความถี่กลางจะสามารถปรับได้ที่ 35 Hz ถึง 275 Hz และจุดตัดระหว่างค่าความถี่กลางและค่าความถี่สูงจะสามารถได้อยู่ในช่วง 274 Hz ถึง 7.4 KHz

ปัญหาที่พบในการทดลองในส่วนของกราฟฟิสิกส์อควอไลเซอร์ คือ มีการดึงกระแสมากเกินไป จึงทำให้้อปแอมป์เกิดความร้อนสะสมภายในขึ้นอย่างมาก ไม่เหมาะที่จะใช้งานเป็นระยะเวลา นาน เมื่อลองวัดค่าการดึงกระแสของวงจรจากแหล่งจ่าย พบว่ามีการใช้กระแสมากถึงประมาณ 1.0 แอมป์แอมป์ หากเปรียบเทียบกับการใช้การเสของ ้อปแอมป์ NE5532P ที่ใช้กระแสแค่ตัวละ ประมาณ 16 มิลลิแอมป์แอมป์ ใน โครงการ กราฟฟิสิกส์อควอไลเซอร์ใช้้อปแอมป์ไปทั้งสิ้น 45 ตัวหรือ 23 ตัวไอซี เมื่อนำไปคูณกับค่าการใช้กระแสของ NE5532P แต่ละตัวพบว่าเป็นการสิ้นเปลือง กระแสประมาณ 368 มิลลิแอมป์แอมป์ เปรียบเทียบค่ากับการใช้งานจริงพบว่าต่างกันมากๆประมาณ 632 มิลลิแอมป์แอมป์ ค่ากระแสที่เกินมาน่าจะมาจากการที่ไม่ได้ใส่ คาปาซิเตอร์บล็อกแรงดันดีซีใน จุดเชื่อมต่อระหว่างวงจรปรับเกณฑ์กับวงจรในส่วนแบนพาสฟิลเตอร์ เหตุผลที่ให้การวิเคราะห์เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ ก็เนื่องจากว่า ออปแอมป์ที่เกิดความร้อนขึ้นมามากๆเป็น ออปแอมป์ที่ใช้ในส่วนของวงจร แบบ พาสฟิลเตอร์ และออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรอื่นก็ไม่ได้มีความร้อนสะสมภายในมากจนก่อให้เกิด ความร้อนที่ตัวไอซี การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการใส่คาปาซิเตอร์บล็อกแรงดันดีซีไว้ที่จุด ต่างๆ ที่อาจเกิดการรั่วไหลของแรงดันจากแหล่งจ่าย ปัญหาที่จะพบอีกประการหนึ่งก็คือ สัญญาณ รบกวนจากอุปกรณ์ภายใน เช่น ลายทองแดงที่เป็นตัวนำของไฟฟ้าที่ ± 12 โวลต์ ซึ่งเป็นสาเหตุ ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในแผ่นลายวงจร การแก้ปัญหาในส่วนนี้จะใช้คาปาซิเตอร์ค่า 0.1 μF ต่อคร่อมลายทองแดงที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไว้กับกราวด์ไว้ที่ทุกๆตัวไอซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATA SHEET

NE/SA/SE5532/5532A

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

Product specification

1997 Sept 29

IC11 Data Handbook

Philips
Semiconductors



PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

DESCRIPTION

The 5532 is a dual high-performance low noise operational amplifier. Compared to most of the standard operational amplifiers, such as the 1458, it shows better noise performance, improved output drive capability and considerably higher small-signal and power bandwidths.

This makes the device especially suitable for application in high-quality and professional audio equipment, instrumentation and control circuits, and telephone channel amplifiers. The op amp is internally compensated for gains equal to one. If very low noise is of prime importance, it is recommended that the 5532A version be used because it has guaranteed noise voltage specifications.

FEATURES

- Small-signal bandwidth: 10MHz
- Output drive capability: 600Ω, 10V_{RMS}
- Input noise voltage: 5nV/√Hz (typical)
- DC voltage gain: 50000
- AC voltage gain: 2200 at 10kHz
- Power bandwidth: 140kHz
- Slew rate: 9V/μs
- Large supply voltage range: ±3 to ±20V
- Compensated for unity gain

PIN CONFIGURATIONS

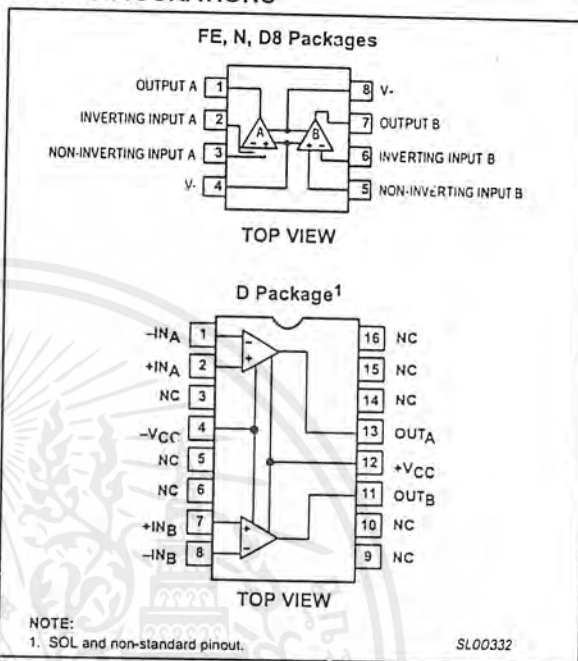


Figure 1. Pin Configurations

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to 70°C	NE5532N	SOT97-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA5532N	SOT97-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA5532AN	SOT97-1
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to 70°C	NE5532FE	0580A
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to 70°C	NE5532AN	SOT97-1
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to 70°C	NE5532AF	0580A
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE5532FE	0580A
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE5532AF	0580A
8-Pin Small Outline Package (SO)	0 to 70°C	NE5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-40°C to 85°C	SA5532D8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-40°C to 85°C	SA5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-55°C to +125°C	SE5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	0 to 70°C	NE5532D8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-40°C to 85°C	SA5532D8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-40°C to 85°C	SA5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-55°C to +125°C	SE5532D8	SOT96-1
16-Pin Plastic Small Outline Large (SOL) Package	0 to 70°C	NE5532D	SOT162-1
16-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE5532N	SOT38-4

Internally-compensated dual low noise
operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

EQUIVALENT SCHEMATIC (EACH AMPLIFIER)

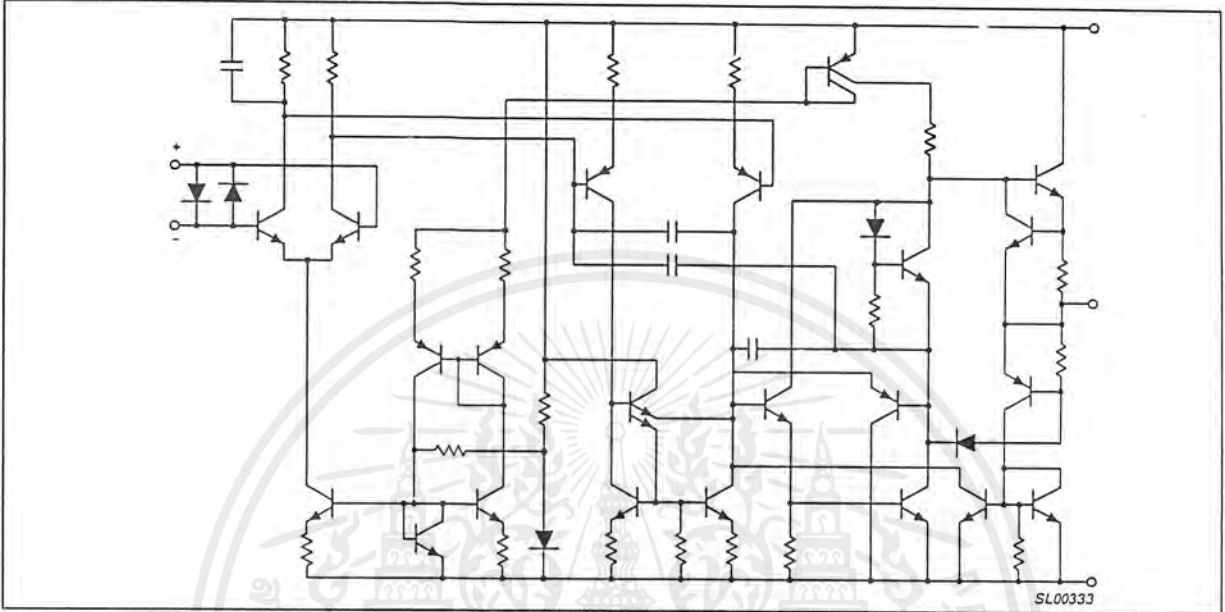


Figure 2. Equivalent Schematic (Each Amplifier)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V_S	Supply voltage	± 22	V
V_{IN}	Input voltage	$\pm V_{SUPPLY}$	V
V_{DIFF}	Differential input voltage ¹	± 0.5	V
T_A	Operating temperature range SA5532/A NE5532/A SE5532/A	-40 to +85 0 to 70 -55 to +125	$^{\circ}\text{C}$
T_{STG}	Storage temperature	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$
T_J	Junction temperature	150	$^{\circ}\text{C}$
P_D	Maximum power dissipation, $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (still-air) ² 8 D8 package 8 N package 8 FE package 16 D package	780 1200 1000 1200	mW mW mW mW
T_{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	300	$^{\circ}\text{C}$

NOTES:

- Diodes protect the inputs against over-voltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6V. Maximum current should be limited to $\pm 10\text{mA}$.
- Thermal resistances of the above packages are as follows:
N package at 100°C/W
F package at 135°C/W
D package at 105°C/W
D8 package at 160°C/W

Internally-compensated dual low noise
operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $T_A=25^\circ\text{C}$ $V_S=\pm 15\text{V}$, unless otherwise specified, 1, 2, 3

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE/5532/5532A			NE/SA/5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Offset voltage	Over temperature		0.5	2		0.5	4	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$				5	3		5	5	mV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_{OS}	Offset current	Over temperature			100		10	150	nA
$\Delta I_{OS}/\Delta T$				200	200		200	200	nA $\text{pA}/^\circ\text{C}$
I_B	Input current	Over temperature		200	400		200	800	nA
$\Delta I_B/\Delta T$				5	700		5	1000	nA $\text{nA}/^\circ\text{C}$
I_{CC}	Supply current	Over temperature		8	10.5		8	16	mA
					13				mA
V_{CM}	Common-mode input range		± 12	± 13		± 12	± 13		V
CMRR	Common-mode rejection ratio		80	100		70	100		dB
PSRR	Power supply rejection ratio			10	50		10	100	$\mu\text{V}/\text{V}$
A_{VOL}	Large-signal voltage gain	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$, $V_O = \pm 10\text{V}$	50	100		25	100		V/mV
		Over temperature	25			15			V/mV
		$R_L \geq 600\Omega$, $V_O = \pm 10\text{V}$	40	50		15	50		V/mV
		Over temperature	20			10			V/mV
V_{OUT}	Output swing	$R_L \geq 600\Omega$	± 12	± 13		± 12	± 13		V
		Over temperature	± 10	± 12		± 10	± 12		
		$R_L \geq 600\Omega$, $V_S = \pm 18\text{V}$	± 15	± 16		± 15	± 16		
		Over temperature	± 12	± 14		± 12	± 14		
		$R_L \geq 2\text{k}\Omega$	± 13	± 13.5		± 13	± 13.5		
	Over temperature	± 12	± 12.5		± 10	± 12.5			
R_{IN}	Input resistance		30	300		30	300		k Ω
I_{SC}	Output short circuit current		10	38	60	10	38	60	mA

NOTES:

- Diodes protect the inputs against overvoltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6V. Maximum current should be limited to $\pm 10\text{mA}$.
- For operation at elevated temperature, derate packages based on the package thermal resistance.
- Output may be shorted to ground at $V_S = \pm 15\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure dissipation rating is not exceeded.

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $T_A=25^\circ\text{C}$ $V_S=\pm 15\text{V}$, unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SA/SE5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	
R_{OUT}	Output resistance	$A_V=30\text{dB}$ Closed-loop $f=10\text{kHz}$, $R_L=600\Omega$		0.3		Ω
	Overshoot	Voltage-follower $V_{IN}=100\text{mV}_{p,p}$ $C_L=100\text{pF}$, $R_L=600\Omega$		10		%
A_V	Gain	$f=10\text{kHz}$		2.2		V/mV
GBW	Gain bandwidth product	$C_L=100\text{pF}$, $R_L=600\Omega$		10		MHz
SR	Slew rate			9		V/ μs
	Power bandwidth	$V_{OUT}=\pm 10\text{V}$		140		kHz
		$V_{OUT}=\pm 14\text{V}$, $R_L=600\Omega$, $V_{CC}=\pm 18\text{V}$		100		kHz

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

T_A=25°C V_S=±15V, unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SE5532			NE/SA/SE5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{NOISE}	Input noise voltage	f _O =30Hz f _O =1kHz		8 5			8 5	12 6	nV/√Hz nV/√Hz
I _{NOISE}	Input noise current	f _O =30Hz f _O =1kHz		2.7 0.7			2.7 0.7		pA/√Hz pA/√Hz
	Channel separation	f=1kHz, R _S =5kΩ		110			110		dB

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

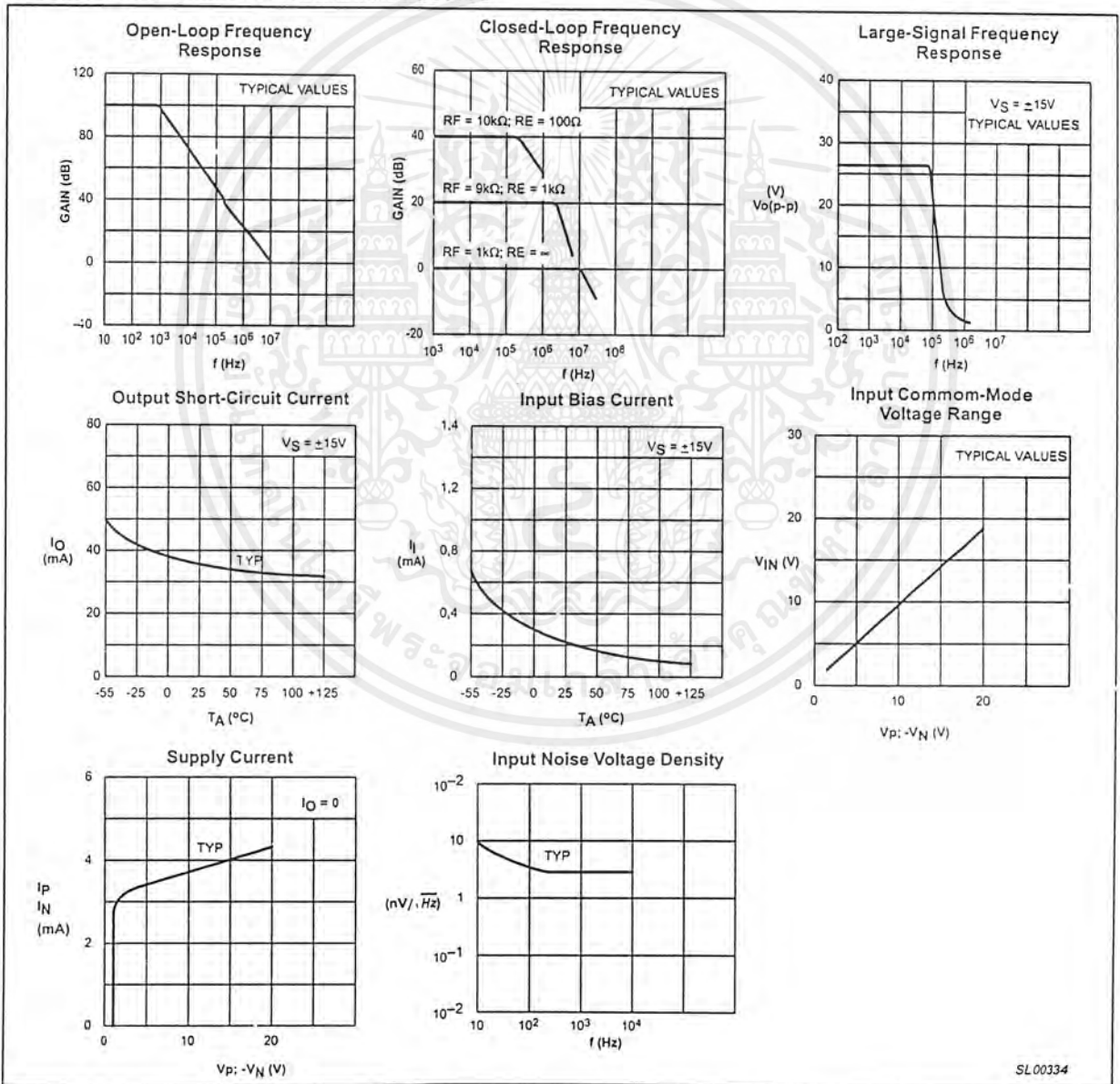


Figure 3. Typical Performance Characteristics

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

TEST CIRCUITS

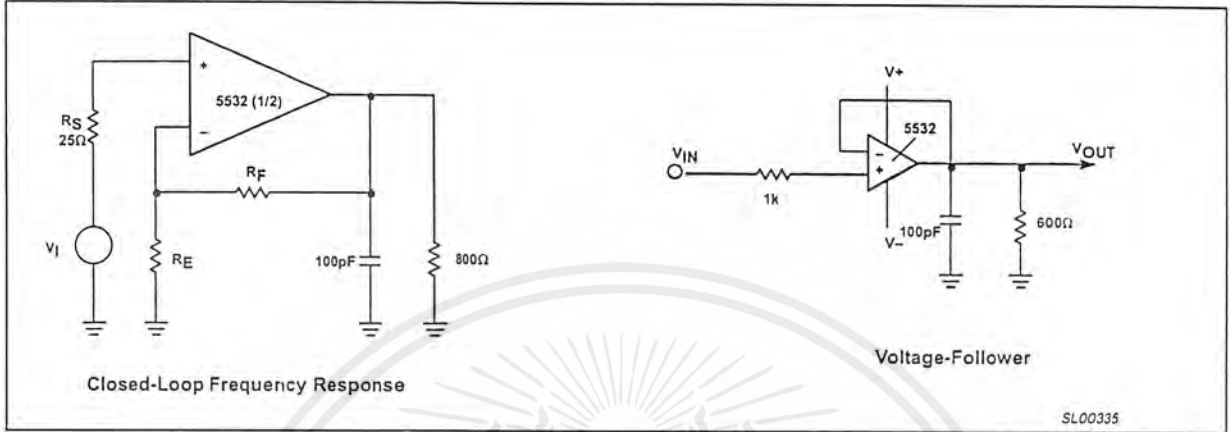


Figure 4. Test Circuits

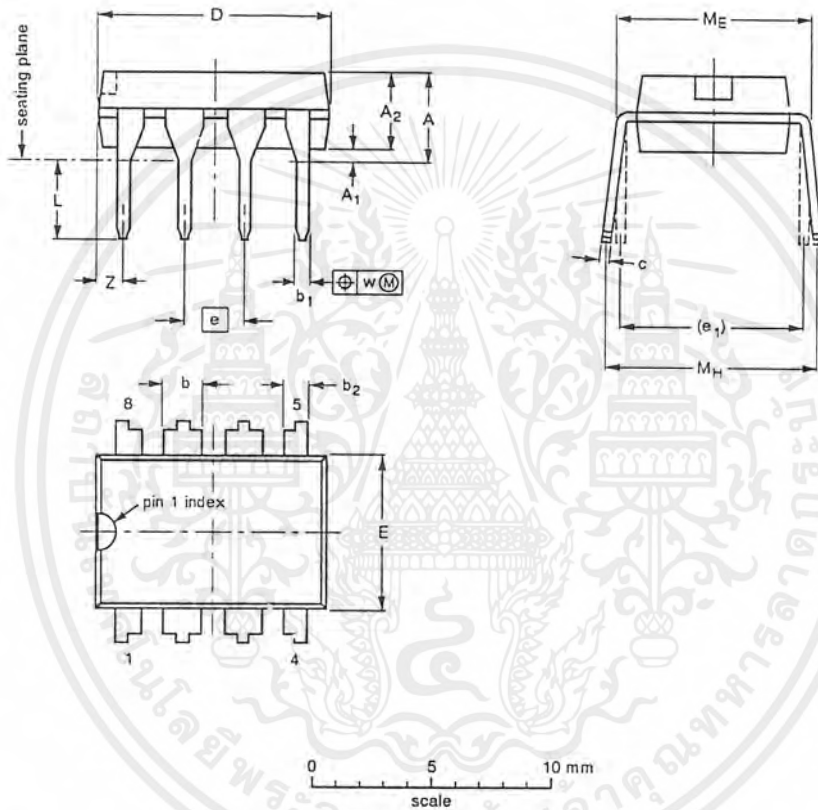
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

DIP8: plastic dual in-line package; 8 leads (300 mil)

SOT97-1



DIMENSIONS (inch dimensions are derived from the original mm dimensions)

UNIT	A max.	A ₁ min.	A ₂ max.	b	b ₁	b ₂	c	D ⁽¹⁾	E ⁽¹⁾	e	e ₁	L	M _E	M _H	w	Z ⁽¹⁾ max.
mm	4.2	0.51	3.2	1.73 1.14	0.53 0.38	1.07 0.89	0.36 0.23	9.8 9.2	6.48 6.20	2.54	7.62	3.60 3.05	8.25 7.80	10.0 8.3	0.254	1.15
inches	0.17	0.020	0.13	0.068 0.045	0.021 0.015	0.042 0.035	0.014 0.009	0.39 0.36	0.26 0.24	0.10	0.30	0.14 0.12	0.32 0.31	0.39 0.33	0.01	0.045

Note

1. Plastic or metal protrusions of 0.25 mm maximum per side are not included.

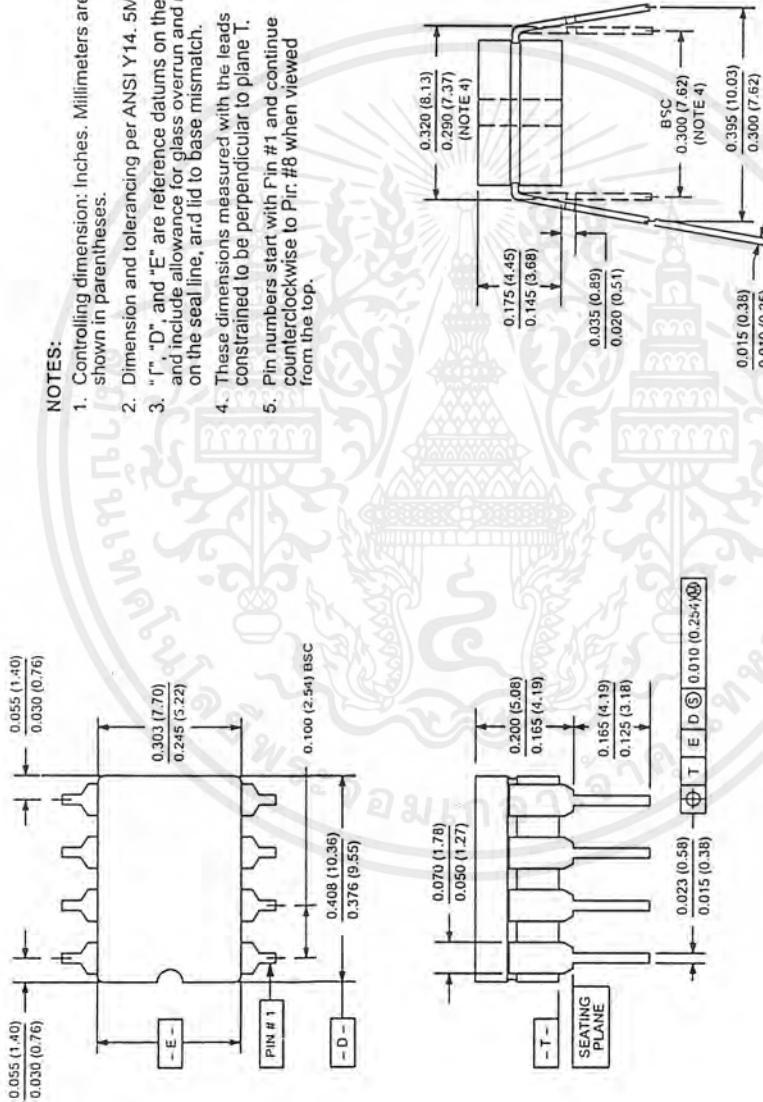
OUTLINE VERSION	REFERENCES			EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ		
SOT97-1	050G01	MO-001AN			92-11-17 95-02-04

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

0580A 8-PIN (300 mils wide) CERAMIC DUAL IN-LINE (F) PACKAGE

- NOTES:**
1. Controlling dimension: Inches. Millimeters are shown in parentheses.
 2. Dimension and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
 3. "G", "D", and "E" are reference datums on the body and include allowance for glass overrun and meniscus on the seal line, and lid to base mismatch.
 4. These dimensions measured with the leads constrained to be perpendicular to plane T.
 5. Pin numbers start with Pin #1 and continue counterclockwise to Pin: #8 when viewed from the top.



853-0580A 006688

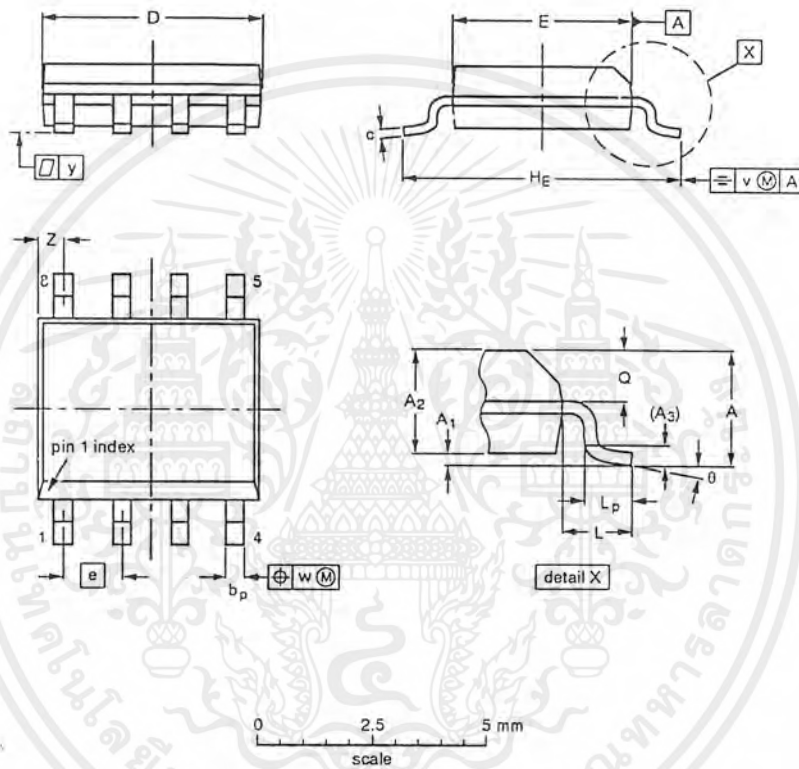
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

SO8: plastic small outline package; 8 leads; body width 3.9mm

SOT96-1



DIMENSIONS (inch dimensions are derived from the original mm dimensions)

UNIT	A _{max.}	A ₁	A ₂	A ₃	b _p	c	D ⁽¹⁾	E ⁽²⁾	e	H _E	L	L _p	Q	v	w	y	Z ⁽¹⁾	θ
mm	1.75	0.25 0.10	1.45 1.25	0.25	0.49 0.36	0.25 0.19	5.0 4.8	4.0 3.8	1.27	6.2 5.8	1.05	1.0 0.4	0.7 0.6	0.25	0.25	0.1	0.7 0.3	8° 0°
inches	0.069	0.0098 0.0039	0.057 0.049	0.01	0.019 0.014	0.0098 0.0075	0.20 0.19	0.16 0.15	0.050	0.24 0.23	0.041	0.039 0.016	0.028 0.024	0.01	0.01	0.004	0.028 0.012	

Notes

1. Plastic or metal protrusions of 0.15 mm maximum per side are not included.
2. Plastic or metal protrusions of 0.25 mm maximum per side are not included.

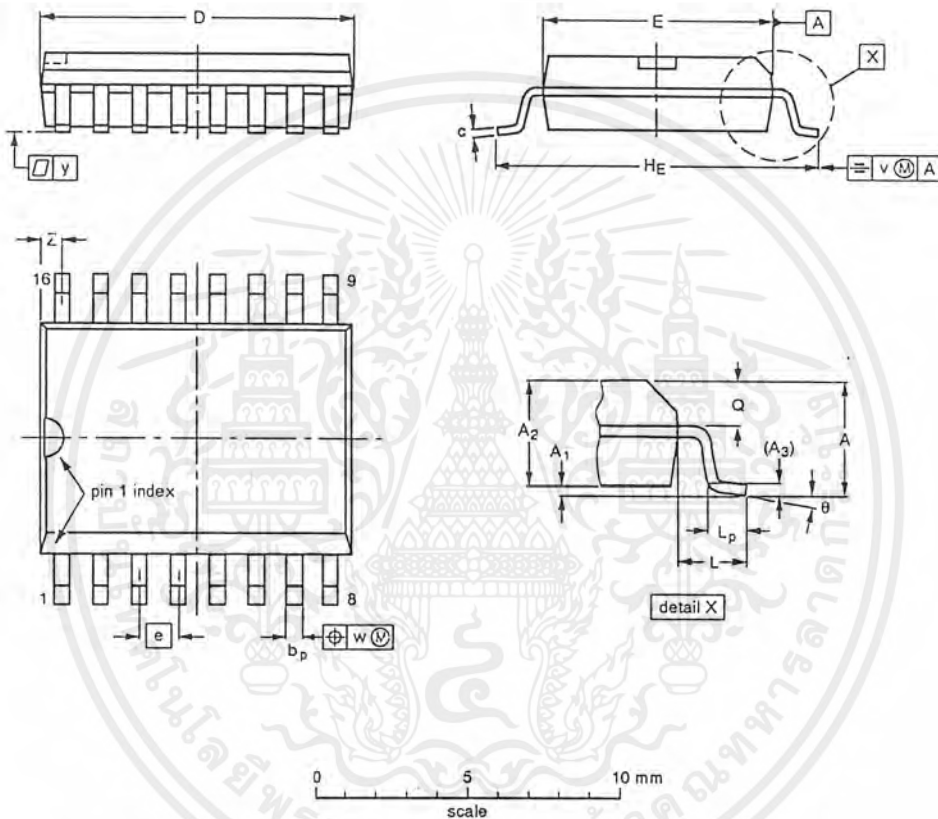
OUTLINE VERSION	REFERENCES			EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ		
SOT96-1	076E03S	MS-012AA			92-11-17 95-02-04

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

SO16: plastic small outline package; 16 leads; body width 7.5 mm

SOT162-1



DIMENSIONS (inch dimensions are derived from the original mm dimensions)

UNIT	A max.	A ₁	A ₂	A ₃	b _p	c	D ⁽¹⁾	E ⁽¹⁾	e	H _E	L	L _p	Q	v	w	y	z ⁽¹⁾	θ
mm	2.65	0.30 0.10	2.45 2.25	0.25	0.49 0.36	0.32 0.23	10.5 10.1	7.6 7.4	1.27	10.65 10.00	1.4	1.1 0.4	1.1 1.0	0.25	0.25	0.1	0.9 0.4	8° 0°
inches	0.10	0.012 0.004	0.096 0.089	0.01	0.019 0.014	0.013 0.009	0.41 0.40	0.30 0.29	0.050	0.42 0.39	0.055	0.043 0.016	0.043 0.039	0.01	0.01	0.004	0.035 0.016	

Note

1. Plastic or metal protrusions of 0.15 mm maximum per side are not included.

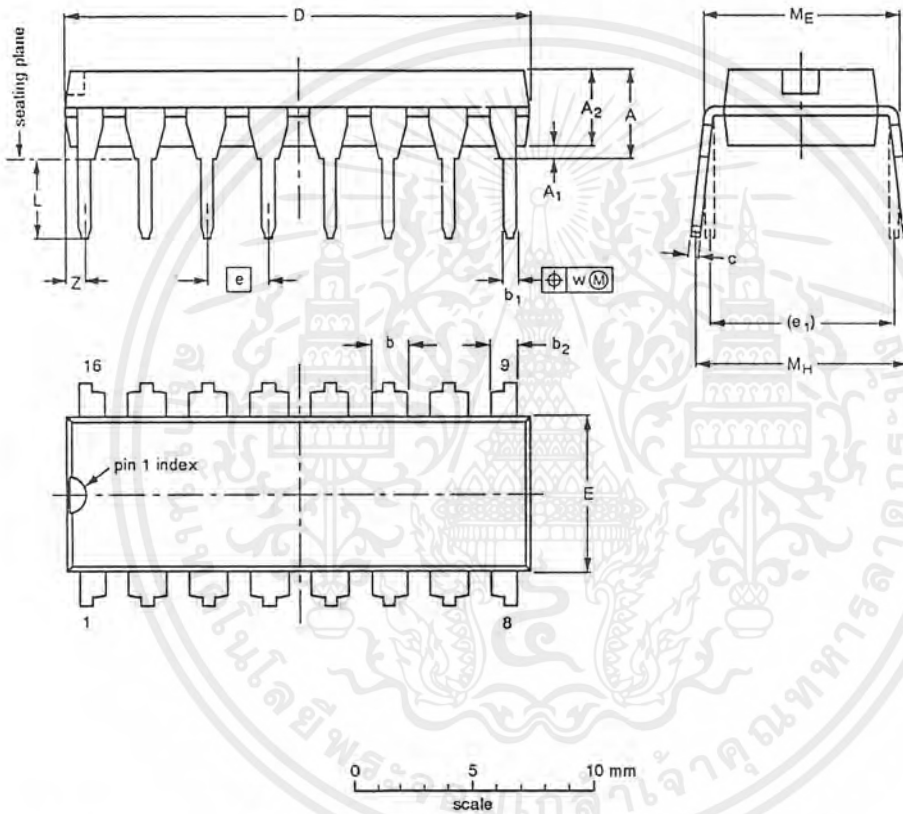
OUTLINE VERSION	REFERENCES				EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ			
SOT162-1	075E03	MS-013AA				-92-11-17 95-01-24

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

DIP16: plastic dual in-line package; 16 leads (300 mil)

SOT38-4



DIMENSIONS (inch dimensions are derived from the original mm dimensions)

UNIT	A max.	A ₁ min.	A ₂ max.	b	b ₁	b ₂	c	D ⁽¹⁾	E ⁽¹⁾	e	e ₁	L	M _E	M _H	w	Z ⁽¹⁾ max.
mm	4.2	0.51	3.2	1.73 1.30	0.53 0.38	1.25 0.85	0.36 0.23	19.50 18.55	6.48 6.20	2.54	7.62	3.60 3.05	8.25 7.80	10.0 8.3	0.254	0.76
inches	0.17	0.020	0.13	0.068 0.051	0.021 0.015	0.049 0.033	0.014 0.009	0.77 0.73	0.26 0.24	0.10	0.30	0.14 0.12	0.32 0.31	0.39 0.33	0.01	0.030

Note

1. Plastic or metal protrusions of 0.25 mm maximum per side are not included.

OUTLINE VERSION	REFERENCES				EUROPEAN PROJECTION	ISSUE DATE
	IEC	JEDEC	EIAJ			
SOT38-4						92-11-17 95-01-14

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SA/SE5532/5532A

DEFINITIONS

Data Sheet Identification	Product Status	Definition
<i>Objective Specification</i>	Formative or In Design	This data sheet contains the design target or goal specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
<i>Preliminary Specification</i>	Preproduction Product	This data sheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Philips Semiconductors reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design and supply the best possible product.
<i>Product Specification</i>	Full Production	This data sheet contains Final Specifications. Philips Semiconductors reserves the right to make changes at any time without notice, in order to improve design and supply the best possible product.

Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation reserve the right to make changes, without notice, in the products, including circuits, standard cells, and/or software, described or contained herein in order to improve design and/or performance. Philips Semiconductors assumes no responsibility or liability for the use of any of these products, conveys no license or title under any patent, copyright, or mask work right to these products, and makes no representations or warranties that these products are free from patent, copyright, or mask work right infringement, unless otherwise specified. Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. Philips Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification.

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation Products are not designed for use in life support appliances, devices, or systems where malfunction of a Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation Product can reasonably be expected to result in a personal injury. Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation customers using or selling Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation Products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips Semiconductors and Philips Electronics North America Corporation for any damages resulting from such improper use or sale.

Philips Semiconductors
811 East Arques Avenue
P.O. Box 3409
Sunnyvale, California 94088-3409
Telephone 800-234-7381

© Copyright Philips Electronics North America Corporation 1997
All rights reserved. Printed in U.S.A.

print code

Date of release: 04-96

Document order number:

9397 750 01699

Let's make things better.

Philips
Semiconductors



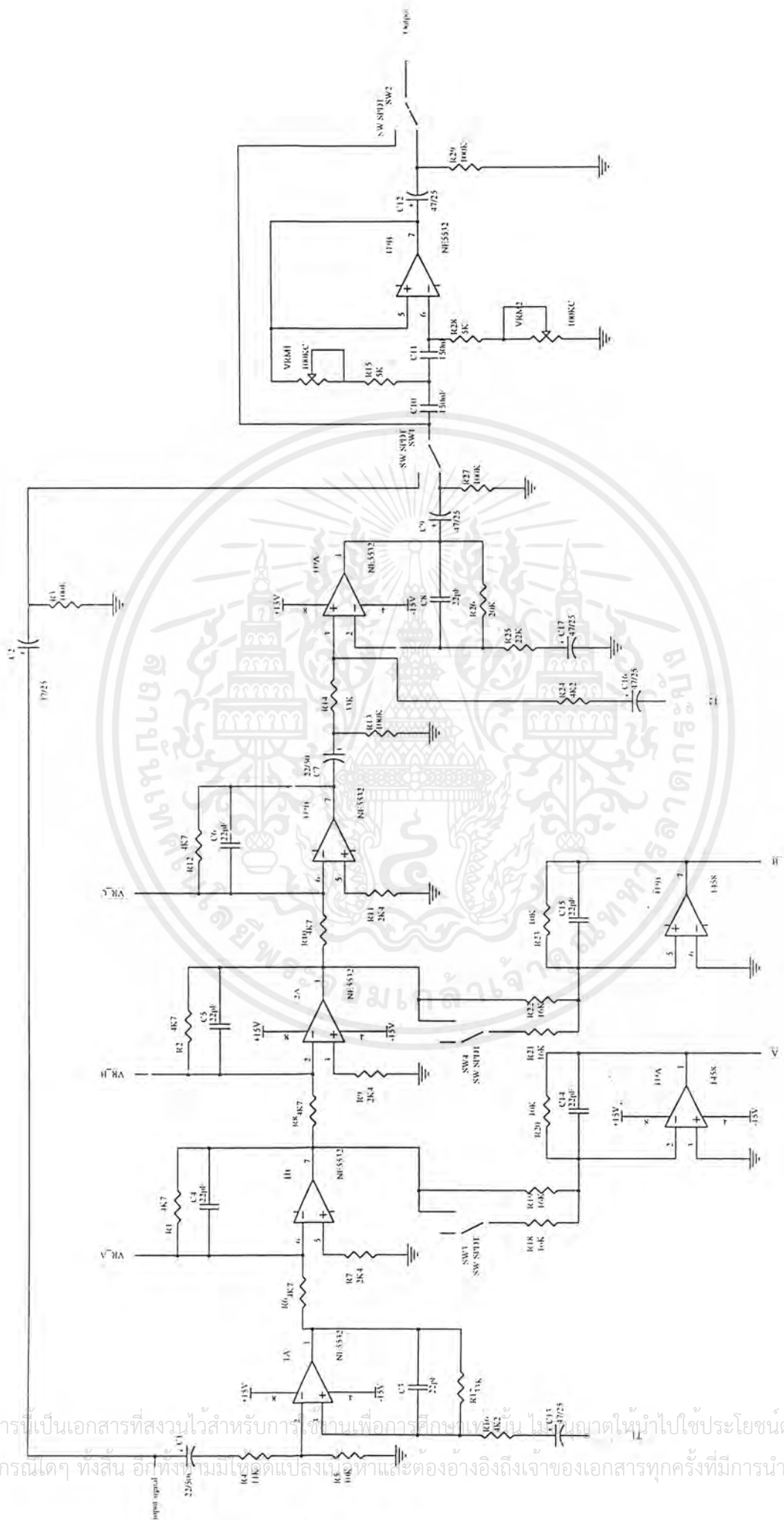
PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

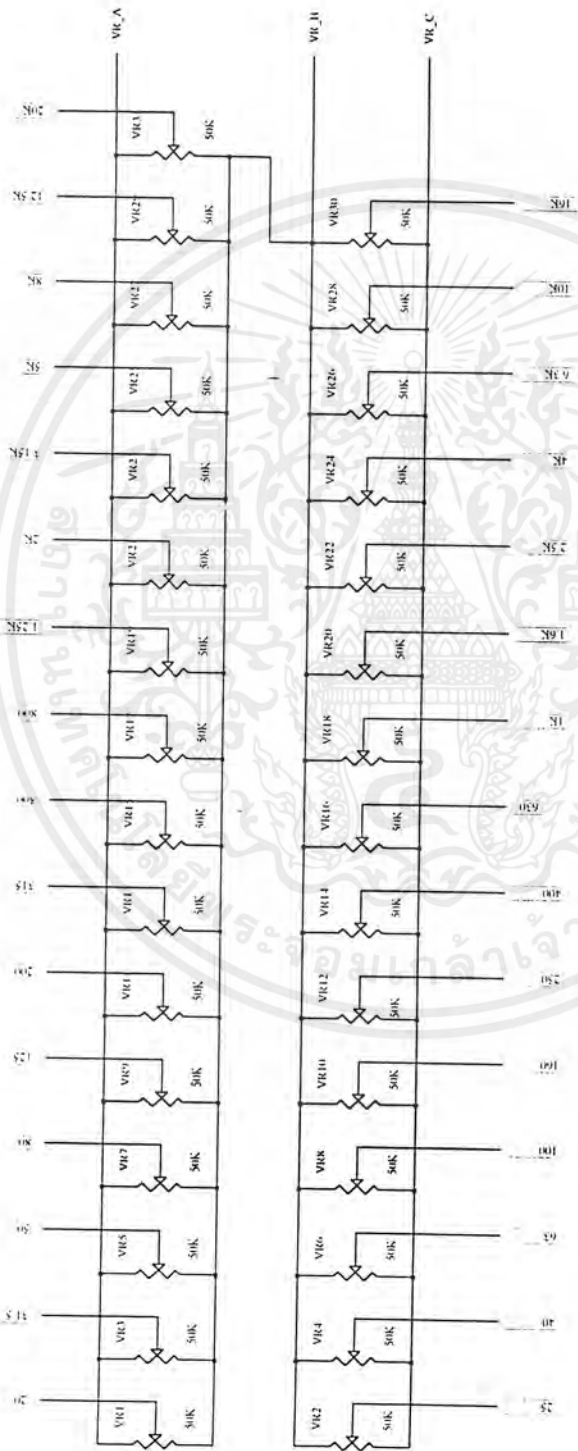


ภาคผนวก ข
รายละเอียดของวงจรที่ใช้ในกราฟฟิควอลไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	Size	Number
		11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

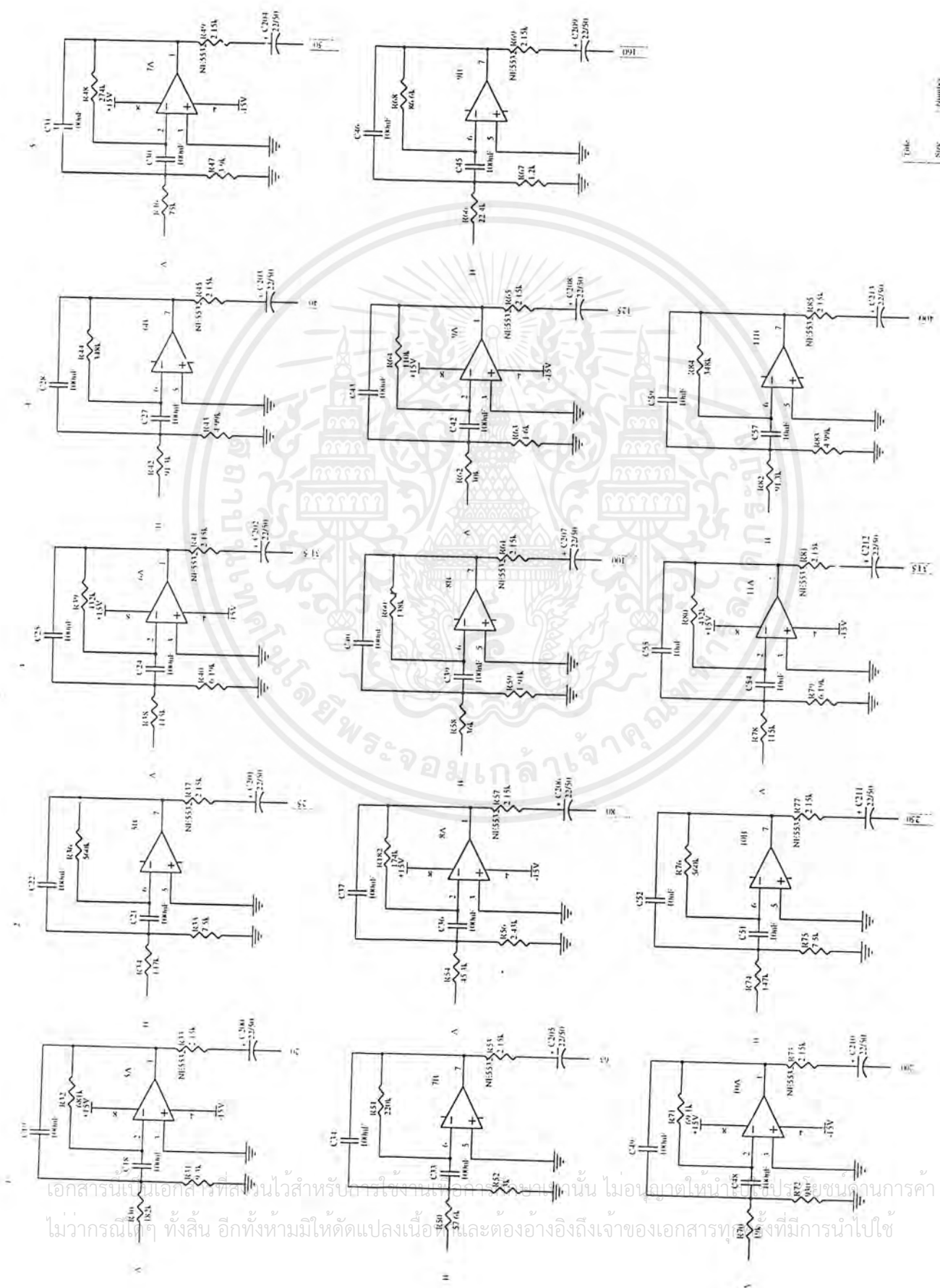
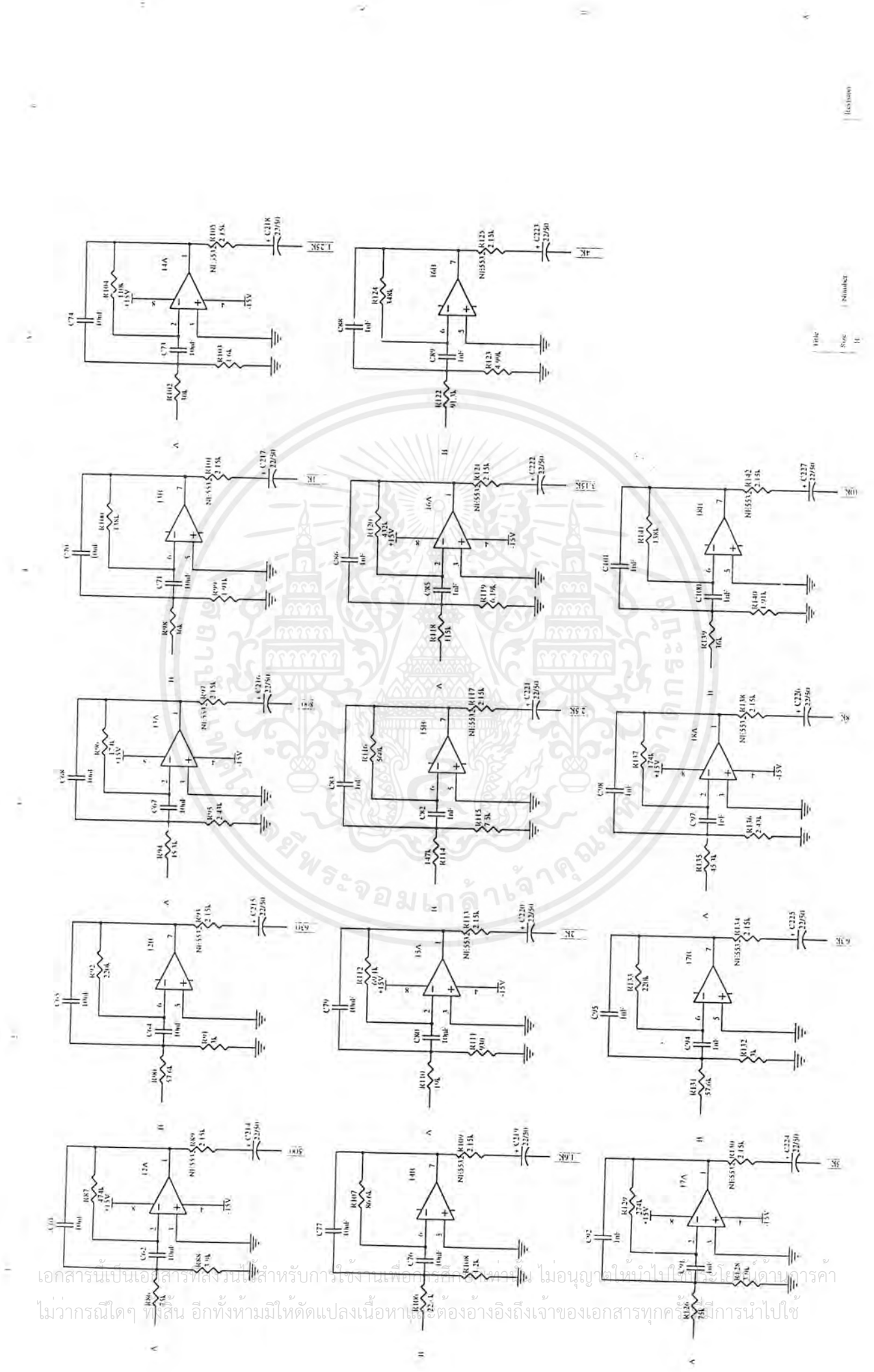
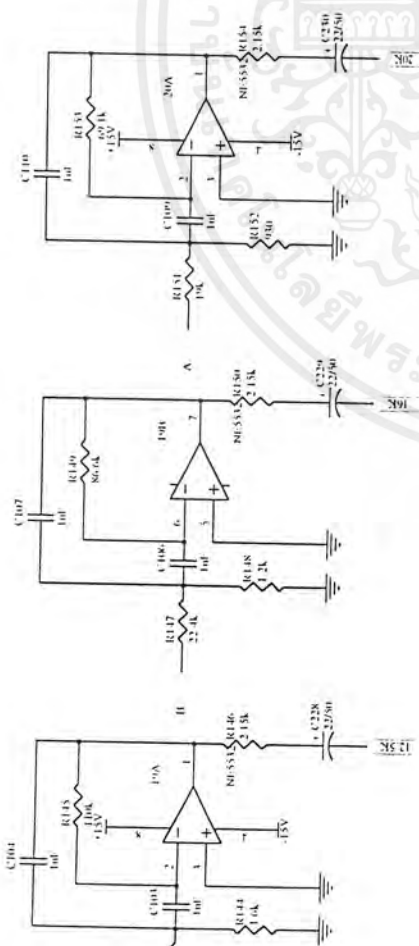


Table	Size	Amount

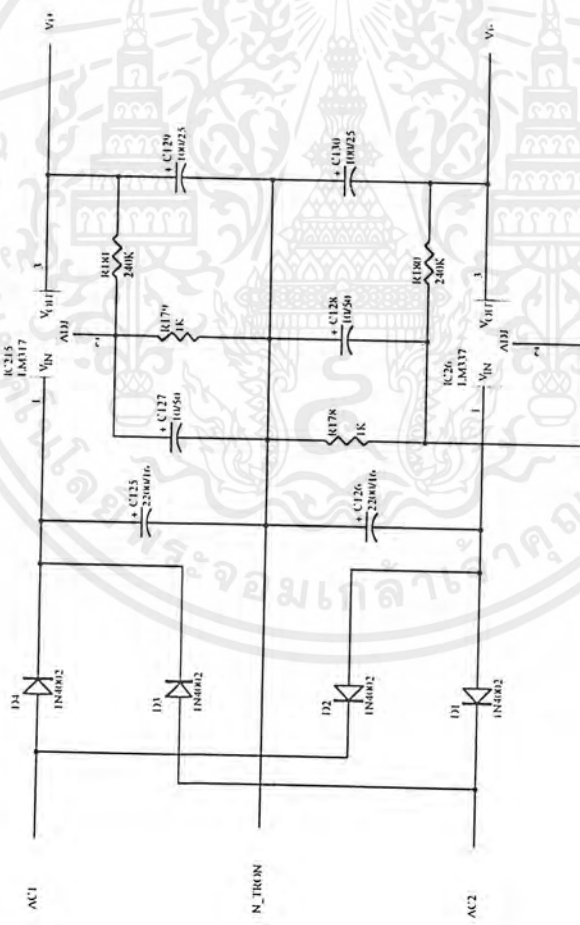
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะของหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต การค้า
 ไม่สามารถทำได้ ฟังชั่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



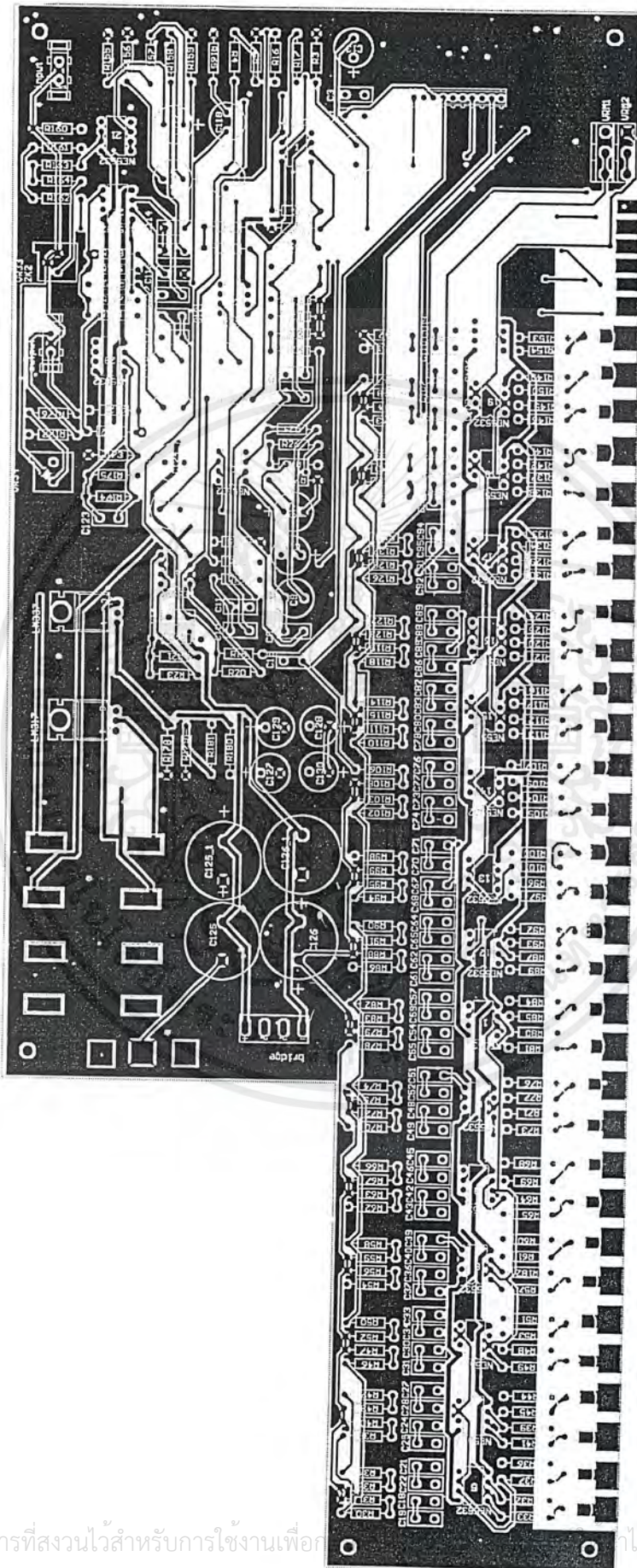
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของสิทธิ์ หากมีการแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ตัดแปลงเนื้อหาโดยไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง การนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

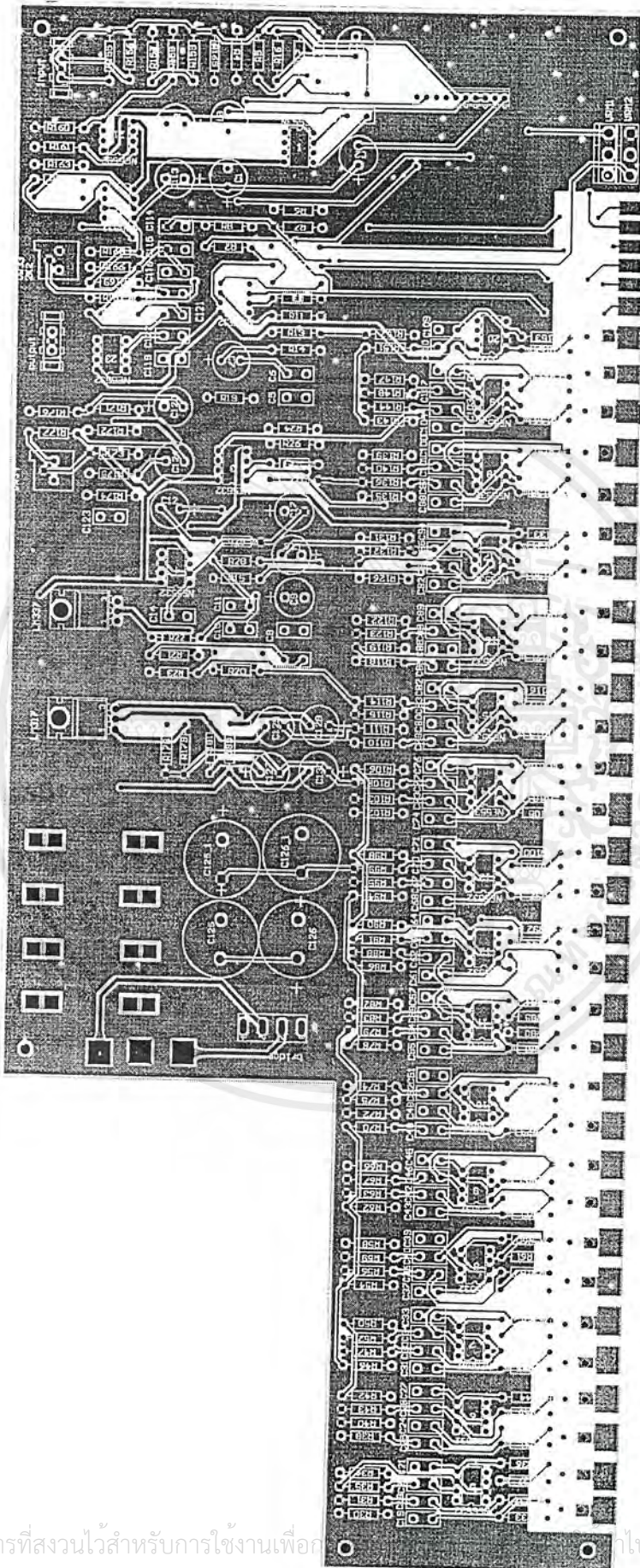


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

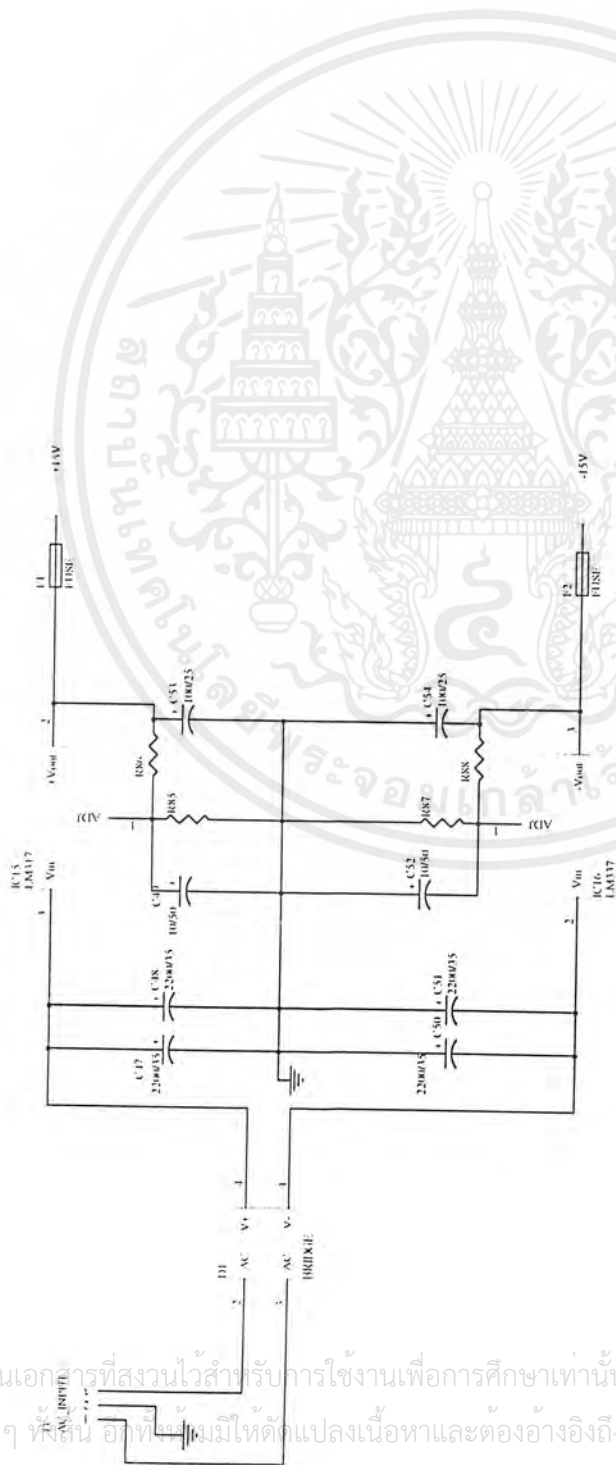


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

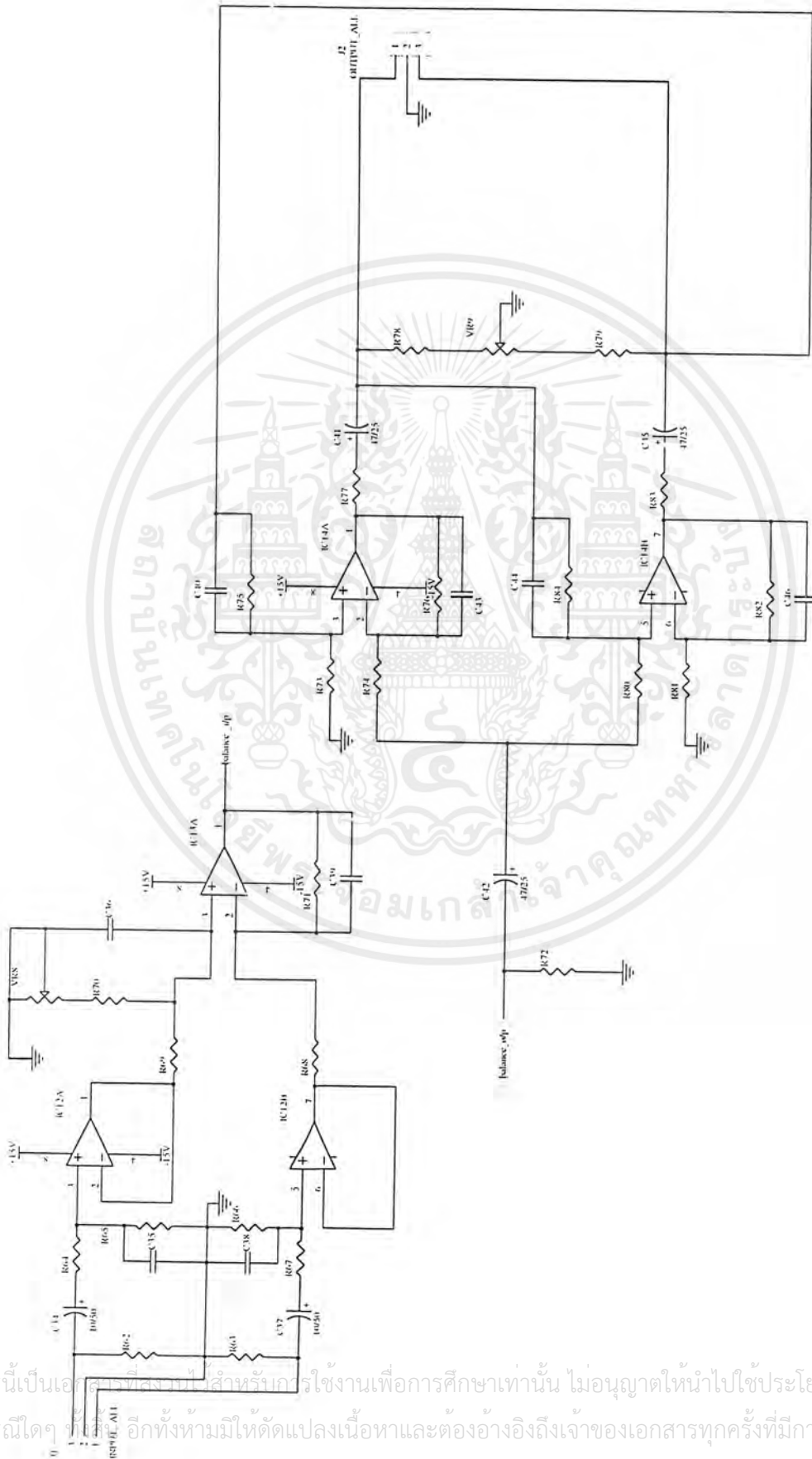


ภาคผนวก ก
รายละเอียดของวงจรที่ใช้ในครอสโอเวอร์อีควอไลเซอร์

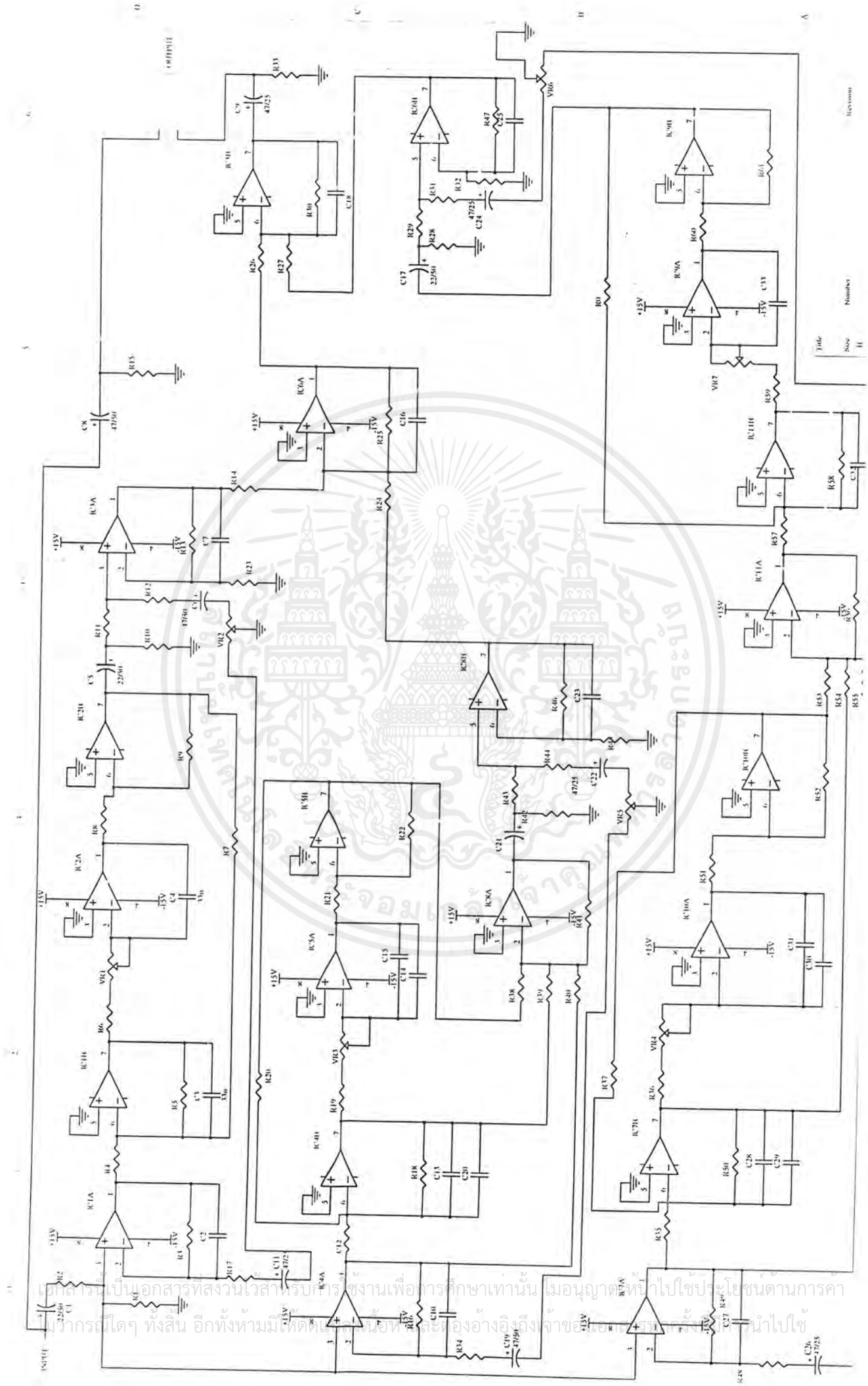
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

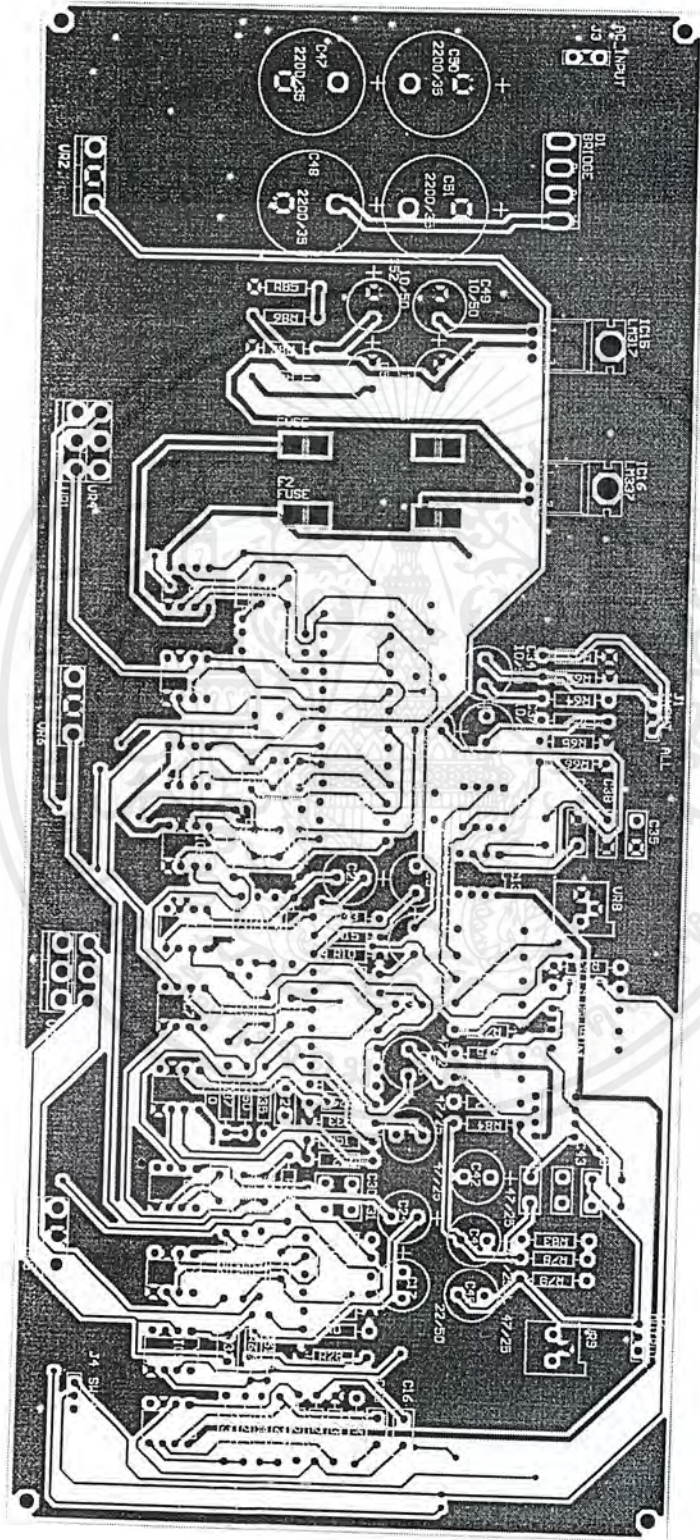


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีผู้ใดที่คัดลอกหรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

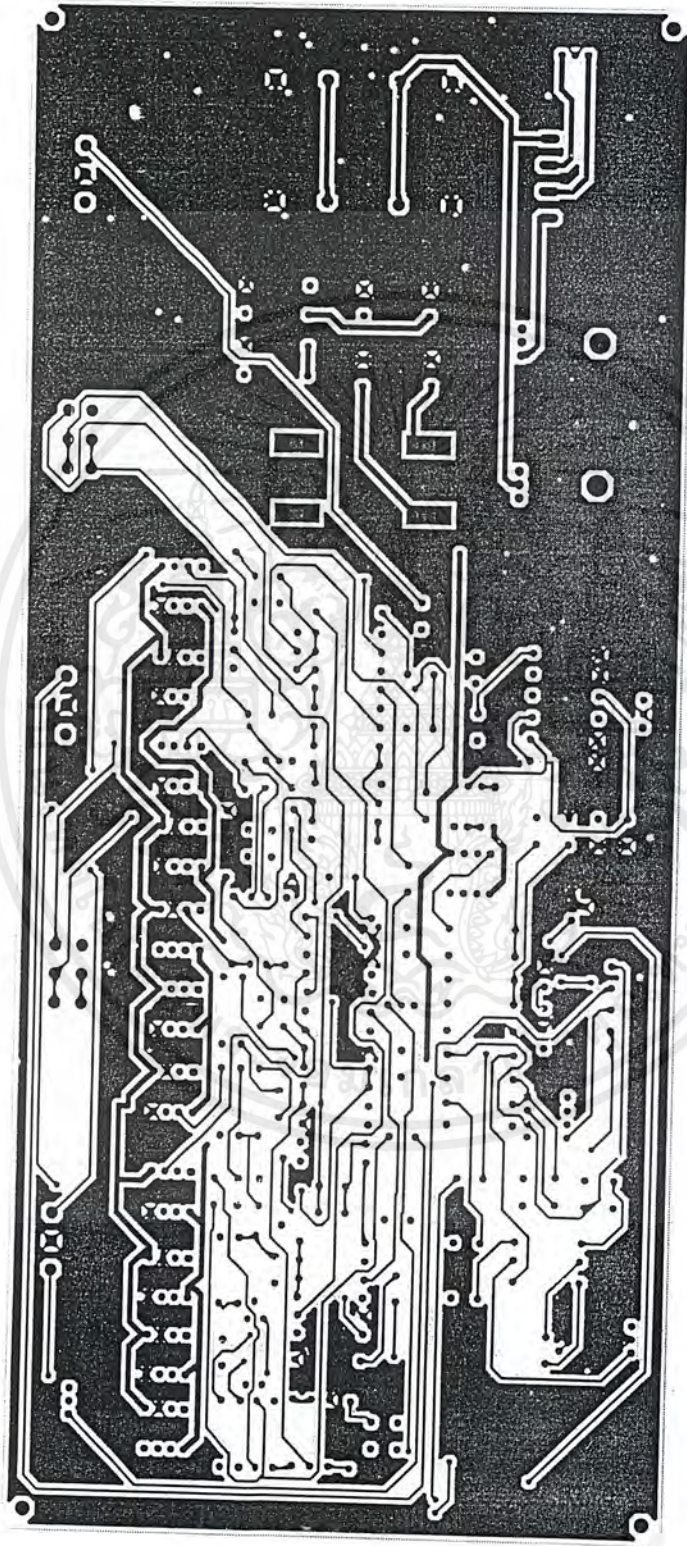


Title	Size	Number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 วิชาการใดๆ พงษ์สัน อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางโรงเรียนนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เกิดจากความร่วมมือร่วมใจของผู้จัดทำ โดยได้รับคำแนะนำ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ จากอาจารย์พลศาสตร์ เติศประเสริฐ อีกทั้ง อาจารย์อีกหลาย ๆ ท่านในภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึง น้องหมวย น้องอ้อ น้องพร น้องกฤษ น้องเต๋า และน้องเจี๊ยบ ที่ช่วยเหลือด้านงานพิมพ์ ดา และ ปัท ที่คอยสร้างกำลังใจให้เสมอมา ขอขอบคุณ พี่แก๊ง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการมาตลอด

ท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสาทวิชาให้ความรู้ต่างๆจนสามารถทำโครงการนี้ได้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่กับสิ่งที่ท่านได้กระทำในทุกๆสิ่ง ทุกๆอย่าง

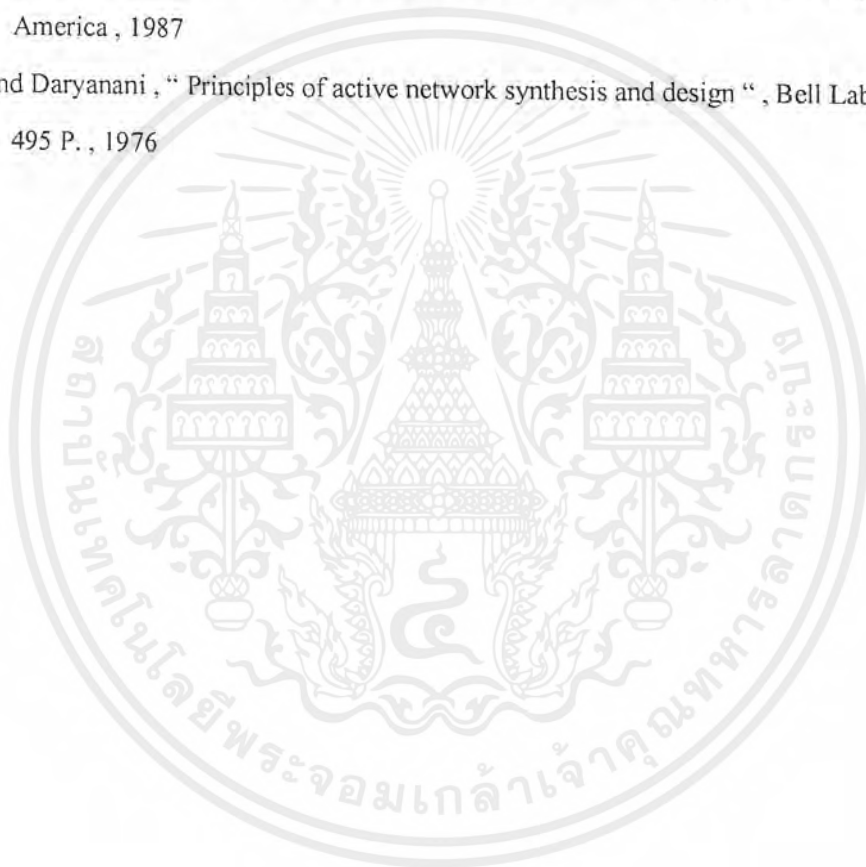
ผู้จัดทำ

16 มีนาคม 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. บุญชัย กิ่งรุ่งเพชร , “คู่มือ Protel 99 “ , แอครา เอ็นจิเนียริง , 322 หน้า , 2543
2. Adel S. Sedra & Kenneth C. Smith , “ Microelectronic circuit “ , Oxford University , 1237 P. , 1998
3. Gary Davis & Ralph Jones , “ The sound Reinforcement handbook “ , Yamaha Coporation of America , 1987
4. Gobind Daryanani , “ Principles of active network synthesis and design “ , Bell Laboratories , 495 P. , 1976



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้