

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรแอกทีฟออดิโออีควอลไลเซอร์
ON DESIGN OF ACTIVE AUDIO EQUALIZERS



นายวรเทพ หนูชู
นายวรุตม์ เบนอารีย์
นางสาวสมสุดา เกิดศิษฐ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 86753
วัน,เดือน,ปี 14 ส.ค. 2552

b..... 10000-100
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การออกแบบวงจรแอกทีฟเอคิไออีควอไลเซอร์

On Design of Active Audio Equalizers

ชื่อนักศึกษา นายวรเทพ หนูชู
นายวรุฒม์ เบนอารีย์
นางสาวสมสุดา เกศศิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กนก เจนจิระพงษ์เวช
ภาควิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2540

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
นับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรแอกทีฟออคโตอ็อกวอลิเซอร์

โดย	นายวรเทพ	หนูชู
	นายวรุศม์	เบนอารีย์
	นางสาวสมสุดา	เกิดศิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงษ์เวช
ปีการศึกษา	2540	

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอวิธีการออกแบบ วงจรมิเนมอล แอกทีฟ อาร์ซี วารีเอเบิล อ็อกวอลิเซอร์ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของ โบควารีเอเบิล อ็อกวอลิเซอร์ วงจรดังกล่าวจะนำมาใช้ปรับเสียงทุ้มแหลมซึ่งตัวอ็อกวอลิเซอร์สามารถชอยความถี่ได้ละเอียด ดังนั้นจึงสามารถบูสท์หรือคัตความถี่ได้ในช่วงแคบๆทำให้สามารถปรับสมดุลของเสียงได้ใกล้เคียงความต้องการมากขึ้น ซึ่งวงจรที่ออกแบบนี้สามารถปรับเพื่อยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดที่ ± 10 dB ด้วยวงจร RC และ ออปแอมป์ เพียง 1 ตัว

การทดสอบวงจรอ็อกวอลิเซอร์ ดังกล่าวได้นำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า คือ Pspice มาช่วยในการจำลองผลการทดลอง ซึ่งจากการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์วงจร โดยใช้ โปรแกรม Pspice

ON DESIGN OF ACTIVE AUDIO EQUALIZERS

By Mr. Worathcp Noochoo
 Mr. Warut Benaree
 Miss Somsuda Kirddit
Advisor Assoc.Prof.Dr. Kanok Janejirapongvate
Year 1997

ABSTRACT

This project describes the method of design minimally active RC variable equalizers by using basic Bode variable equalizers basis for Audio Bass and Treble Tones. This type of equalizers have the step response to dominate the Bass or Treble tone. Therefore its can be adjusted to increase or decrease the relative tone amplitude at ± 10 dB. The circuits consist of RC components and a single operational amplifier with selective switch

The Pspice is utilized to simulate the response of both Bass and Treble response. It is shown that the simulation results are quite agree with experimental results

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ พ่อแม่และบุคคลใกล้ชิดเป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนการศึกษา และ ให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชา การตลอดไปจนถึงการให้ข้อคิดและคำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างมากต่อปริญญาบัตรเล่มนี้ ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรมตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายวเทพ หนูชู
นายวรุฒม์ เบนอารีย์
นางสาวสมสุดา เกิดศิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	A-1
Abstract	A-2
สารบัญ	A-3
สารบัญรูป	A-5
สารบัญตาราง	A-8
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 วัตถุประสงค์ของปริิณยานิพนธ์	2
1.2 เนื้อหาของปริิณยานิพนธ์	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริิณยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป	
2.1 ทฤษฎีของโบค (Bode)	4
2.2 ทฤษฎีการสร้างวงจรจากเน็ตเวิร์คฟังก์ชัน	17
2.3 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับอิกควอไลเซอร์	28
บทที่ 3 การออกแบบวงจรอิกควอไลเซอร์สำหรับออดิโอ	
3.1 การวิเคราะห์สมการอันดับหนึ่ง (First Order)	31
3.2 การวิเคราะห์สมการอันดับสอง (Second Order)	38
3.3 การออกแบบวงจรใช้งานจริงอันดับหนึ่ง (First Order)	43
3.4 การออกแบบวงจรใช้งานจริงอันดับสอง (Second Order)	59
บทที่ 4 การจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	
4.1 การจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice	62
4.1.1 การจำลองการทำงานของวงจรอันดับหนึ่ง (First Order)	62
4.1.2 การจำลองการทำงานของวงจรอันดับสอง (Second Order)	71
4.2 การจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB	72
บทที่ 5 การทดลองและการทดสอบการทำงานของวงจร	
5.1 การทดลองวัดสัญญาณของวงจรอันดับหนึ่ง	76
5.1.1 การวัดสัญญาณของวงจรจากเครื่องออดิโอ อานาไลเซอร์	79
5.1.2 การวัดสัญญาณของวงจรจาก ออสซิลโลสโคป	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองกับกราฟ จากโปรแกรม Pspice ของวงจรอันดับหนึ่ง	91
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ กิตติกรรมประกาศ เอกสารอ้างอิง ภาคผนวก	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1.1 แสดง Bode Plot ของค่าคงที่ K ทั้งขนาดและ Phase ในกระดาษ semilog	6
รูปที่ 2.1.2 เป็นการ Plot ขนาดและเฟสของฟังก์ชัน $(j\omega)^{\pm p}$ เมื่อ p มีค่าคงที่	8
รูปที่ 2.1.3 แสดงขนาดต่อความถี่ของ โป้คพลีต สำหรับ $G(s)=1/(1+Ts)$	10
รูปที่ 2.1.4 เฟสต่อความถี่ของ โป้คพลีต สำหรับ $G(s)=1+Ts$ และ $G(s)=1/(1+Ts)$	12
รูปที่ 2.1.5 ขนาดต่อความถี่ของ โป้คพลีต ของ $G(s)=1/[1+2\zeta(S/\omega_n)+(S/\omega)^2]$	14
รูปที่ 2.1.6 ค่าผิดพลาดของขนาดต่อความถี่ของ โป้คพลีตของ $G(s)=1/[1+2\zeta(S/\omega_n)+(S/\omega)^2]$	15
รูปที่ 2.1.7 เฟสต่อความถี่ของ โป้คพลีต สำหรับ $G(s)=1/[1+2\zeta(S/\omega_n)+(S/\omega)^2]$	16
รูปที่ 2.1.8 โป้คพลีต สำหรับ $G(s)=[10/(S+10)]/[S(S+2)(S+5)]$	17
รูปที่ 2.2.1 แสดงการคาดเดาเสถียรของทรานเฟอร์ฟังก์ชัน	18
รูปที่ 2.2.2 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์	19
รูปที่ 2.2.3 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ที่สมบูรณ์	19
รูปที่ 2.2.4 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ที่สมบูรณ์แบบที่ 2	20
รูปที่ 2.2.5 แสดงวงจรนอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์	21
รูปที่ 2.2.6 แสดงวงจรนอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ที่สมบูรณ์แบบที่ 1	22
รูปที่ 2.2.7 แสดงวงจรนอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ที่สมบูรณ์แบบที่ 2	23
รูปที่ 2.2.8 แสดงวงจรซิงเกิ้ลแอมพลิฟายเออร์แบบวันพอร์ต	23
รูปที่ 2.2.9 แสดงวงจรทูแอมพลิฟายเออร์	26
รูปที่ 2.3.1 เป็นวงจรปรับทูนแบบทั่วไปและกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด	29
รูปที่ 2.3.2 เป็นวงจรปรับทูนแบบลดเสียงทูน ได้มากและกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด	29
รูปที่ 2.3.3 แสดงคุณสมบัติการปรับเสียงทูนแหลมของอ็อกวอไลเซอร์แบบแอกทีฟ	30
รูปที่ 3.1.1 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1	31
รูปที่ 3.1.2 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 2	34
รูปที่ 3.1.3 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1	35
รูปที่ 3.1.4 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 2	37
รูปที่ 3.2.1 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ(3.2.2)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2.2 แสดงกราฟการตอบสนองของสมการ(3.2.3)	41
รูปที่ 3.2.3 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ(3.2.4)	42
รูปที่ 3.2.4 แสดงกราฟการตอบสนองของสมการ(3.2.5)	43
รูปที่ 3.3.1 แสดงวงจรปรับเสียงแหลม	44
รูปที่ 3.3.2 แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรปรับเสียงแหลม	44
รูปที่ 3.3.3 (a) แสดงวงจรใช้งานก่อนสเกล	48
รูปที่ 3.3.3 (b) แสดงวงจรใช้งานหลังสเกล	48
รูปที่ 3.3.4 แสดงวงจรปรับเสียงทุ้ม	51
รูปที่ 3.3.5 แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรปรับเสียงทุ้ม	52
รูปที่ 3.3.6 แสดงวงจรใช้งานก่อนสเกล	55
รูปที่ 3.3.7 แสดงวงจรใช้งานหลังสเกล	56
รูปที่ 3.4.1 แสดงวงจรที่ได้จากการคำนวณ	61
รูปที่ 4.1.1.1 แสดงวงจรเสียงแหลมที่ใช้ในการทดลอง	62
รูปที่ 4.1.1.2 แสดงวงจรเสียงทุ้มที่ใช้ในการทดลอง	63
รูปที่ 4.1.1.3 แสดงวงจรเสียงแหลมเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1 และ 2	64
รูปที่ 4.1.1.4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงแหลมเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1 และ 2	64
รูปที่ 4.1.1.5 แสดงวงจรเสียงทุ้มเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1 และ 2	65
รูปที่ 4.1.1.4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงทุ้มเมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1 และ 2	65
รูปที่ 4.1.2.1 แสดงวงจรอันดับสองทางด้านเสียงทุ้ม	66
รูปที่ 4.1.2.2 แสดงกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงทุ้ม	67
รูปที่ 4.1.2.3 แสดงวงจรอันดับสองทางด้านเสียงแหลม	68
รูปที่ 4.1.2.4 แสดงกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงแหลม	69
รูปที่ 4.1.2.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างวงจรอันดับหนึ่งและอันดับ 2	70
รูปที่ 4.2.1 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงแหลมที่ ± 10 dB (order 1)	73
รูปที่ 4.2.2 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงทุ้มที่ ± 10 dB (order 1)	73
รูปที่ 4.2.3 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงแหลมที่ ± 10 dB (order 2)	74
รูปที่ 4.2.4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงทุ้มที่ ± 10 dB (order 2)	74
รูปที่ 4.2.5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงแหลมเปรียบเทียบระหว่าง order 1 และ order 2	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2.5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และขนาดของเสียงทุ้มเปรียบเทียบระหว่าง order 1 และ order 2	75
รูปที่ 5.1.1 แสดงวงจรเสียงทุ้มช่วงสัญญาณบู้ท	76
รูปที่ 5.1.2 แสดงวงจรเสียงทุ้มช่วงสัญญาณคัท	76
รูปที่ 5.1.3 แสดงวงจรเสียงช่วงสัญญาณบู้ท	77
รูปที่ 5.1.4 แสดงวงจรเสียงแหลมช่วงสัญญาณคัท	77
รูปที่ 5.1.7 แสดงการทดลองต่อวงจรเข้ากับเครื่องออดิโอโฮนาไลเซอร์	78
รูปที่ 5.1.1 แสดงกราฟและตารางที่ได้จากเสียงทุ้มช่วงบู้ท	79
รูปที่ 5.1.2 แสดงกราฟของเสียงทุ้มช่วงคัท	80
รูปที่ 5.1.3 แสดงตารางของเสียงทุ้มช่วงคัท	80
รูปที่ 5.1.4 แสดงกราฟที่ได้จากวงจรอิควอไลเซอร์ด้านเสียงทุ้มช่วงบู้ท	81
รูปที่ 5.1.5 แสดงกราฟที่ได้จากวงจรอิควอไลเซอร์ด้านเสียงทุ้มช่วงคัท	81
รูปที่ 5.1.6 แสดงกราฟของเสียงทุ้มช่วงบู้ท	82
รูปที่ 5.1.7 แสดงตารางของเสียงทุ้มช่วงบู้ท	82
รูปที่ 5.1.8 แสดงกราฟของเสียงทุ้มช่วงคัท	83
รูปที่ 5.1.9 แสดงตารางของเสียงทุ้มช่วงคัท	83
รูปที่ 5.1.10 แสดงกราฟที่ได้จากวงจรอิควอไลเซอร์ด้านเสียงทุ้ม	85
รูปที่ 5.1.11 แสดงกราฟที่ได้จากวงจรอิควอไลเซอร์ด้านเสียงแหลม	85
รูปที่ 5.1.12 แสดงกราฟที่ได้จากวงจรอิควอไลเซอร์ด้านเสียงทุ้มและเสียงแหลม	86
รูปที่ 5.2.1 แสดงการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองและกราฟที่ได้จาก โปรแกรม Pspice ด้านเสียงทุ้ม	92
รูปที่ 5.2.2 แสดงการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองและกราฟที่ได้จาก โปรแกรม Pspice ด้านเสียงแหลม	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันใดๆที่มีอันดับ 1	10
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบขนาดที่แท้จริงของขนาดที่หาได้โดยประมาณ ณ ที่ความถี่ต่างๆ	11
ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงทุ้มช่วงวีทสัญญาณ	87
ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงทุ้มช่วงกัทสัญญาณ	87
ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงแหลมช่วงวีทสัญญาณ	89
ตารางที่ 5.4 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงแหลมช่วงกัทสัญญาณ	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

โดยปกติแล้วย่านความถี่ของเสียงดนตรีจะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 15 ถึง 20,000 Hz แต่อย่างไรก็ตามระบบสเตอริโอจะมีช่วงกว้างความถี่จาก 50 ถึง 15,000 Hz สำหรับการใช้กับดนตรี เสียงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ (Air Pressure) ต่อค่าเฉลี่ยของความดันอากาศปกติ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศ ความถี่ในย่านการเปลี่ยนแปลงนี้เริ่มจาก 1 Hz ถึงหลายๆ รัยอกลิโธเฮริท แต่หูของมนุษย์สามารถรับเสียงได้ดีจาก 16 Hz ถึง 16 KHz โดยประมาณเท่านั้น กำลังเสียงของวงดนตรีจะมีหน่วยตั้งแต่ไมโครวัตต์ (เสียงที่แผ่วเบา) จนกระทั่งเป็นหลายๆ วัตต์ (เสียงที่ดังมากๆ) กำลังเสียงพูดของคนโดยทั่วๆ ไปจะมีหน่วยเป็นไมโครวัตต์ (เมื่อกระซิบ) จนกระทั่งเป็นมิลลิวัตต์ (เมื่อตะโกน) อย่างไรก็ตามความดังซึ่งเกิดจากความเข้มของเสียงสำหรับผู้ฟังนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของห้อง จุดที่ฟังและลำโพงด้วย ดังนั้นเสียงที่เกิดขึ้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีความดังเท่ากับเสียงเดิม เช่นในการสนทนาทางโทรศัพท์ ที่ฟังก็จะอยู่ใกล้หู สิ่งสำคัญก็คืออัตราส่วนกำลัง (Power Ratio) เสียงทางด้านพูดกับด้านฟังต้องเท่ากัน เช่น ทางส่งมีช่วงกำลังระหว่าง 1 mW ถึง 10 mW ทางด้านฟังก็ต้องมีอัตราส่วนกำลัง $10^1:1$ ด้วย ถึงแม้กำลังที่ออกมาจะมีเพียง 10 μ W ถึง 100mW ก็ตาม

ในระบบเครื่องเสียงที่อุปกรณ์ทุกชนิดมีความสมบูรณ์แล้ว เราไม่ต้องอาศัยอีควอไลเซอร์เลย แต่เป็นการยากมากที่ระบบเครื่องเสียงจะสมบูรณ์ได้ ถึงแม้ระบบจะสมบูรณ์จริง แต่โอกาสที่จะพบกับการบันทึกแผ่นเสียงไม่ได้มาตรฐานก็ยังมียู่ ดังนั้นอย่างไรก็ตามอีควอไลเซอร์ยังจำเป็นต้องใช้อยู่ ผลการบูสท์และคัท ความถี่ของอีควอไลเซอร์โดยทั่วไปจะเห็นว่าเสียงแหลมและเสียงทุ้มจะถูกยกขึ้นและขกกลงในช่วง ± 10 dB ซึ่งตัวอีควอไลเซอร์สามารถขอยความถี่ได้ละเอียดดังนั้นจึงสามารถบูสท์ หรือ คัทความถี่ได้ในช่วงแคบๆ ทำให้สามารถปรับความสมดุลของเสียงได้ใกล้เคียงความต้องการมากขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ปัญญาณิพนธ์เล่มนี้ได้นำทฤษฎีของโคมมาใช้ในการออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์ ซึ่งสามารถยกหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดโดยใช้ โปด วาเรียเบิล อีควอไลเซอร์ (Bode variable equalizers) ซึ่งสามารถปรับระดับเสียงทุ้มเสียงแหลม โดยวงจรที่ออกแบบจะเป็นวงจรประเภทแบบแอคทีฟที่ใช้โอปติเม็นต์ตัวด้านทาน , ตัวเก็บประจุร่วมกับออปแอมป์ เพื่อใช้ในการปรับเสียงทุ้มเสียงแหลมโดยนำโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า Pspice มาช่วยในการจำลองการทำงานของวงจร

1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางคณิตศาสตร์ และนำมาประยุกต์ใช้งานกับอควอไลเซอร์เพื่อใช้ปรับเสียง ทุ่มเสียงแหลม
2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์โดยใช้ แอ็กทิฟ อาซี วารีอเบิล อีควอไลเซอร์ (active RC variable equalizer)
3. เพื่อศึกษาการจำลองการทำงาน (Simulate) ของวงจรด้วยซอฟต์แวร์ โดยการใส่โปรแกรม Pspice และ MATLAB
4. เพื่อออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับปรับเสียงทุ่มเสียงแหลมในระบบเครื่องเสียง
5. สามารถใช้เครื่อง ออดิโอ อานาไลเซอร์ (Audio Analyzer) ในการวิเคราะห์และแสดงผลการทดลองออกมาเป็นกราฟได้

1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ นำทฤษฎีของวารีอเบิล อีควอไลเซอร์ มาใช้ในการออกแบบวงจรการปรับเพียกกระดืบ หรือลดระดับทางขนาดเพื่อปรับเสียงทุ่ม (ในช่วงความถี่ต่ำ) และปรับเสียงแหลม (ในช่วง ความถี่สูง) ซึ่งเนื้อหาของปริญญานิพนธ์ในแต่ละบทมีรายละเอียดดังนี้

ในบทที่ 2 กล่าวถึงผลตงสนองทางทฤษฎีของเน็ทเวิร์คฟังก์ชัน ทฤษฎีของ Bode และนอกจากนี้ ยังกล่าวถึงทฤษฎีการสร้างวงจรจากสมการ และรูปแบบสัญญาณตามลักษณะของวงจร

ในบทที่ 3 เป็นการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์ โดยจะทำการวิเคราะห์สมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ใน first order และ second order รวมไปถึงการพิสูจน์หาค่า component ต่างๆ ของวงจร

ในบทที่ 4 เป็นการนำวงจรที่ออกแบบมาทำการจำลองการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ Pspice และ Madab ก่อนการทดลองจริงเพื่อดูผลการทำงานของวงจร ว่าวงจรที่ได้ออกแบบจะสามารถนำมาใช้งานจริงตามทฤษฎีหรือไม่

ในบทที่ 5 เป็นการทดลองจริงโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองวัดผลตงสนองทางขนาดต่อความถี่ของวงจร first order และ seconder ซึ่งได้ทำการจำลองการทำงานด้วยซอฟต์แวร์แล้วและแสดงผลการทดลองด้วย เครื่องออดิโอ อานาไลเซอร์

ในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะสรุปผลการทดลองและวิจารณ์ถึงข้อดีและข้อเสียของการออกแบบวงจรและการทดลองทั้งหมด เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกเป็นรายละเอียดของข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรลักษณะ สรุปลักษณะเฉพาะของวงจร RC (RC Characteristic) รูปแบบต่างๆ ลายวงจรต่างๆ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริณยานิพนธ์

- 1.สามารถนำทฤษฎี active RC variable equalizer มาใช้พัฒนาการปรับเสียงทุ้มเสียงแหลมในระบบเครื่องเสียง
- 2.สามารถออกแบบวงจรอิกวอลไลเซอร์ที่สามารถยกหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดที่ย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ตามต้องการ
- 3.สามารถนำวงจรที่ออกแบบไปใช้ในการพัฒนาการปรับเสียงทุ้มเสียงแหลมในระบบเครื่องเสียง
- 4.เกิดทักษะในการออกแบบวงจรและแก้ไขปัญหา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหรือประยุกต์ในงานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป

2.1 ทฤษฎีของโบด (BODE PLOT)

Bode plot เป็นการ plot ของ transfer function $G(j\omega)$ ด้วยกราฟ 2 กราฟ กราฟแรกเป็นการ plot ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลต่อ ω หรือ $\log \omega$ ส่วนอีกกราฟหนึ่งเป็นการ plot ของ phase ของ $G(j\omega)$ ในหน่วยองศาต่อ ω หรือ $\log \omega$ เช่นกัน Bode plot นี้บางครั้งจะเรียกว่า corner plot หรือ logarithmic plot ที่เรียกว่า corner plot เพราะว่าโดยทั่วไปแล้ว Bode plot จะเป็นวิธีการ plot ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลโดยการประมาณด้วยเส้นตรงเป็นช่วงๆ

ตามปกติ Bode plot จะมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากขนาดของ $G(j\omega)$ ใน Bode plot จะแสดงในหน่วยของเดซิเบล ดังนั้นผลคูณและผลหารของตัวประกอบต่างๆใน transfer function $G(j\omega)$ ก็จะเป็นผลบวกและผลลบในหน่วยเดซิเบลตามลำดับสำหรับความสัมพันธ์ของ phase ก็จะเป็นการบวกและลบเช่นเดียวกันการ plot ขนาดของ Bode plot สำหรับ transfer function $G(j\omega)$ ส่วนมากที่พบอยู่ในระบบควบคุมจะถูกประมาณด้วยเส้นตรง ทำให้การสร้าง Bode plot ง่ายขึ้นมาก

โดยทั่วไป เราจะแทน open-loop transfer function ของระบบควบคุมป้อนกลับที่ไม่มี pure time delay ด้วยสมการดังนี้

$$G(s) = \frac{K(s + Z_1)(s + Z_2) \dots (s + Z_m)}{S^l (s + P_1)(s + P_2) \dots (s + P_n)} \quad (2.1.1)$$

โดยที่ K = ค่าคงที่จริง

Z 'S , P 'S = ค่าจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน (complex number) หรือเราอาจจะเขียน open-loop transfer function อยู่ในรูป

$$G(s) = \frac{K(1 + T_1s)(1 + T_2s) \dots (1 + T_ms)}{S^l (1 + Ta_s)(1 + Tb_s) \dots (1 + Tn_s)} \quad (2.1.2)$$

โดยที่ K = ค่าคงที่จริง

T 'S = ค่าจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุมด้วยวิธีการของ Bode plot นั้น เรานิยมทำ transfer function ให้อยู่ในรูปของสมการ (2.1.2) เพื่อเป็นการอธิบายถึงการสร้าง Bode plot เราจะสมมุติ transfer function ดังนี้

$$G(S) = \frac{K(1 + T1S)(1 + T2S)}{S(1 + TaS)(1 + j2u\zeta - u^2)} \quad (2.1.3)$$

โดยที่ K, T_1, T_2, T_a, ζ และ u เป็นสัมประสิทธิ์ค่าจริง และสมมติให้เทอม $1 + j2\zeta u - u^2$ ที่มี $u = \frac{\omega}{\omega_n}$ มี complex conjugate zeros.

ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลหาได้โดยการคูณ $\log_{10}|G(j\omega)|$ ด้วย 20 นั่นคือ สำหรับ phase ของ $G(j\omega)$ คือ

$$\begin{aligned} |G(j\omega)|_{dB} &= 20 \log_{10}|G(j\omega)| \\ &= 20 \log_{10} K + 20 \log_{10}|1 + j\omega T1| + 20 \log_{10}|1 + j\omega T2| \\ &\quad - 20 \log_{10}|j\omega| - 20 \log_{10}|1 + j\omega T_a| \\ &\quad - 20 \log_{10}|1 + j2\zeta u - u^2| \end{aligned}$$

สำหรับ เฟสของ $G(j\omega)$ คือ

$$\begin{aligned} \angle G(j\omega) &= \angle K + \angle(1 + j\omega T1) + \angle(1 + j\omega T2) - \angle j\omega - \angle(1 + j\omega T_a) \\ &\quad - \angle(1 + j2\zeta u - u^2) \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

โดยทั่วไปฟังก์ชันของ $G(j\omega)$ อาจจะมีอันดับสูงกว่าสมการ(2.1.3) และอาจจะมีตัวประกอบมากกว่าก็ได้ แต่สมการ(2.1.4)สมการ(2.1.5)จะแสดงถึงการรวมเทอมต่างๆของ $G(j\omega)$ แต่ละเทอมเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการเบื้องต้นในการสร้าง โปด พล็อต สำหรับทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน แต่ละแบบก็จะเหมือนกัน โดยทั่วไปแล้ว transfer function $G(j\omega)$ จะประกอบไปด้วยตัวประกอบ 4 แบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวประกอบคงที่ K
 2. poles หรือ zeros ที่จุด origin $(j\omega)^{\pm p}$
 3. poles หรือ zeros ที่ตำแหน่งต่างๆ $(1+j\omega T)^{\pm q}$
 4. poles หรือ zeros เชิงซ้อน $(1+j2u\zeta-u^2)^{\pm r}$
- โดยที่ p , q และ r เป็นค่าบวกจำนวนเต็ม

ดังนั้นโบดพล็อต (Bode plot) สำหรับขนาดและเฟส ของสมการ(2.1.4) และสมการ (2.1.5) สมการทำได้โดยการพล็อต ส่วนประกอบแต่ละส่วนก่อนแล้วจึงนำมาบวกหรือลบกันตามสมการ การพล็อตของโบดนี้ จะทำการพล็อตลงในกระดาษ semilog หรือกระดาษแบบ rectangular coordinate เข็มสั้น

ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงการสร้างโบดพล็อต ของตัวประกอบทั้ง 4 แบบ

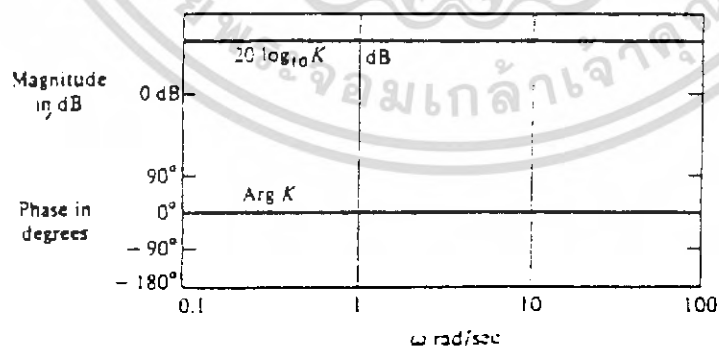
2.1.1 ตัวประกอบค่าคงที่ K

สำหรับค่าคงที่ K จะได้ว่า

$$K \text{ dB} = 20 \log_{10} K = \text{ค่าคงที่} \quad (2.1.6)$$

และ

$$\begin{aligned} \angle K &= 0^\circ & K > 0 \\ &= 180^\circ & K < 0 \end{aligned} \quad (2.1.7)$$



รูป 2.1.1 แสดงถึง Bode plot ของค่าคงที่ K ทั้งขนาดและ phase ในกระดาษ semilog

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 Poles หรือ Zeros ที่จุด origin ($j\omega$)^{±p}

ขนาดของ $(j\omega)^{\pm p}$ ในหน่วยเดซิเบล คือ

$$20 \log_{10} |(j\omega)^{\pm p}| = \pm 20P \log_{10} \omega \quad \text{dB} \quad (2.1.8)$$

โดยที่ ω มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 สมการ (2.1.9) จะเป็นสมการเส้นตรงไม่ว่าจะ plot อยู่ใน semilog หรือใน rectangular coordinate ความชัน (slope) ของเส้นตรงนี้หาได้โดยการหาค่าอนุพันธ์ของสมการ (2.1.9) เทียบกับ $\log_{10} \omega$ จะได้

$$\frac{d}{d \log_{10} \omega} (\pm 20P \log_{10} \omega) = \pm 20P \quad \text{dB} \quad (2.1.9)$$

เส้นตรงเหล่านี้จะผ่านจุด 0 dB ที่ $\log_{10} \omega = 0$ (หรือ $\omega = 1$) ฉะนั้นการที่ $\log_{10} \omega$ เปลี่ยนค่าไปหนึ่งหน่วยจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนขนาดไปเป็นจำนวน $\pm 20p$ dB นอกจากนี้ การเปลี่ยนค่าไปหนึ่งหน่วยของ $\log_{10} \omega$ ใน rectangular coordinate จะมีค่าเท่ากับกรณีที่ ω ใน semilog coordinates เปลี่ยนไป 1 decade (หรือ 10 เท่า) เช่น ω เปลี่ยนจาก 1 เป็น 10 หรือ 10 เป็น 100 เป็นต้น ดังนั้นความชันของเส้นตรงในสมการ (2.1.8) จะเป็น $\pm 20p$ dB/decade

นอกจากการใช้ decade บอกความชันของเส้นตรงแล้ว บางครั้งเราก็จะนิยมใช้หน่วย octave ด้วยเช่นเดียวกัน ความหมายของหน่วย octave สามารถอธิบายได้ว่าถ้าความถี่ ω_1 และ ω_2 มีอัตราส่วน $\omega_2/\omega_1 = 2$ แล้ว ความถี่จะห่างกัน 1 octave

จำนวน decade ระหว่างความถี่สองความถี่ ω_1 และ ω_2 สามารถกำหนดได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{decade} = \frac{\log_{10} (\omega_2 / \omega_1)}{\log_{10} 10} = \log_{10} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (2.1.10)$$

ทำนองเดียวกัน จำนวน octave ระหว่าง ω_2 และ ω_1 คือ

$$\text{จำนวน octave} = \frac{\log_{10} (\omega_2 / \omega_1)}{\log_{10} 2} = \frac{1}{0.301} \log_{10} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \quad (2.1.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง octave และ decade คือ

$$\text{จำนวน octave} = \frac{1}{0.301} \text{decade} \quad (2.1.12)$$

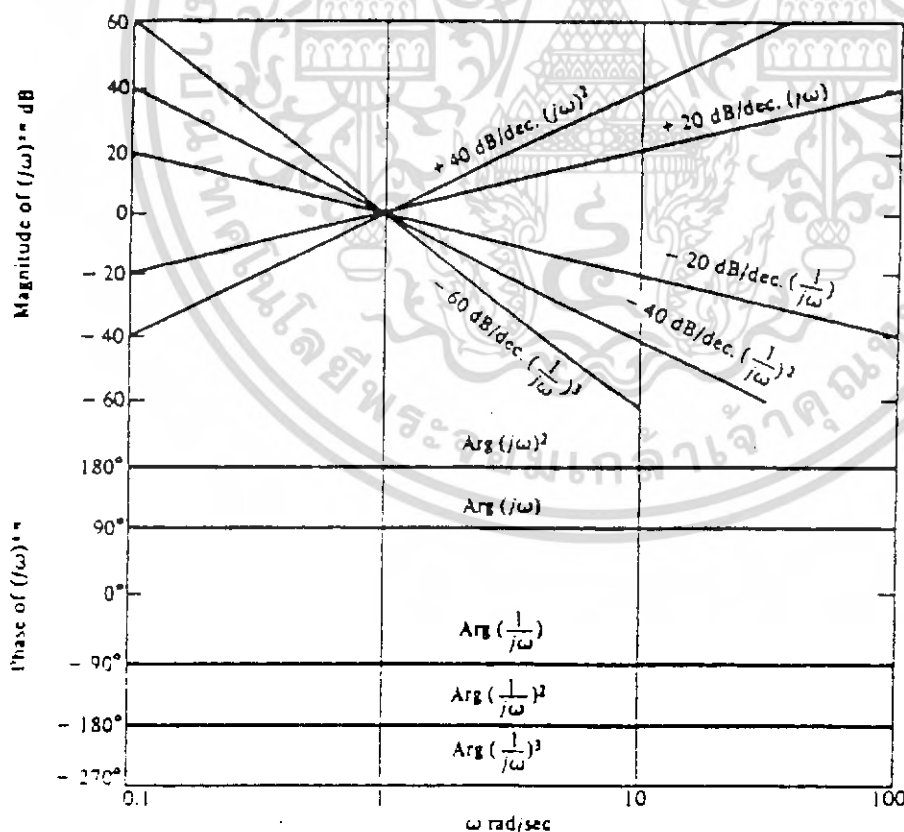
แทนค่าสมการ(2.1.12) ลงในสมการ(2.1.9) จะได้

$$\begin{aligned} \pm 20P \text{ dB/decade} &= \pm 20P * 0.301 \\ &= \pm 6p \text{ dB/octave} \end{aligned} \quad (2.1.13)$$

ตัวอย่างเช่น ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน $G(j\omega)$ ที่มีโพล ที่จุด $s=0$ นั้นขนาดของ $G(j\omega)$ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน -20dB/decade และผ่านแกน 0 dB ที่ $\omega=1$

สำหรับเฟส ของ $(j\omega)^{\pm p}$ นั้นเขียนได้ดังนี้

$$\angle (j\omega)^{\pm p} = \pm p \times 90^\circ \quad (2.1.14)$$



รูป 2.1.2 เป็นการ plot ขนาดและ phase ของฟังก์ชัน $(j\omega)^{\pm p}$ เมื่อ p มีค่าต่างๆกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 Zero ที่ $(1+j\omega T)$

กำหนดให้

$$G(j\omega) = 1+j\omega T \quad (2.1.15)$$

โดยที่ T เป็นค่าคงที่จริง

ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลคือ

$$|G(j\omega)| \text{ dB} = 20\log_{10}|G(j\omega)| = 20\log_{10}\sqrt{1+(\omega T)^2} \quad (2.1.16)$$

การที่จะหาขนาดของ $G(j\omega)$ โดยการประมาณแบบ asymptotic นั้นเราจะพิจารณาเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ ω มีค่ามากและกรณีที่ ω มีค่าน้อย ที่ความถี่ต่ำมากๆ $\omega T \ll 1$ ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลโดยประมาณจะมีค่าดังนี้

$$|G(j\omega)| \text{ dB} = 20\log_{10}1 = 0 \text{ dB} \quad (2.1.17)$$

โดยที่ $(\omega T)^2$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1 จึงตัดทิ้งได้

ที่ความถี่สูงๆ $\omega T \gg 1$ เทอม $1+(\omega T)^2$ จะถูกประมาณค่าเป็น $(\omega T)^2$ ดังนั้นสมการ(2.1.16) จะกลายเป็น

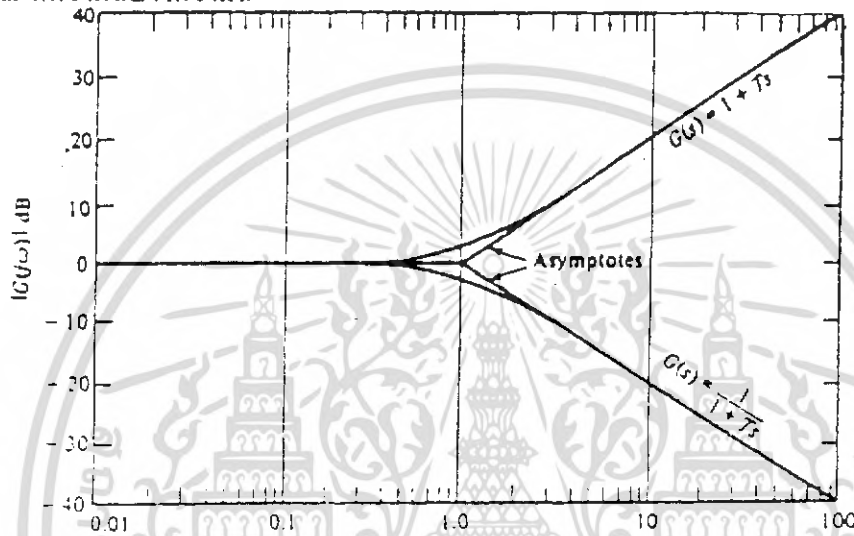
$$\begin{aligned} |G(j\omega)| \text{ dB} &= 20\log_{10}|G(j\omega)| = 20\log_{10}\sqrt{(\omega T)^2} \\ &= 20\log_{10}\omega T \end{aligned} \quad (2.1.18)$$

สมการ (2.1.18)เป็นสมการเส้นตรงที่มีความชันเป็น $+ 20\text{dB/decade}$ จุดตัดของเส้นตรงนี้กับแกน 0-dBทำได้โดยการให้สมการ (2.1.18) มีค่าเท่ากับ 0จะได้

$$\begin{aligned} 20\log_{10}\omega T &= 0 \\ \omega T &= 1 \\ \omega &= 1/T \end{aligned} \quad (2.1.19)$$

ดังนั้น ที่ความถี่ ω ที่ทำได้จากสมการ (2.1.19)นี้จะเป็จุดตัดของเส้นตรงที่ได้จากการ plot ขนาดของ $G(j\omega)$ โดยประมาณที่ความถี่สูง กับขนาดของ $G(j\omega)$ โดยประมาณที่ความถี่ต่ำซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเส้นตรงที่ 0dB ความถี่ที่กำหนดโดยสมการ(2.1.19)นี้จะมีชื่อว่า corner frequency ของ Bode plot สำหรับ transfer function ในสมการ(2.1.15) ที่มีชื่อว่า corner frequency ก็เพราะว่าการ plot ขนาดโดยประมาณของ $G(j\omega)$ นั้นมาเกิดการหักมุมที่ความถี่นี้ รูป 2.3 แสดงถึงขนาดโดยประมาณของ $G(j\omega)$ เทียบกับเส้นโค้งของขนาดที่แท้จริงซึ่งมีลักษณะเรียบ จะเห็นได้ว่าค่าจริงกับค่าโดยประมาณนั้นต่างกันเพียงเล็กน้อย ตาราง 2.1 แสดงถึงค่าขนาดที่แท้จริงของฟังก์ชัน $1+j\omega T$ ค่ค่า ωT ที่ต่าง ๆ กัน สำหรับตาราง 2.2 จะเป็นตารางเปรียบเทียบถึงขนาดที่แท้จริงขนาดที่หาได้โดยประมาณ ณ ที่ความถี่บางความถี่



รูปที่ 2.1.3 แสดงขนาดต่อความถี่ของ Bode plot สำหรับ $G(s) = 1 + Ts$ และ $G(s) = 1/(1 + Ts)$

ค่าผิดพลาดระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเส้นตรงจะสมมาตรกันที่ corner frequency $1/T$ นอกจากนี้ ที่ corner frequency นั้นค่าผิดพลาดจะมีค่าเท่ากับ 3dBm , ผิดพลาดประมาณ 1 dB ที่ 1 octave เหนือ corner frequency($2/T$) และที่ 1 octave ต่ำกว่า corner frequency($0.5/T$) สำหรับที่ 1 decade เหนือ และต่ำกว่า corner frequency นั้นค่าผิดพลาดจะมีค่าเพียง 0.04 dB เท่านั้น จากข้อเท็จจริงเหล่านี้ เราสามารถสรุปวิธีการ plot ขนาดของตัวประกอบใน transfer function ใดๆที่มีอันดับหนึ่ง ($1+j\omega T$) ได้ดังนี้

ตาราง 2.1

ωT	$\log_{10} \omega T$	$ 1+j\omega T $	$ 1+j\omega T $	
0.01	-2	1.0	0	0.5
0.1	-1	1.005	0.04	5.7
0.5	-0.3	1.12	0.97	26.6
0.76	0.12	1.26	2.0	37.4

1.31	0.117	1.65	4.34	52.7
1.73	.238	2.0	6.02	60.0
2.0	0.3	2.23	6.99	63.4
5.0	0.7	5.1	14.15	78.7
10.0	1.0	10.04	20.04	84.3

ตาราง 2.2

ωT	ค่าจริง	ค่าประมาณโดยเส้นตรง	ค่าผิดพลาด (dB)
	$ 1+j\omega T $ (dB)	$ 1+j\omega T $ (dB)	
0.1	0.04	0	0.04
0.5	0.97	0	0.97
0.76	2.0	0	2.0
1.0	3.01	0	3.01
1.31	4.34	2.34	2.0
2.0	6.99	6.02	0.97
10.0	20.04	20	0.04

1. กำหนดตำแหน่งของ corner frequency ω_{m1}/T

2. ลากเส้นตรงที่มีความชัน 20dB/decade (หรือ 6 dB/octave) และเส้นตรงในแนวนอนที่ 0 dB ให้เส้นตรงทั้งสองตัดกันที่ $\omega=1/T$

3. ในกรณีที่ต้องการหาเส้นโค้งที่แสดงถึงขนาดจริง ให้ใช้ค่าที่คำนวณใช้ในตาราง มา plot

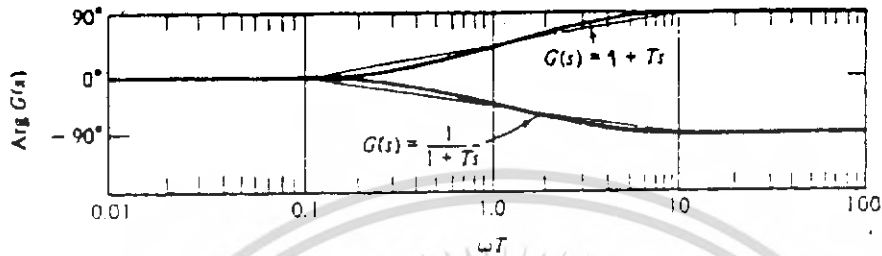
โดยทั่วไป เส้นโค้งที่แสดงค่าจริงของขนาดนั้นสามารถ sketch ได้ง่ายๆ โดยการกำหนดจุด dB ที่ corner frequency และจุด 1dB ที่ 1 octave เหนือและต่ำกว่า corner frequency

สำหรับ phase ของ $G(j\omega) = 1+j\omega T$ คือ

$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1}\omega T$$

ทำนองเดียวกับการกรณีของขนาด เราสามารถใช้การประมาณโดยเส้นตรงแสดงถึง phase ของ $G(j\omega)$ ต่อการเปลี่ยนไปของความถี่ ω ได้ เนื่องจาก phase ของ $G(j\omega)$ จะแปรค่าอยู่ในช่วง 0-การค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90 องศา เราจึงลากเส้นจากตำแหน่ง 0 องศา ที่ 1 decade ต่ำกว่า corner frequency ไปยังตำแหน่ง +90 องศา ที่ 1 decade เหนือ corner frequency ได้ รูป 2.1.4 แสดงถึง phase ของ $G(j\omega)$ ทั้งที่ได้จากการประมาณด้วยเส้นตรงและค่าจริงตาราง 2.1



รูป 2.1.4 Phase ต่อความถี่ของ Bode plot สำหรับ $G(S) = 1 + TS$ และ $G(S) = 1/(1+TS)$

2.1.4 Pole ที่ $1/(1+j\omega T)$

เมื่อ

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T} \quad 2.20$$

ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลจะมีค่าเท่ากับขนาดของ $G(j\omega)$ ในสมการ (2.1.15) แต่จะมีค่าเป็นลบ ทำนองเดียวกัน phase ของ $G(j\omega)$ ก็จะมีค่าเช่นเดียวกับสมการ (2.1.19) แต่เป็นลบ ดังนั้นโดยอาศัยหลักในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีของสมการ (2.1.15) ที่ผ่านมา ขนาดของ $G(j\omega)$ ของสมการ (2.1.20) จะมีค่าดังนี้

$$\omega T \ll 1 \quad ; \quad |G(j\omega)|_{dB} = 0dB \quad 2.1.21$$

$$\omega T \gg 1 \quad ; \quad |G(j\omega)|_{dB} = -20\log_{10}\omega T \quad 2.1.22$$

จะเห็นว่า corner frequency ของ Bode plot ของสมการ (2.1.20) ก็ยังคงอยู่ที่ $\omega = 1/T$ ที่ความถี่สูง, ความชันของเส้นตรงจะมีค่า $-20dB/decade$ สำหรับ phase ของ $G(j\omega)$ จะมีค่า 0 องศา เมื่อ $\omega = 0$ และ -90 องศา เมื่อ ω มีค่าเข้าใกล้ ∞ ขนาดและ phase ของ Bode plot สำหรับสมการ(2.1.20) แสดงในรูป 2.1.3 และรูป 2.1.4 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าของขนาด

และ phase ของ $G(j\omega) = 1/(1+j\omega T)$ ก็จะมีค่าเหมือนกับค่าของขนาดและ Phase ในตาราง 2.1 และ

2.2 เช่นกันเพียงแต่มีเครื่องหมายเป็นลบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 Quadratic poles and zeros

พิจารณา transfer function อันดับสอง

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2.1.23)$$

ในที่นี้เราจะพิจารณาในกรณีของ $\zeta \leq 1$ เท่านั้น เพราะค่าของ ζ ที่นอกเหนือจากนี้จะทำให้ $G(S)$ มี poles ที่เป็นค่าจริง 2 โพล และสามารถหา โบลพล็อต ได้โดยการแยกให้ $G(S)$ เป็นผลคูณของ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน 2 ชุด โดยที่แต่ละชุดประกอบไปด้วย ซิมเปิล โพล (simple pole)

จากสมการ 2.1.23 ถ้าให้ $S = j\omega$ จะได้

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2j\zeta\omega\omega_n + \omega_n^2} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + j2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (2.1.24)$$

ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลคือ

$$20 \log_{10} |G(j\omega)| = -20 \log_{10} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.1.25)$$

ที่ความถี่ต่ำมากๆ $\omega/\omega_n \ll 1$ สมการ (2.1.25) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \cong -20 \log_{10} 1 = 0 \text{ dB} \quad (2.1.26)$$

ดังนั้น การประมาณแบบ asymptote ที่ความถี่ต่ำสำหรับการ plot ขนาดของ $G(j\omega)$ ในสมการ ก็คือเส้นตรงที่อยู่บนแนวแกน 0 dB

ที่ความถี่สูงๆ $\omega/\omega_n \gg 1$ ขนาดของ $G(j\omega)$ ในหน่วยเดซิเบลมีค่า

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \cong -20 \log_{10} \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|G(j\omega)|_{dB} = -40 \log_{10} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \quad dB \quad (2.1.27)$$

สมการนี้เป็นสมการเส้นตรงที่มีความชัน -40dB/decade ในโบด พล็อต โคออดิเนท (Bode plot coordinates) ณ จุดตัดของเส้น asymptote ทั้งสองจะหาได้โดยการกำหนดให้สมการ (2.1.26) เท่ากับสมการ (2.1.27) จะได้ว่า

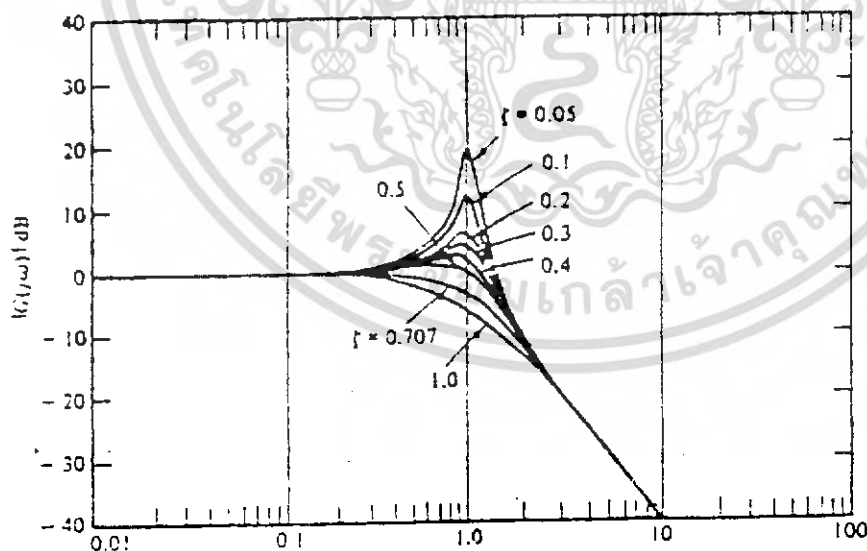
$$-40 \log_{10} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) = 0 \text{ dB} \quad (2.1.28)$$

หรือ

$$\omega = \omega_n \quad (2.1.29)$$

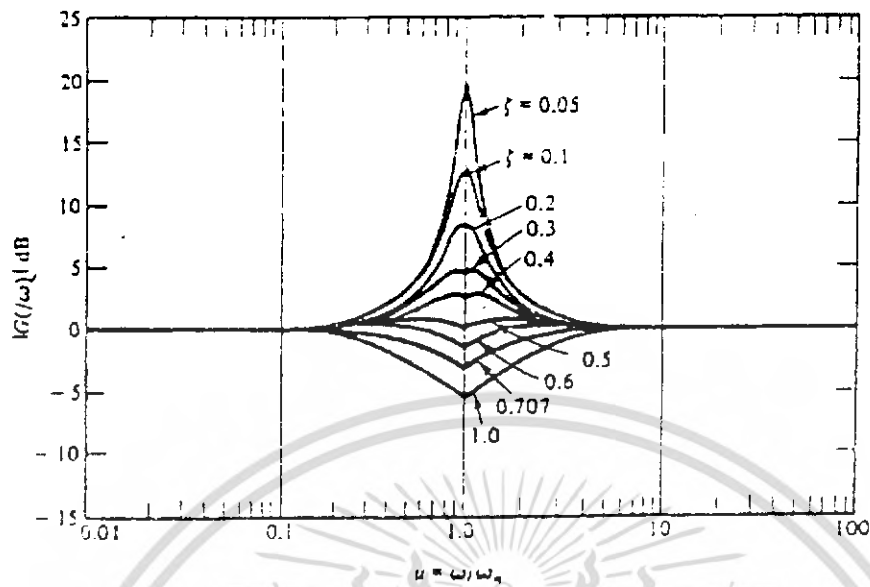
ความถี่ $\omega = \omega_n$ นี้จะเป็น corner frequency ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน อันดับสอง ในสมการ (2.1.24) ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ζ

สำหรับการพล็อตขนาดจริงของ $G(j\omega)$ ในกรณีนี้จะแตกต่างไปจากการประมาณแบบ asymptote ที่เป็นดังนี้เพราะการพล็อตกราฟของขนาดและเฟสของ $G(j\omega)$ ในสมการ (2.1.23) นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของ corner frequency ω_n เพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับค่าของอัตราการหน่วง ζ ด้วย แสดงถึงการ plot ขนาดของ $G(j\omega)$ ที่เป็นค่าจริงและขนาดที่ได้โดยการประมาณแบบ asymptote สำหรับค่าต่างๆของ ζ ค่าเดียวกันจะแสดงในรูป



รูป 2.1.5 ขนาดต่อความถี่ของโบดพล็อต ของ $G(s) = 1/[1+2\zeta(s/\omega_n) + (s/\omega_n)^2]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

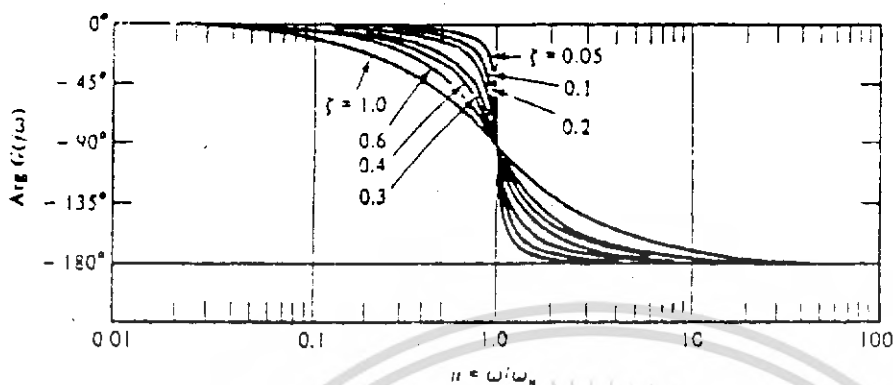


รูป 2.1.6 ค่าผิดพลาดของขนาดต่อความถี่ของโพลีออดของ $G(S) = 1/(1 + 2\zeta(S/\omega_n) + (S/\omega_n)^2)$

ดังนั้น วิธีการทั่วไปในการ plot ขนาดของโพลีออดของ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน อันดับสอง ดังสมการ (2.1.23) ก็คือ ขั้นแรกกำหนด corner frequency ω_n แล้วลากเส้น asymptotes สำหรับ กราฟที่แสดงถึงค่าจริงของขนาดก็อาจจะหาได้น่าผิดพลาดที่ได้จากรูป ไปรวมเข้ากับเส้น asymptotes สำหรับแต่ละค่าของ ζ

เฟสของ $G(j\omega)$ ในสมการ (2.1.23) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1} \left[\frac{2\zeta\omega / \omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] \quad (2.1.30)$$



รูป 2.1.7 เฟสต่อความถี่ของ โบทพล็อต ของ $G(S) = 1/[1 + 2\zeta(S/\omega_n) + (S/\omega_n)^2]$

การวิเคราะห์โดย โบทพล็อต สำหรับ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน อันดับสอง ที่แสดงไว้ในสมการ (2.1.23) นั้นสามารถจะประยุกต์ใช้กับ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน อันดับสอง ที่ประกอบด้วย complex zeros ได้ เช่นถ้า ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน อยู่ในรูป

$$G(S) = 1 + \frac{2S\zeta}{\omega_n} + \frac{1}{\omega_n^2} S^2 \quad (2.1.31)$$

โบทพล็อต สำหรับขนาดและเฟส ของ $G(j\omega)$ ของสมการ (2.1.31) หาได้โดยการกลับเส้นกราฟ ในรูป 2.1.5 รูป 2.1.6 และรูป 2.1.7 ตามลำดับ ตัวอย่าง สร้าง โบทพล็อต ของ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(S) = \frac{10(S+10)}{S(S+2)(S+5)}$$

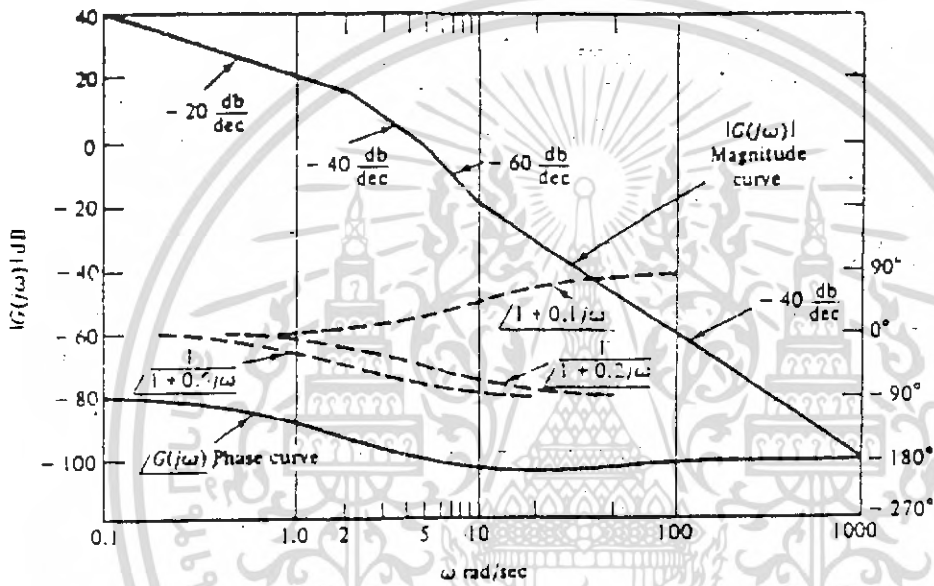
แทน S ด้วย $j\omega$ จะได้

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{10(1+j0.1\omega)}{j\omega(1+j0.5\omega)(1+j0.2\omega)} \\ &= 10 * \frac{1}{j\omega} * \frac{1}{(1+j0.5\omega)} * \frac{1}{(1+j0.2\omega)} * (1+j0.1\omega) \quad (2.1.32) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.1.32) จะเห็นว่า ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน $G(j\omega)$ นี้มี corner frequency ที่ $\omega=2, 5$ และ 10rad/sec ตามลำดับ กราฟของขนาด สำหรับโพล ที่จุดเริ่มต้น จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน -20dB/decade ผ่านจุด $\omega=1\text{ rad/sec}$ บนแกน 0 dB โปดพลีอต์ ของขนาดและเฟส ของ $G(j\omega)$ ในสมการ (2.1.32) จะได้จากการรวม กราฟต่างๆที่ได้จากตัวประกอบแต่ละอันในสมการ (2.1.32) ดังแสดงในรูป

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ที่ประกอบด้วย โพล และ ซีโร ที่เป็นค่าจริง โดยวิธีการของโอดพลีอต์ นั้น การประมาณแบบ asymptote จะมีความเที่ยงตรงเพียงพอแก่ความต้องการแล้วในทางปฏิบัติ



รูป 2.1.8 โอดพลีอต์ $G(s) = 10(s+10) / [s(s+2)(s+5)]$

2.2 ทฤษฎีการสร้างวงจรจากเน็ทเวิร์คฟังก์ชัน

การออกแบบ

เทคนิคการสังเคราะห์ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน โดยใช้อุปกรณ์ แอ็กทีฟ RC มี 2 วิธี คือ (1)วิธี Cascade ซึ่ง ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน จะแยกตัวประกอบให้อยู่ในรูปผลคูณของลำดับที่ 1 หรือลำดับที่ 2 โดยแต่ละเทอมสามารถนำมาสร้างวงจรโดยใช้วงจร แอ็กทีฟ RC ได้โดยเดี่ยวๆ และนำเอาวงจรที่สร้างได้จากแต่ละ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน มาต่อ cascade กันก็จะได้ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ทั้งหมด และ (2)วิธี Direct Method จาก ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ที่ต้องการสามารถนำมาสร้างวงจรเพียงวงจรเดียวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 วิธีสร้างแบบ Cascade อันดับ 1

พิจารณา ทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน ทั่วๆ ไปที่แยกตัวประกอบอยู่ในรูป

$$H(S) = K \frac{(S - Z_1)(S - Z_2)(S - Z_3) \dots (S - Z_n)}{(S - P_1)(S - P_2)(S - P_3) \dots (S - P_m)} \quad (2.2.1)$$

จากสมการ (2.2.1) สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$H(S) = \left[\frac{S - Z_1}{S - P_1} \right] \left[\frac{S - Z_2}{S - P_2} \right] \left[\frac{S - Z_3}{S - P_3} \right] \dots \left[\frac{S - Z_n}{S - P_m} \right] \quad (2.2.2)$$

จากสมการ (2.2.2) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูป ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันย่อยๆ ได้ดังนี้

$$H(S) = H_1(S)H_2(S)H_3(S) \dots H_q(S) = \prod_{i=1}^q H_i(S) \quad (2.2.3)$$

สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.2.1



รูปที่ 2.2.1 แสดงการ cascade กันของทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน

จากสมการที่ (2.2.2) และ (2.2.3) จะพบว่าแต่ละ ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันย่อย จะมีเลขยกกำลังสูงสุดเท่ากับ 1 จึงสามารถนำหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับ อินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ และ นอนอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ มาใช้งาน

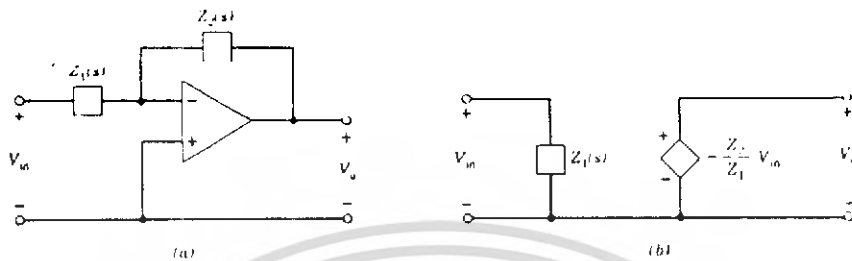
เมื่อกำหนดให้

$$H(S) = K \frac{S + a}{S + b} \quad (2.2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ (Inverting Amplifier)

เมื่อ a และ b เป็นค่าจำนวนจริง ซึ่งสามารถใช้โครงสร้างของ อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ได้ดังรูปที่ 2.2.2(a) และวงจรภายในแสดงในรูป 2.2.2(b)



รูปที่ 2.2.2 แสดงวงจร อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์

จะได้โวลต์เตจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

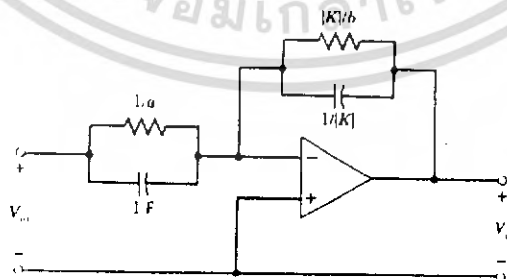
$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = -\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} \tag{2.2.5}$$

แบบที่ 1

$$-\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = -K \frac{S+a}{S+b} \tag{2.2.6}$$

จะได้ $Z_1(S) = \frac{1}{S+a}$, $Z_2(S) = \frac{K}{S+b}$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจร อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.3 แสดงวงจร อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์

หรือสามารถสร้างได้อีกแบบหนึ่งคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2

จากสมการที่ (2.2.6) ให้เอา S หารทั้งเศษและส่วน

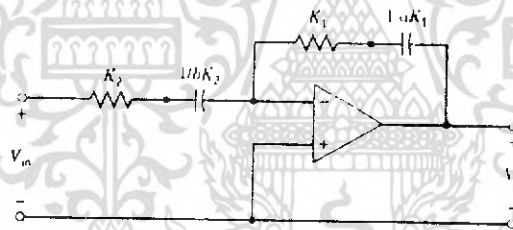
$$H(S) = -\frac{K1(S+a)/S}{K2(S+b)/S} = -\frac{Z2(S)}{Z1(S)} \quad (2.2.7)$$

เมื่อ $|K| = \frac{K1}{K2}$

เมื่อเราใช้โครงสร้างแบบ อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ จะได้

$$Z1(S) = K2 \frac{S+b}{S}, \quad Z2(S) = K1 \frac{S+a}{S}$$

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นวงจร อินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 2.2.4

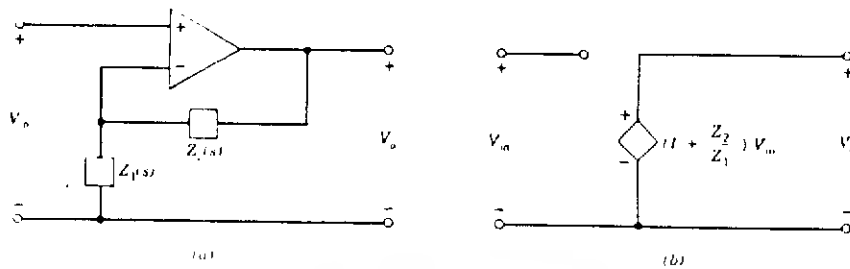


รูปที่ 2.2.4 แสดงรูปวงจรมินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์ แบบที่ 2

2. นอนอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ (Noninverting Amplifier)

นอกจากนี้สามารถใช้รูปแบบ นอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ มาใช้สร้างวงจรได้โดยใช้โครงสร้างของ นอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ได้ดังรูปที่ 2.2.5(a) แลวงจรมายในแสดงในรูป 2.2.5(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.5 แสดงวงจร นอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์

จะได้ โวลเตจ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ดังนี้

$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = 1 + \frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} \quad (2.2.8)$$

จากสมการ (4)

$$\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = K \frac{S+a}{S+b} - 1 = \frac{K(S+a) - (S+b)}{S+b} = \frac{(K-1)S + (Ka-b)}{S+b} \quad (2.2.9)$$

แบบที่ 1 กำหนดให้ $K = 1$ จะได้

$$\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = \frac{a-b}{S+b} \quad (2.2.10)$$

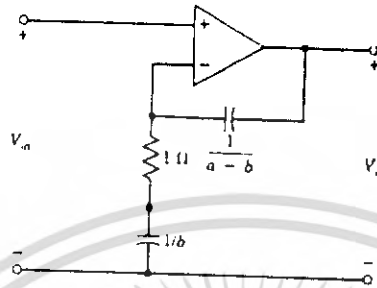
เมื่อหารทั้งเศษและส่วนด้วย S จะได้

$$\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = \frac{(a-b)/S}{(S+b)/S} \quad (2.2.11)$$

จะได้ $Z_1(S) = \frac{S+b}{S}$, $Z_2(S) = \frac{a-b}{S}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมาเขียนวงจร นอนอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 2.2.6 โดยที่ $a > b \geq 0$



รูปที่ 2.2.6 แสดงวงจร นอนอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์แบบที่ 1

แบบที่ 2

กำหนดให้ $Ka = b$ จะได้

$$\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = \frac{(b-a)S/a}{S+b} \quad (2.2.12)$$

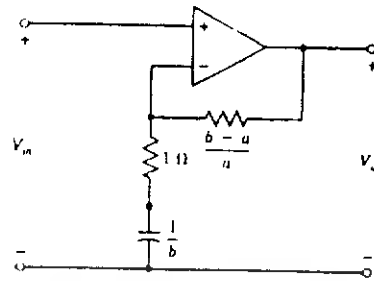
เมื่อหารทั้งเศษและส่วนด้วย S จะได้

$$\frac{Z_2(S)}{Z_1(S)} = \frac{(b-a)/a}{(S+b)/S} \quad (2.2.13)$$

จะได้ $Z_1(S) = \frac{S+b}{S}$, $Z_2(S) = \frac{b-a}{a}$

สามารถนำมาเขียนวงจร นอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 2.2.7 โดยที่ $b \geq a > 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.7 แสดงวงจร นอนอินเวอร์ตติ้ง แอมพลิฟายเออร์ ที่สมบูรณ์แบบที่ 2

จากที่กล่าวมาแล้วว่าสามารถจัดรูป ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ได้หลายวิธี แต่วิธีที่เราเลือกใช้คือวิธีที่คำนวณออกมาแล้วอุปกรณ์ที่ได้ มีเพียงค่า R กับ C เท่านั้นที่เราต้องการ คือเราไม่ปรารถนาให้มีค่า L อยู่ในวงจรของเรา

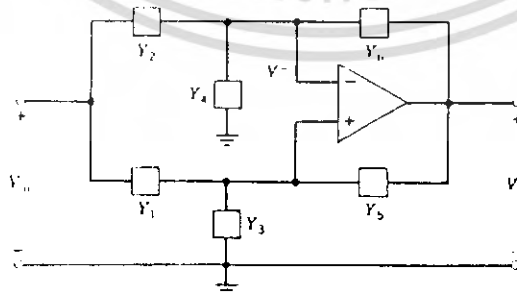
2.2.2 วิธีทางตรง (Direct Method)

จาก ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน ที่ต้องการสามารถสร้างวงจรโดย RC วัน พอร์ท และ ออปแอมป์ โดยที่ RC วันพอร์ท กำหนดเป็น แอดมิตแตนซ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 วิธี คือ ซิงเกิล แอมพลิฟายเออร์ และ ทู แอมพลิฟายเออร์

1. ซิงเกิล แอมพลิฟายเออร์ (Single Amplifier)

พิจารณารูปที่ 2.2.8 ประกอบด้วย ออปแอมป์ 1 ตัว และ RC วัน พอร์ท แอดมิตแตนซ์

6 ตัว



รูปที่ 2.2.8 แสดงวงจร ซิงเกิลแอมพลิฟายเออร์ แบบ วัน พอร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนสมการที่ โหนด อินพุท ของ ออปแอมป์ ๑ ดังนี้

$$Y_2(V' - V_{in}) + Y_4 V' + Y_6(V' - V_o) = 0 \quad (2.214)$$

$$Y_1(V' - V_{in}) + Y_3 V' + Y_5(V' - V_o) = 0 \quad (2.215)$$

กำจัด V' ออกจะได้ โวลตจ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = \frac{Y_1(Y_2 + Y_4 + Y_6) - Y_2(Y_1 + Y_3 + Y_5)}{Y_6(Y_1 + Y_3 + Y_5) - Y_5(Y_2 + Y_4 + Y_6)} \quad (2.2.16)$$

$$\text{จะได้ } Y_1 + Y_3 + Y_5 = Y_2 + Y_4 + Y_6 \quad (2.2.17)$$

$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_6 - Y_5} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_5 - Y_6} \quad (2.2.18)$$

จากสมการ (2.2.18) เขียนในรูป polynomials

$$H(S) = \frac{P(S)}{Q(S)} \quad (2.2.19)$$

จากสมการ (2.2.19) นำค่า $D(s)$ ทหารทั้งเศษและส่วน

$$H(S) = \frac{P(S) / D(S)}{Q(S) / D(S)} \quad (2.2.20)$$

เมื่อ $D(s)$ มีรากเป็นค่าจำนวนจริงเป็นค่าลบ เทียบสัมประสิทธิ์ สมการที่ (2.2.18) และ(2.2.20) จะ
ได้

$$\frac{P(S)}{D(S)} = Y_1 - Y_2 \quad (2.2.21)$$

$$\frac{Q(S)}{D(S)} = Y_6 - Y_5 \quad (2.2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ} \quad \frac{P(S)}{D(S)} = Y2 - Y1 \quad (2.2.23)$$

$$\frac{Q(S)}{D(S)} = Y5 - Y6 \quad (2.2.24)$$

จากคุณสมบัติของ RC วัน พอร์ท แอดมิทแตนซ์

$$Ki = (S + \delta_i) \left. \frac{P(S)}{SD(S)} \right|_{s=-\delta_i} \quad (2.2.25)$$

$$\text{หรือ} \quad Ki = (S + \delta_i) \left. \frac{Q(S)}{SD(S)} \right|_{s=-\delta_i} \quad (2.2.26)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{P(S)}{D(S)} = \sum_i \frac{KiS}{S + \delta_i} - \sum_j \frac{KjS}{S + \delta_j} + K_\infty S \quad (2.2.27)$$

$$\frac{Q(S)}{D(S)} = \sum_u \frac{K_u S}{S + \delta_u} - \sum_v \frac{K_v S}{S + \delta_v} + K_\infty S \quad (2.2.28)$$

เมื่อ K_i, K_j, K_u และ K_v เป็นจำนวนจริงบวก ส่วน K_∞ และ K_∞ เป็นจำนวนจริง เทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ (2.2.21), (2.2.22) หรือ (2.2.23), (2.2.24) และ (2.2.25), (2.2.26) จะได้

$$Y1(S) = K_\infty S + \sum_i \frac{KiS}{S + \delta_i}, \quad Y2(S) = \sum_j \frac{KjS}{S + \delta_j} \quad (2.2.29)$$

$$Y5(S) = \sum_u \frac{K_u S}{S + \delta_u}, \quad Y6(S) = K_\infty + \sum_v \frac{K_v S}{S + \delta_v} \quad (2.2.30)$$

$$\text{หรือ} \quad Y1(S) = \sum_j \frac{KjS}{S + \delta_j}, \quad Y2(S) = K_\infty + \sum_i \frac{K_i S}{S + \delta_i} \quad (2.2.31)$$

$$Y5(S) = K_\infty S + \sum_u \frac{K_u S}{S + \delta_u}, \quad Y6(S) = \sum_v \frac{K_v S}{S + \delta_v} \quad (2.2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y_3 และ Y_4 กำหนดโดย

$$Y_3 - Y_4 = (Y_6 - Y_5) - (Y_1 - Y_2) = \frac{Q(S) - P(S)}{D(S)} \quad (2.2.33)$$

$$\text{หรือ } Y_4 - Y_3 - (Y_5 - Y_6) - (Y_2 - Y_1) = \frac{Q(S) - P(S)}{D(S)} \quad (2.2.34)$$

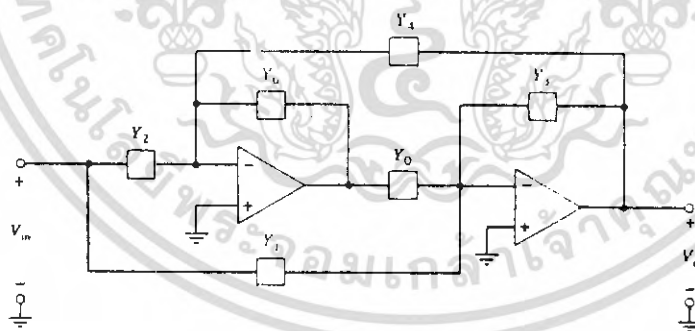
$$\frac{Q(S) - P(S)}{D(S)} = \sum_m \frac{K'_m S}{S + \delta_m} - \sum_q \frac{K'_q S}{S + \delta_q} + K'_\infty S = \pm(Y_3 - Y_4) \quad (2.2.35)$$

$$\text{จะได้ } Y_3(S) = K'_\infty S + \sum_m \frac{K'_m S}{S + \delta_m}, \quad Y_4(S) = \sum_q \frac{K'_q S}{S + \delta_q} \quad (2.2.36)$$

$$\text{หรือ } Y_3(S) = \sum_q \frac{K'_q S}{S + \delta_q}, \quad Y_4(S) = K'_\infty S - \sum_m \frac{K'_m S}{S + \delta_m} \quad (2.2.36)$$

2. ทูแอมพลิฟายเออร์ (Two Amplifier)

พิจารณาจาก รูปที่ 2.2.9 ประกอบด้วย ออปแอมป์ 2 ตัวและ RC วัน พอร์ต 4 ตัว



รูปที่ 2.2.9 แสดงวงจร ทู แอมพลิฟายเออร์

จะได้ โวลเตจ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

$$H(S) = \frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_4} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_4 - Y_3} \quad (2.2.37)$$

พิจารณาเทียบเคียงกับสมการที่ (2.2.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสเกล (Scaling)

จากที่กล่าวมาจะพบว่าอุปกรณ์แต่ละตัวที่คำนวณได้นั้นยากต่อการหาอุปกรณ์จริงๆ มาประกอบเป็นวงจรใช้งานจริงได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำวงจรที่ได้ออกแบบไว้แล้วมาใช้งานได้จริง จึงต้องหาวิธีนำอุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดมาประยุกต์ใช้โดยที่คุณลักษณะต่างๆ ของวงจรยังไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เราเรียกว่า การ Scaling ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ

1. การสเกลทางความถี่ (Frequency Scaling) มีผลต่อการเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์ C และ L เท่านั้นเนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าแปรตามความถี่ และเพื่อที่จะให้อิมพีแดนซ์คงที่การเปลี่ยนแปลงความถี่จะต้องถูกชดเชยด้วยค่าที่สอดคล้องกันดังนี้

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{k_f \omega \left(\frac{1}{k_f}\right) C} = \frac{1}{k_f \omega C_{new}}$$

$$|Z_L| = \omega L = k_f \omega \left(\frac{1}{k_f}\right) L = k_f \omega L_{new}$$

เมื่อ k_f เป็นตัวแปรสเกลความถี่

2. การสเกลทางขนาด (Magnitude Scaling) การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทุกตัวด้วยตัวประกอบ k_m โดยที่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มีค่าดังนี้

$$Z_R = R$$

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$$

$$|Z_L| = \omega L$$

เมื่อสเกลทางขนาดจะได้

$$k_m Z_R = k_m R$$

$$k_m |Z_C| = \frac{1}{\omega C \cdot k_m}$$

$$k_m |Z_L| = k_m \omega L$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปการสเกลได้ดังนี้

$$C_{new} = \frac{1}{k_m k_f} C_{old}$$

$$L_{new} = \frac{k_m}{k_f} L_{old}$$

$$R_{new} = k_m R_{old}$$

2.3 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับอีควอไลเซอร์

อีควอไลเซอร์ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความดังของความถี่ต่ำ (เสียงทุ้ม) และเพิ่มหรือลดความดังของความถี่สูง (เสียงแหลม) ในระดับต่าง ๆ ตามความพอใจของผู้ฟัง โดยไม่ทำให้ความถี่เสียงที่ผ่านภาคนี้เปลี่ยนแปลงหรือเกิดความถี่แปลกปลอมออกไป โดยปรับปุ่มปรับที่อยู่ด้านหน้าของตัวอีควอไลเซอร์ ตัวอีควอไลเซอร์ของเปเปอร์นี้จะมีปุ่มปรับอยู่ 2 ปุ่ม คือ

1. ปุ่มปรับเสียงทุ้มหรือเบส (BASS) ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความแรงของสัญญาณเสียงความถี่ต่ำประมาณ 20 Hz. - 500 Hz ให้ส่งออกเอาท์พุทมากหรือน้อยตามความต้องการ
2. ปุ่มปรับเสียงแหลมหรือทริเบิล (TREBLE) ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดความแรงของสัญญาณเสียงแหลมในย่านความถี่สูงประมาณ 2 KHz - 20 KHz ให้ส่งออกทางด้านเอาท์พุทมากหรือน้อยตามความต้องการ

วงจรอีควอไลเซอร์โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบคือ แบบพาสซีฟ (Passive) และแบบแอ็กทีฟ (Active)

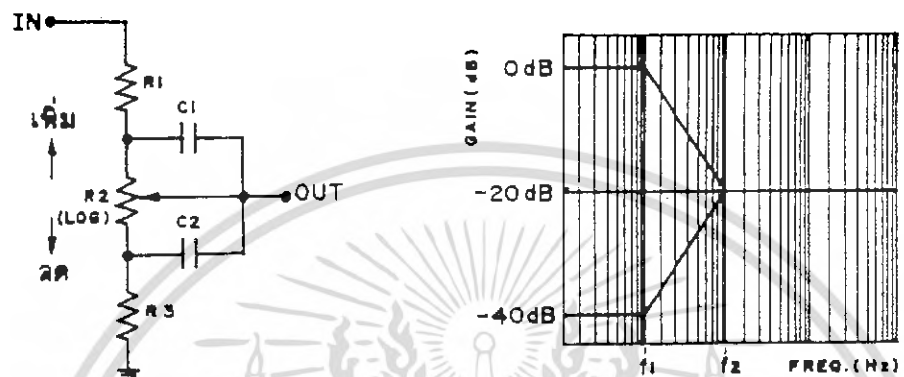
1. อีควอไลเซอร์แบบพาสซีฟ (Passive Equalizer)

อีควอไลเซอร์แบบพาสซีฟ จะถูกกรองผ่านอุปกรณ์ R,L,C โดยไม่มีอัตรขยาย ส่วนใหญ่นิยมใช้ R,C เป็นตัวควบคุมเพิ่มหรือลดระดับความแรงของสัญญาณช่วงความถี่ที่ต้องการแบ่งเป็นปรับเสียงทุ้ม และปรับเสียงแหลม

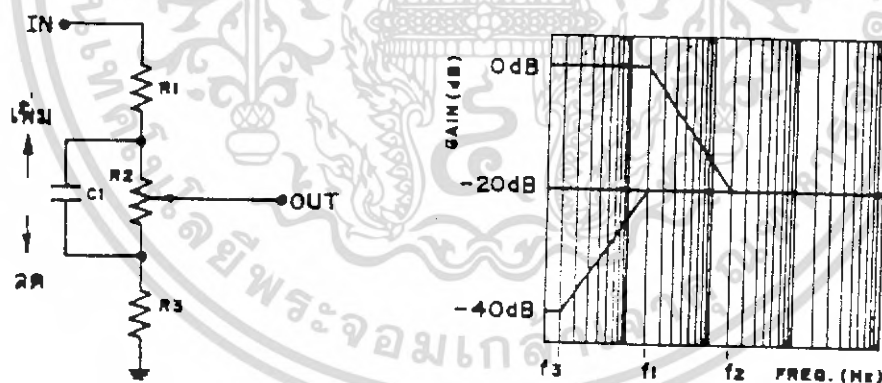
ก. อีควอไลเซอร์สำหรับปรับเสียงทุ้ม (Bass) อีควอไลเซอร์สำหรับปรับเสียงทุ้มแบบพาสซีฟยังแบ่งย่อยออกเป็นแบบปรับทุ้มทั่วไป และแบบปรับลดเสียงทุ้มได้มาก โดยความแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างกันอยู่ที่การต่อคาปาซิเตอร์เข้ามามวงจรปรับเสียงหุ้ม โดยใช้คาปาซิเตอร์ตัวเดียวหรือสองตัวต่อขนานกับตัวต้านทานปรับค่าได้ดังรูป



รูปที่ 2.3.1 เป็นวงจรปรับหุ้มแบบทั่วไป และกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด



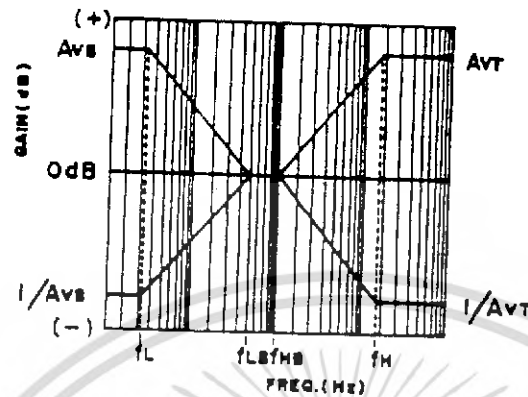
รูปที่ 2.3.2 เป็นวงจรปรับหุ้มแบบลดเสียงหุ้มได้มาก และกราฟแสดงคุณสมบัติของการปรับเพิ่ม-ลด

2. อีควอไลเซอร์แบบแอ็กทีฟ (Active Equalizer)

อีควอไลเซอร์แบบแอ็กทีฟ เป็นแบบที่นิยมใช้งานกันโดยทั่วไป เพราะเป็นวงจรอีควอไลเซอร์ ที่มีการขยายสัญญาณเสียงหุ้มเสียงแหลมที่ถูกปรับแต่งแล้วก่อนส่งออกเอาท์พุท และมีวงจรป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) ช่วยควบคุมอัตราขยาย และป้องกันการ

การออสซิลเลท ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3.3 แสดงคุณสมบัติการปรับแต่งเสียงทุ้มและเสียงแหลมของอีควอไลเซอร์แบบแอ็กทีฟ

จากรูปที่ 2.3.1 เป็นกราฟของอีควอไลเซอร์ ซึ่งมีทั้งทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) และเสียงแหลม (Treble) ซึ่งจะเหมือนกับวงจรอีควอไลเซอร์แบบพาสซีฟนั่นเอง เพียงแต่อีควอไลเซอร์แบบแอ็กทีฟจะเพิ่มวงจรขยายเสียงเข้าไปโดยใช้ 1 โอซี ออปแอมป์ ช่วยขยายเสียง อัตราการขยายของออปแอมป์จะอยู่ที่วงจรป้อนกลับ ซึ่งจะถูกรับแต่งที่วงจรปรับเสียงทุ้ม และวงจรปรับเสียงแหลม ทำให้ค่าความต้านทานในวงจรป้อนกลับของออปแอมป์เปลี่ยนแปลง อัตราขยายของวงจรก็เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการปรับแต่งวงจรอีควอไลเซอร์

บทที่ 3

การออกแบบวงจรอ็ควอไลเซอร์สำหรับออดิโอ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีอ็ควอไลเซอร์ของการปรับเสียงทุ้มเสียงแหลม ซึ่งจะมีรูปแบบของการหาค่า ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) หลายรูปแบบ

การคำนวณและวิเคราะห์สมการ

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์และพิสูจน์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของโครงสร้างการทำงาน

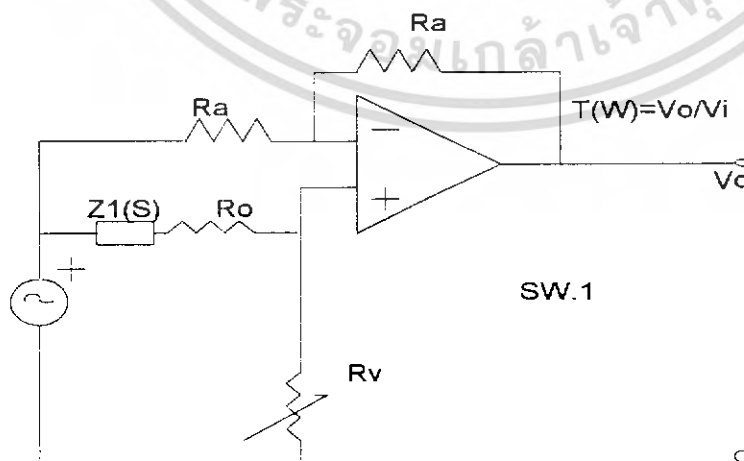
3.1 การวิเคราะห์สมการอันดับหนึ่ง (first order)

1. พิสูจน์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในส่วนของเสียงแหลม (treble) เมื่อ สวิตช์อยู่ที่ 1

$$T(S) = \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)}$$

เมื่อ $y = \frac{R_v}{R_o}$, $0 \leq R_v \leq R_o$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Z_1(S)}{R_o}}$$



รูปที่ 3.1.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองเมื่อ สวิตช์อยู่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Node A

$$\frac{V_A - V_i}{R_a} + \frac{V_A - V_o}{R_a} = 0 \quad (3.1.1)$$

Node B

$$\frac{V_B - V_i}{R_a} + \frac{V_B}{R_v} = 0 \quad (3.1.2)$$

เมื่อ $V_A = V_B$ จากสมการที่ (3.1.2) จะได้

$$\frac{V_A - V_i}{Z_1(S) + R_o} + \frac{V_A}{R_v} = 0 \quad (3.1.3)$$

จากสมการ (3.1.1) จะได้

$$V_A = \frac{V_o + V_i}{2} \quad (3.1.4)$$

แทนสมการ (3.1.4) ใน สมการ (3.1.3) จะได้

$$\frac{V_o + V_i}{2[Z_1(S) + R_o]} + \frac{V_o + V_i}{2R_v} - \frac{V_i}{Z_1(S) + R_o} = 0$$

$$V_o \left[\frac{1}{2[Z_1(S) + R_o]} + \frac{1}{2R_v} \right] + V_i \left[\frac{1}{2[Z_1(S) + R_o]} + \frac{1}{2R_v} - \frac{1}{Z_1(S) + R_o} \right] = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{\frac{1}{2[Z_1(S) + R_o]} + \frac{1}{2R_v} - \frac{1}{Z_1(S) + R_o}}{\left[\frac{1}{2[Z_1(S) + R_o]} + \frac{1}{2R_v} \right]}$$

$$= - \frac{\frac{R_v + [Z_1(S) + R_o] - 2R_v}{2[Z_1(S) + R_o] \cdot R_v}}{\frac{R_v + Z_1(S) + R_o}{2[Z_1(S) + R_o] \cdot R_v}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{\frac{Z_1(S) + R_o - R_v}{Z_1(S) + R_o + R_v}}{\frac{\frac{Z_1(S) + R_o}{R_o} - \frac{R_v}{R_o}}{\frac{Z_1(S) + R_o}{R_o} + \frac{R_v}{R_o}}}$$

แทนค่า $y = \frac{R_v}{R_o}$, $H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Z_1(S)}{R_o}}$ ลงไปจะได้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = - \frac{\frac{1}{H(S)} - y}{\frac{1}{H(S)} + y} = - \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)}$$

2. พิสัยทรานเฟอร์ฟังก์ชันในส่วนของเสียงแหลม เมื่อสวิตช์ต่อที่ 2

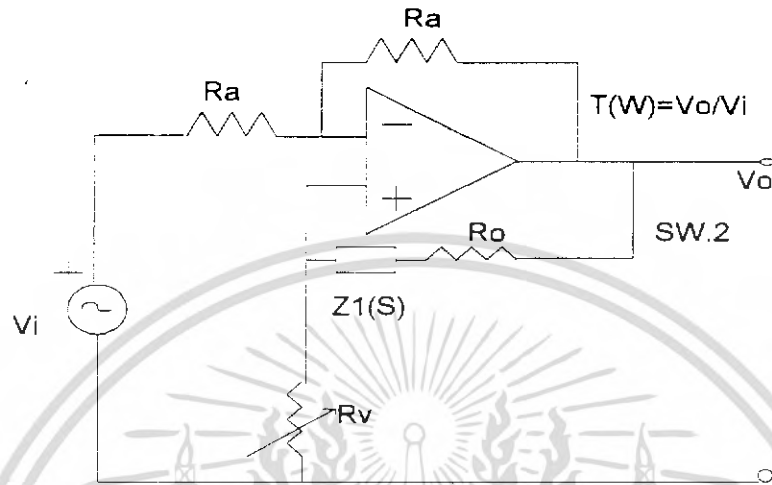
$$T(S) = - \frac{1 + yH(S)}{1 - yH(S)}$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \frac{Rv}{Ro} \quad 0 \leq Rv \leq Ro$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Z1(S)}{Ro}}$$



รูปที่ 3.1.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองเมื่อ สวิตช์ อยู่ที่ 2

$$\text{Node A} \quad \frac{VA - Vo}{Ra} + \frac{VA - Vi}{Ra} = 0 \quad (3.1.5)$$

$$\text{Node B} \quad \frac{VA - Vo}{Z1(S) + Ro} + \frac{VA}{Rv} = 0 \quad (3.1.6)$$

$$VA = \frac{Vo + Vi}{2} \quad (3.1.7)$$

แทน (3.1.7) ใน (3.1.6)

$$\left[\frac{Vo + Vi}{2} - Vo \right] \frac{1}{Z1(S) + Ro} + \frac{Vo + Vi}{2Rv} = 0$$

เอา Vi หารตกจะได้

$$\left[\frac{Vo}{2Vi} + \frac{1}{2} - \frac{Vo}{Vi} \right] \frac{1}{Z1(S) + Ro} + \frac{Vo}{2RvVi} + \frac{1}{2Rv} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[\frac{1}{2[Z1(S) + Ro]} - \frac{1}{Z1(S) + Ro} + \frac{1}{2Rv} \right] \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{2Rv} - \frac{1}{2[Z1(S) + Ro]}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = -\frac{Z1(S) - Ro - Rv}{Z1(S) + Ro - Rv}$$

เอา Ro ทารดลอด

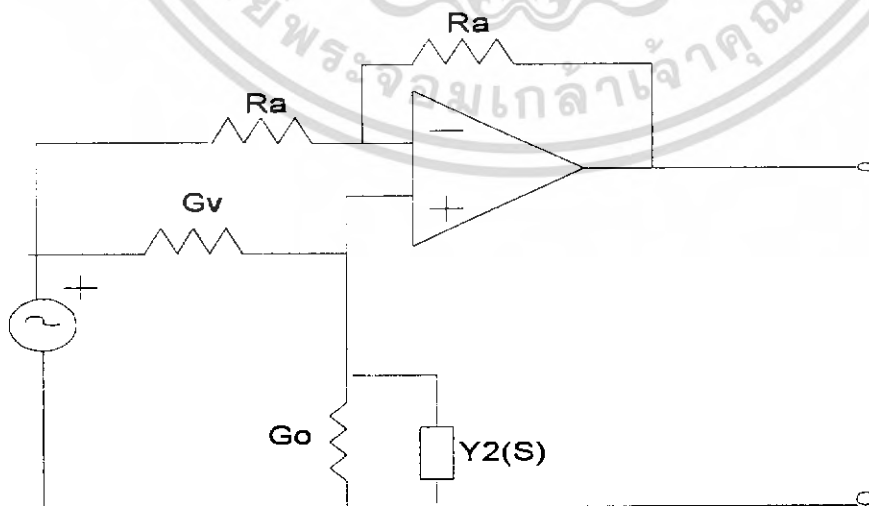
$$\begin{aligned} \frac{Vo}{Vi} &= -\frac{\frac{Z1(S) + Ro}{Ro} + \frac{Rv}{Ro}}{\frac{Z1(S) + Ro}{Ro} - \frac{Rv}{Ro}} = -\frac{\frac{1}{H(S)} + y}{\frac{1}{H(S)} - y} \\ &= -\frac{1 + yH(S)}{1 - yH(S)} \end{aligned}$$

3. พิสูจน์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในส่วนของเสียงท่อม เมื่อสวิตช์อยู่ที่ 1

จาก $T(S) = \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)}$ เมื่อ

$$y = \frac{Gv}{Go} \quad 0 \leq Gv \leq Go$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Y1(S)}{Go}}$$



รูปที่ 3.1.3 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองเมื่อ สวิตช์ อยู่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Node A} \quad \frac{V_A - V_o}{R_a} + \frac{V_A - V_i}{R_a} = 0 \quad (3.1.8)$$

$$\text{Node B} \quad \frac{V_B - V_i}{G_v} + \frac{V_B}{G_o + Y_2} = 0 \quad (3.1.9)$$

จากสมการ (3.1.8)จะได้

$$V_A = \frac{V_o + V_i}{2} \quad (3.1.10)$$

เมื่อ $V_A = V_B$ แทนค่า V_A ลงในสมการที่ (3.1.9) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_o + V_i}{2G_v} - \frac{V_i}{G_v} + \frac{V_o + V_i}{2[G_o + Y_2]} &= 0 \\ V_o \left[\frac{1}{G_v} + \frac{1}{2[G_o + Y_2]} \right] &= V_i \left[\frac{1}{G_v} - \frac{1}{2G_v} - \frac{1}{2[G_o + Y_2]} \right] \\ \frac{V_o}{V_i} &= \frac{2[G_o + Y_2] - G_v - G_o - Y_2}{2G_v[G_o + Y_2]} = \frac{G_o - G_v + Y_2(S)}{G_o + G_v + Y_2(S)} \\ &= \frac{2G_v[G_o + Y_2]}{2G_v[G_o + Y_2]} \end{aligned}$$

นำ G_o หาคancel จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{\frac{G_o + Y_2(S)}{G_o} - \frac{G_v}{G_o}}{\frac{G_o + Y_2(S)}{G_o} + \frac{G_v}{G_o}} \\ &= \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o + V_i}{2G_v} - \frac{V_o}{G_v} + \frac{V_o + V_i}{2[Go + Y2(S)]} = 0$$

$$V_o \left[\frac{1}{2G_v} - \frac{1}{G_v} + \frac{1}{2[Go + Y2(S)]} \right] = -V_i \left[\frac{1}{2G_v} + \frac{1}{2[Go + Y2(S)]} \right]$$

เอา Go หารตลอดทั้งเศษและส่วน

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{\frac{G_v}{Go} + \frac{Go + Y2(S)}{Go}}{\frac{G_v}{Go} - \frac{Go + Y2(S)}{Go}}$$

$$= - \frac{1 + yH(S)}{1 - yH(S)}$$

3.2 การวิเคราะห์สมการอันดับ 2 (SECOND ORDER)

จากทฤษฎีทั่วไปของอีควอไลเซอร์เราก็คงทราบกันคืออยู่แล้วว่า ยิ่งเราเพิ่มจำนวนอันดับของวงจรสูงมากขึ้นเท่าไรก็จะทำให้เส้นกราฟในการตอบสนองของวงจรนั้นมากขึ้นตามจำนวนอันดับที่เพิ่มขึ้น หรือพูดง่าย ๆ ก็คือยิ่งอันดับของวงจรสูงมากขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการอีควอไลซ์ ของวงจรดีขึ้นด้วย

ในการวิเคราะห์วงจรอันดับ 2 นี้ เราได้นำหลักการพื้นฐานของสมการกรองความถี่ต่ำและสมการกรองความถี่สูงมาใช้ในการพิจารณาออกแบบวงจรขึ้นมา โดยมีสมการเบื้องต้น คือ

$$T(S) = 1 + H(S) \quad (3.2.1)$$

จากสมการ (3.2.1) เราก็มามาทำการพิจารณาต่อไปว่าเส้นกราฟของอีควอไลเซอร์ทั้งทางด้านเสียงแหลม (Treble) และเส้นกราฟทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) เมื่อนำมารวมกันเราพบว่ามันจะมีลักษณะคล้ายกับการนำกราฟของวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) กับกราฟของวงจรกรองความถี่สูง (High Pass Filter) มาทำการพล็อตร่วมกัน โดยด้านเสียงแหลม (Treble) จะเป็นสมการกรองความถี่สูง และด้านเสียงทุ้ม (Bass) จะเป็นสมการกรองความถี่ต่ำ จากนั้นเราก็คงทำการพิจารณาในแต่ละด้านดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 พิจารณาต้านเสียงแหลม (Treble) หรือด้านความถี่สูง

1. พิจารณาช่วงการขยายขนาดของสัญญาณ (Boost)

โดยจากสมการ (3.2.1) จะได้

$$T(S) = 1 + H(S)$$

เมื่อกำหนดให้ $H(S)$ เป็นฟังก์ชันของสมการของวงจรกรองความถี่สูง จะได้

$$T(S) = 1 + \frac{KS^2}{S^2 + \omega b S + 1}$$

$$= \frac{S^2 + \omega b S + 1 + KS^2}{S^2 + \omega b S + 1}$$

$$= \frac{(1+K)S^2 + \omega b S + 1}{S^2 + \omega b S + 1}$$

เมื่อเรากำหนดให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ +10 dB

$$\text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |T(j\omega)|$$

$$\therefore |T(j\omega)| = 3.162$$

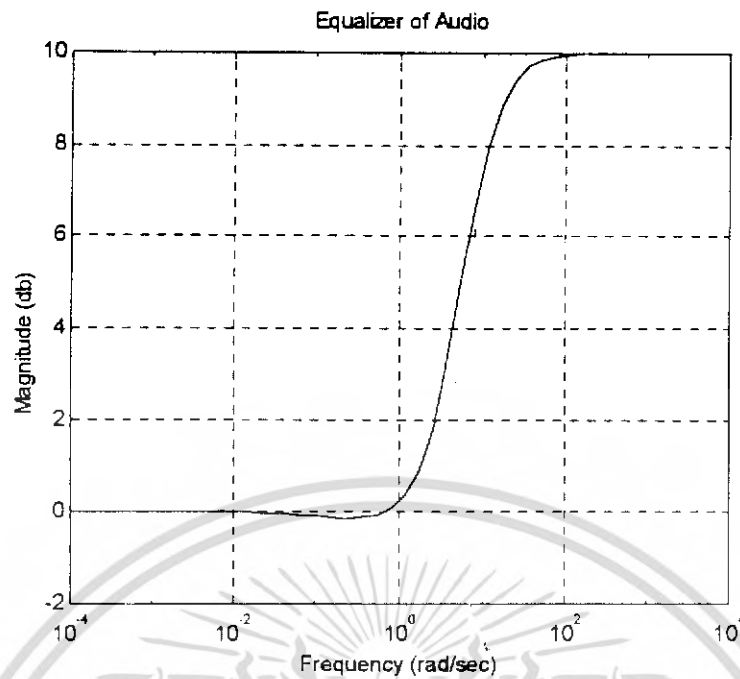
$$\therefore K = 2.162$$

และจากการทดลองปลายครั้งพบว่า $\omega b = 10$ เป็นค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง

$$\therefore \text{จึงกำหนดให้ } \omega b = 10$$

$$\text{จะได้ } T(S) = \frac{3.162S^2 + 10S + 1}{S^2 + 10S + 1} \quad (3.2.2)$$

เมื่อนำสมการนี้ไปพล็อตใน MATLAB จะได้กราฟออกมาดังรูป



รูป 3.2.1 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ (3.2.2)

2. พิจารณาทางช่วงการลดขนาดของสัญญาณ (CUT)

โดยสมการสมการทางช่วงการลดขนาดของสัญญาณ จะเป็นส่วนกลับของสมการช่วงการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณ ซึ่งจะได้

$$T(S) = \frac{1}{1+H(S)} = \frac{1}{1 + \frac{KS^2}{S^2 + \omega bS + 1}}$$

$$= \frac{S^2 + \omega bS + 1}{(1+K)S^2 + \omega bS + 1}$$

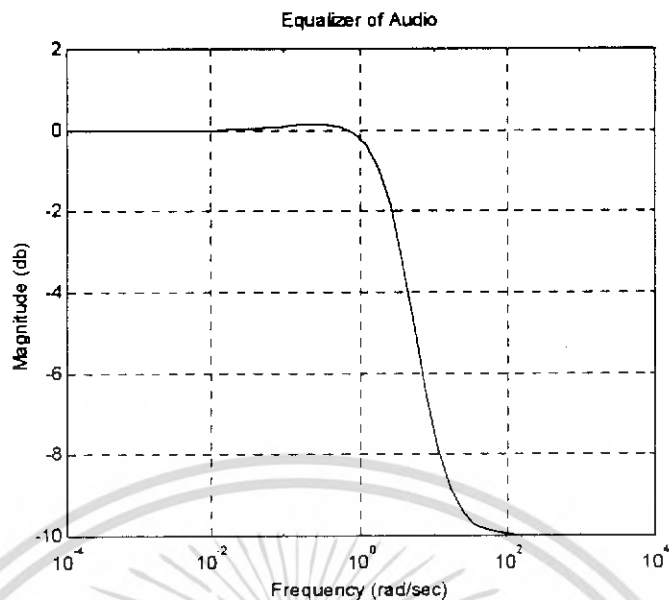
โดยกำหนดให้ช่วงการลดขนาดของสัญญาณสูงสุดเท่ากับ -10 dB

$$\text{จาก } |T(j\omega)|_{dB} = -10 \text{ dB}$$

$$\therefore |T(j\omega)| = 0.3162$$

$$T(S) = \frac{S^2 + 10S + 1}{0.3162S^2 + 10S + 1} \quad (3.2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



รูปที่ 3.2.2 แสดงกราฟการตอบสนองของสมการ (3.2.3)

3.2.2 พิจารณาด้านเสียงทุ้ม (Bass) หรือด้านความถี่ต่ำ

1. พิจารณาช่วงการขยายขนาดของสัญญาณ (Boost)

โดยจากจากสมการที่ (3.2.1) จะได้

$$T(S) = 1 + H(S)$$

เมื่อกำหนดให้ $H(S)$ เป็นฟังก์ชันของสมการของวงจรกรองความถี่ต่ำ

จะได้

$$T(S) = 1 + \frac{K}{S^2 + \omega bS + 1}$$

$$= \frac{S^2 + \omega bS + (1 + K)}{S^2 + \omega bS + 1}$$

เมื่อเรากำหนดให้ขนาดของการขยายสัญญาณสูงสุดเท่ากับ +10 dB

$$\text{จากสูตร } |T(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |T(j\omega)|$$

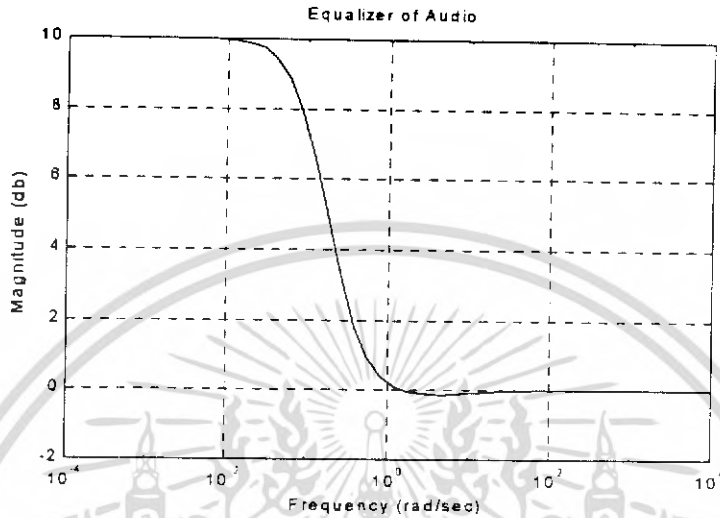
$$\therefore |T(j\omega)| = 3.162$$

$$\therefore K = 2.162$$

เอกสารนี้เป็นกำหนดที่สงวนไว้สำหรับครูใช้ 10 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \text{จะได้สมการ } T(S) = \frac{S^2 + 10S + 3.162}{S^2 + 10S + 1} \quad (3.2.4)$$

เมื่อนำสมการ (3.2.4) มาพล็อตกราฟจะได้ดังรูป



รูปที่ 3.2.3 แสดงการพล็อตกราฟจากสมการ (3.2.4)

2. พิจารณาช่วงการลดขนาดของสัญญาณ (CUT)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสมการช่วงการลดขนาดของสัญญาณจะเป็นส่วนกลับของช่วงการเพิ่มขนาดของสัญญาณ

$$\begin{aligned} \therefore \text{จะได้สมการ } T(S) &= \frac{1}{1+H(S)} \\ T(S) &= \frac{1}{1 + \frac{K}{S^2 + \omega bS + 1}} \\ &= \frac{S^2 + \omega bS + 1}{S^2 + \omega bS + (1+K)} \end{aligned}$$

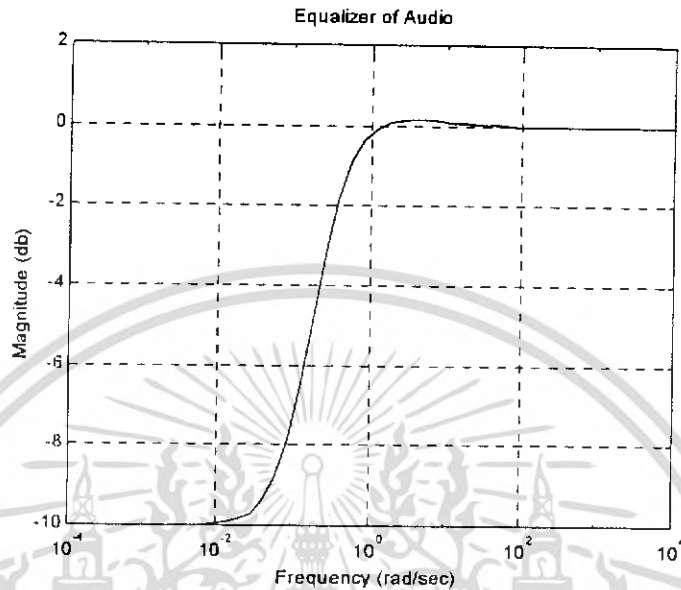
โดยกำหนดให้ช่วงการลดขนาดของสัญญาณต่ำสุดเท่ากับ -10 Db

$$\text{จาก } |T(j\omega)|_{dB} = -10 \text{ dB}$$

$$\therefore |T(j\omega)| = 0.3162$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore T(S) = \frac{S^2 + 10S + 1}{S^2 + 10S + 0.3162} \quad (3.2.5)$$

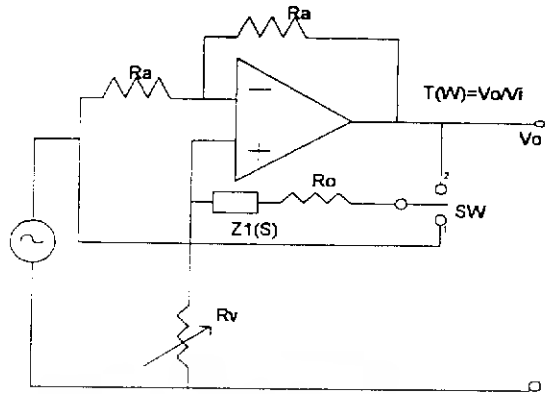


รูปที่ 3.2.4 แสดงกราฟที่ได้จากสมการ (3.2.5)

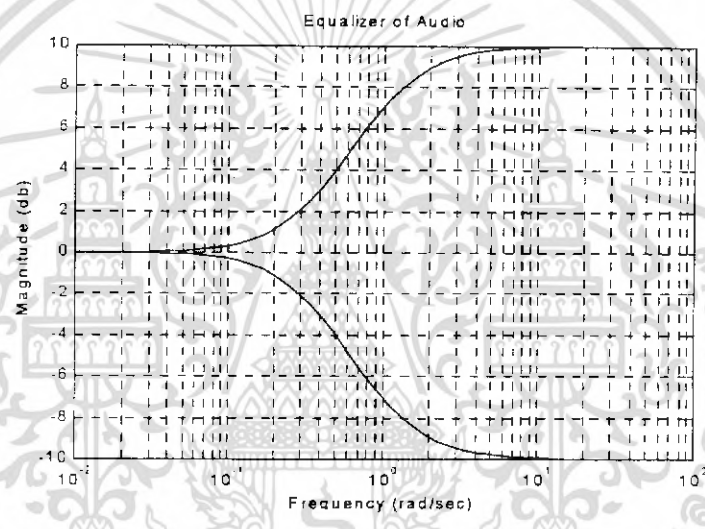
3.3 การออกแบบวงจรใช้งานจริงอันดับหนึ่ง (First Order)

3.3.1 วงจรปรับเสียงทางด้านความถี่สูงหรือเสียงแหลม (Treble)

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดสัญญาณเสียงย่านความถี่สูง ประมาณ 2 KHz - 20 KHz โดยวงจรที่ใช้ออกแบบแสดงในรูปที่ 3.3.1 ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ตัวเดียว โดยมีสวิทช์เลือกการขยายสัญญาณ อยู่ 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่ 1 และ 2 โดยตำแหน่งที่ 1 เป็นการลดขนาดของสัญญาณ (CUT) และตำแหน่งที่ 2 เป็นการเพิ่มขนาดของสัญญาณ โดยมีอิมพีแดนซ์ $Z_1(S)$ ซึ่งประกอบด้วยตัว R, C เป็นตัวกำหนดความถี่ในการอิกควอไลซ์ทางด้านความถี่สูง และสามารถเพิ่มหรือลดขนาดอัตราขยายได้โดยความต้านทานปรับค่าได้ (R_v) ซึ่งในปริยูณานิพนธ์เล่มนี้ได้กำหนดอัตราขยายอยู่ในช่วง ± 10 dB ดังแสดงในรูป 3.3.2



รูปที่ 3.3.1 แสดงวงจรปรับเสียงแหลม (ทางด้านความถี่สูง)



รูปที่ 3.3.2 แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรปรับเสียงแหลม

ก. จากวงจรรูปที่ 3.3.1 พิจารณาที่ตำแหน่งสวิตซ์ที่ 1 ซึ่งเป็นการลดขนาดของสัญญาณ (CUT)

$$\text{จากสมการ } T(S) = \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)} \tag{3.3.1}$$

เมื่อ

$$y = \frac{Rv}{Ro} \quad , \quad 0 \leq Rv \leq Ro$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Ro}{SC1}}$$

$$Z1(S) = R1 + \frac{1}{SC1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 T(S) &= \frac{1 - \frac{Rv}{Ro} \cdot \frac{Ro}{Ro + Z1(S)}}{1 + \frac{Rv}{Ro} \cdot \frac{Ro}{Ro + Z1(S)}} = \frac{1 - \frac{Rv}{Ro + Z1(S)}}{1 + \frac{Rv}{Ro + Z1(S)}} \\
 &= \frac{Ro + Z1(S) - Rv}{Ro + Z1(S) + Rv} = \frac{R1 + \frac{1}{SC1} + Ro - Rv}{R1 + \frac{1}{SC1} + Ro + Rv} \\
 &= \frac{C1(R1 + Ro - Rv)S + 1}{C1(R1 + Ro + Rv)S + 1}
 \end{aligned}$$

จะได้ $T(S) = \frac{R1 + Ro - Rv}{R1 + Ro + Rv} \cdot \frac{S + \frac{1}{C1(R1 + Ro - Rv)}}{S + \frac{1}{C1(R1 + Ro + Rv)}} \quad (3.3.2)$

นำสมการ (3.3.2) มาเทียบกับสมการ $T(S) = K \cdot \frac{S+a}{S+b}$

จะได้

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{R1 + Ro - Rv}{R1 + Ro + Rv} \\
 a &= \frac{1}{C1(R1 + Ro - Rv)} \\
 b &= \frac{1}{C1(R1 + Ro + Rv)}
 \end{aligned}$$

จาก $T(S) = K \cdot \frac{S+a}{S+b}$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$|T(j\omega)| = K \cdot \frac{\sqrt{S^2 + a^2}}{\sqrt{S^2 + b^2}} \quad (3.3.3)$$

จากสูตร $|T(j\omega)| = 20 \log_{10} T(j\omega) \quad (3.3.4)$

∴ ที่ความถี่ต่ำ ($\omega = 0$) ไม่ต้องการการลดสัญญาณ จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(j\omega)| &= 0 \text{ dB} \\ K &= \frac{b}{a} \\ b &= Ka\end{aligned}\tag{3.3.5}$$

ที่ความถี่สูง ($\omega = \infty$) ต้องการการลดสัญญาณ -10 dB จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(j\omega)| &= -10 \text{ dB} \\ K &= 0.31622\end{aligned}\tag{3.3.6}$$

ที่ $\omega = 1$ ต้องการการลดสัญญาณ -7 dB จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow 1} |T(j\omega)| &= -7 \text{ dB} \\ K \frac{\sqrt{1-a^2}}{\sqrt{1+b^2}} &= 0.4467\end{aligned}\tag{3.3.7}$$

แทนค่า a และ K จากสมการ (3.3.5) และ (3.3.6) ลงในสมการ (3.3.7) จะได้

$$0.31622 \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+(0.31622a)^2}} = 0.4467$$

จะได้

$$\begin{aligned}a &= 1.1150 \\ b &= 0.3526\end{aligned}$$

$$\therefore \text{จะได้สมการ } T(S) = 0.31622 \frac{S+1.1150}{S+0.3526}\tag{3.3.8}$$

ในการออกแบบวงจรเพื่อที่จะทำการหาค่า R , C ในวงจร เราต้องนำค่าในสมการที่ (3.3.2) และ (3.3.8) มาเทียบกัน จะได้

$$0.31622 \frac{S+1.1150}{S+0.3526} = \frac{R1+Ro-Rv}{R1+Ro+Rv} \frac{S+\frac{1}{C1(R1+Ro-Rv)}}{S+\frac{1}{C1(R1+Ro+Rv)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งสวิตช์ 1 เป็นช่วงการลดขนาดของสัญญาณ ที่ขนาดของสัญญาณต่ำสุดกำหนดให้

$$R_v = R_o$$

จะได้

$$K = 0.31622 = \frac{R_1}{R_1 + 2R_o}$$

$$a = 1.1150 = \frac{1}{C_1 R_1}$$

$$b = 0.3526 = \frac{1}{C_1(R_1 + 2R_o)}$$

เมื่อกำหนดให้ $R_o = 1 \Omega$, $R_v = 1 \Omega$

จะได้

$$R_1 = 0.9248 \Omega$$

$$C_1 = 0.9697587 F$$

เพื่อให้ได้ค่าของอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดเราจะต้องทำการสเกลทางขนาดเท่ากับ 10^4 และสเกลทางความถี่เท่ากับ $2\pi * 2 * 10^3$ จะได้

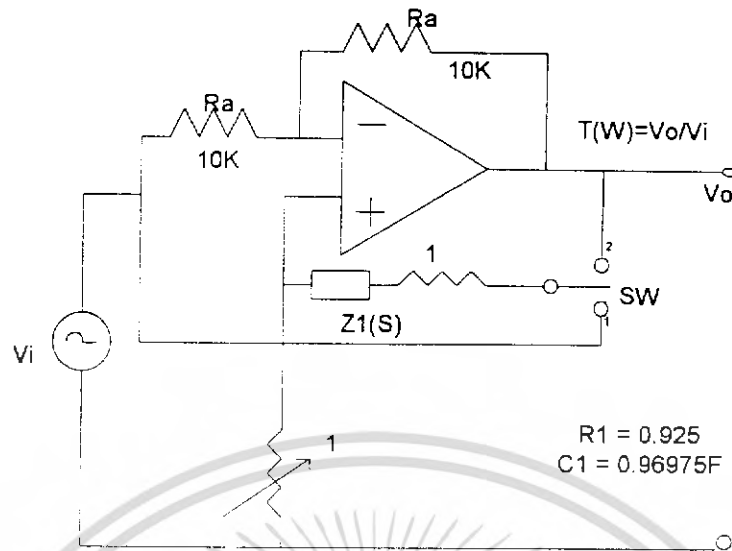
$$R_o = 10 K\Omega$$

$$R_v = 10 K\Omega$$

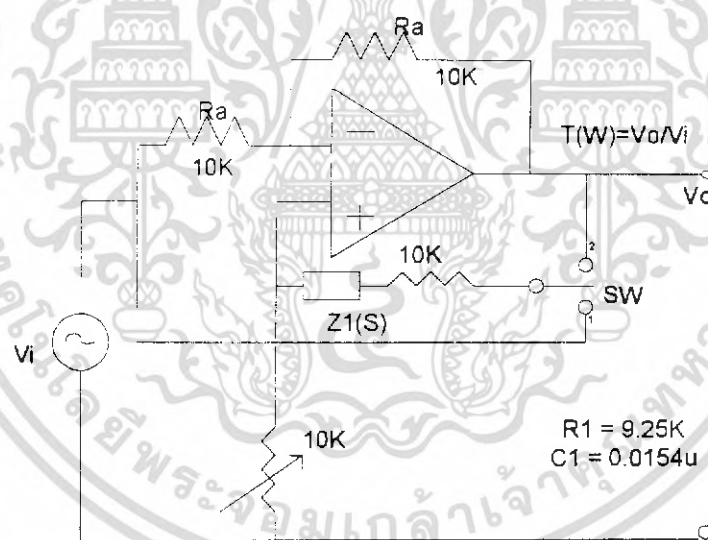
$$R_1 = 9.25 K\Omega$$

$$C_1 = 0.0154 \mu F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.3(a) แสดงวงจรใช้งานก่อนสเกล



รูปที่ 3.3.3(b) แสดงวงจรที่ทำการสเกลแล้ว

ข. จากวงจรรูปที่ 3.3.1 พิจารณาที่ตำแหน่งสวิตซ์ที่ 2 เป็นการเพิ่มขนาดของสัญญาณ (Boost)

$$\text{จากสมการ } T(S) = \frac{1 + yH(S)}{1 - yH(S)} \quad (3.3.9)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \frac{Rv}{Ro}, \quad 0 \leq Rv \leq Ro$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Z1(S)}{Ro}}$$

$$Z1(S) = R1 + \frac{1}{SC1}$$

แทนค่าลงใน $T(S)$ จะได้สมการออกมาดังนี้

$$T(S) = \frac{1 + \frac{Rv}{Ro} \frac{Ro}{Ro + Z1(S)}}{1 - \frac{Rv}{Ro} \frac{Ro}{Ro + Z1(S)}} = \frac{1 + \frac{Rv}{Ro + Z1(S)}}{1 - \frac{Rv}{Ro + Z1(S)}}$$

$$= \frac{Ro + Z1(S) + Rv}{Ro + Z1(S) - Rv} = \frac{R1 + \frac{1}{SC1} + Ro + Rv}{R1 + \frac{1}{SC1} + Ro - Rv}$$

$$= \frac{C1(R1 + Ro + Rv)S + 1}{C1(R1 + Ro - Rv)S + 1}$$

จะได้

$$T(S) = \frac{R1 + Ro + Rv}{R1 + Ro - Rv} \frac{S - \frac{1}{C1(R1 + Ro + Rv)}}{S + \frac{1}{C1(R1 + Ro - Rv)}} \quad (3.3.10)$$

นำสมการ (3.3.10) มาเทียบกับสมการ $T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$

จะได้

$$K = \frac{R1 + Ro + Rv}{R1 + Ro - Rv}$$

$$a = \frac{1}{C1(R1 + Ro + Rv)}$$

$$b = \frac{1}{C1(R1 + Ro - Rv)}$$

จาก $T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$

∴ ที่ความถี่ต่ำ ($\omega = 0$) ไม่ต้องการการลดสัญญาณ จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(j\omega)| &= 0 \text{ dB} \\ K &= \frac{b}{a} \\ b &= Ka\end{aligned}\tag{3.3.11}$$

ที่ความถี่สูง ($\omega = \infty$) ต้องการการเพิ่มสัญญาณ +10 dB จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(j\omega)| &= +10 \text{ dB} \\ K &= 3.16228\end{aligned}\tag{3.3.12}$$

ที่ $\omega = 1$ ต้องการการลดสัญญาณ +7 dB จาก (3.3.3) และ (3.3.4) จะได้

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow 1} |T(j\omega)| &= +7 \text{ dB} \\ K \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+b^2}} &= 2.2387\end{aligned}\tag{3.3.13}$$

แทนค่า a และ K จากสมการ (3.3.11) และ (3.3.12) ลงในสมการ (3.3.13) จะได้

$$3.16228 \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+(3.16228a)^2}} = 2.2387$$

จะได้

$$\begin{aligned}a &= 0.3526 \\ b &= 1.1150\end{aligned}$$

$$\therefore \text{จะได้สมการ } T(S) = 3.16228 \frac{S+0.3526}{S+1.1150}\tag{3.3.14}$$

ในการออกแบบวงจรเพื่อที่จะทำการหาค่า R , C ในวงจร เราต้องนำค่าในสมการที่ (3.3.10) และ (3.3.14) มาเทียบกัน จะได้

$$3.16228 \frac{S+0.3526}{S+1.1150} = \frac{R1+Ro+Rv}{R1+Ro-Rv} \frac{S+\frac{1}{C1(R1+Ro+Rv)}}{S+\frac{1}{C1(R1+Ro-Rv)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้} \quad 3.16228 = \frac{R1 + Ro + Rv}{R1 + Ro - Rv}$$

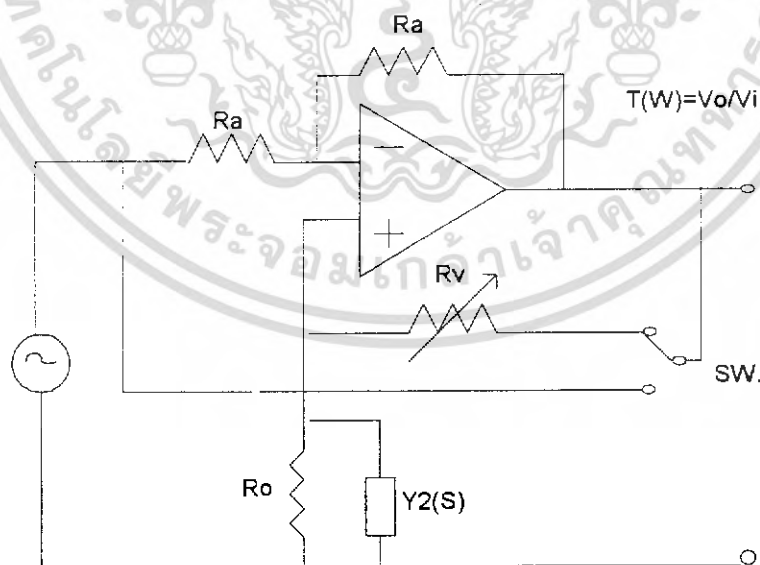
$$0.3526 = \frac{1}{C1(R1 + Ro + Rv)}$$

$$1.1150 = \frac{1}{C1(R1 + Ro - Rv)}$$

แล้วขั้นตอนนี้ต่อไปก็ทำเหมือนกับ ข้อ ก. ดังที่ได้แสดงวิธีทำมาแล้วเพื่อหาค่า R กับ C

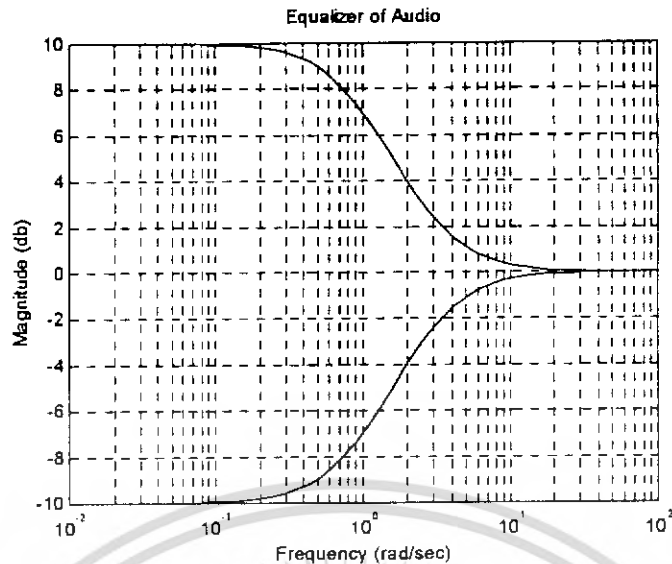
3.3.2 วงจรปรับเสียงทางด้านความถี่ต่ำหรือเสียงทุ้ม (Bass)

การออกแบบวงจรปรับเสียงทางด้านความถี่ต่ำ (เสียงทุ้ม) แสดงด้วยวงจรในรูป (3.3.4) ประกอบด้วย ออปแอมป์ 1 ตัว โดยมีสวิตช์ 2 ตัว เป็นตัวเลือกตำแหน่งของการขยาย โดย สวิตช์ 1 จะเป็นการลดอัตราขยาย (CUT) และสวิตช์ 2 จะเป็นการเพิ่มอัตราขยาย (BOOST) และมีค่าแอดมิตแดนซ์ $Y2(S)$ ซึ่งประกอบด้วยค่า R และ C เป็นตัวกำหนดความถี่ในการอิกควอไลซ์ทางด้านความถี่ต่ำ และสามารถปรับอัตราขยายหรือกำหนดสัญญาณได้โดยปรับ Gv ซึ่งในปริภูมิพหุนามนี้จะมีอัตราขยายอยู่ในช่วง ± 10 dB เช่นเดียวกับทางด้านเสียงแหลม (TREBLE) ดังแสดงในรูป (3.3.4)



รูปที่ (3.3.4) แสดงวงจรปรับเสียงทุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ (3.3.5) แสดงกราฟการตอบสนองของวงจรปรับเสียงทูน

ก. เมื่อพิจารณาที่สวิตช์ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นการลดขนาดของสัญญาณ (CUT)

จากสมการ
$$T1(S) = \frac{1 - yH(S)}{1 + yH(S)} \quad (3.3.15)$$

เมื่อ
$$y = \frac{Gv}{Go}, \quad 0 \leq Gv \leq Go$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Y2(S)}{Gv}}$$

$$Y2(S) = SC2 + G2$$

แทนค่า y , $H(S)$, $Y2(S)$ ลงในสมการ $T1(S)$

$$\begin{aligned} T1(S) &= \frac{1 - \frac{Gv}{Go} \cdot \frac{Go}{Go + Y2(S)}}{1 + \frac{Gv}{Go} \cdot \frac{Go}{Go + Y2(S)}} = \frac{1 - \frac{Gv}{Go + Y2(S)}}{1 + \frac{Gv}{Go + Y2(S)}} \\ &= \frac{Go + Y2(S) - Gv}{Go + Y2(S) + Gv} = \frac{SC2 + G2 + Go - Gv}{SC2 + G2 + Go + Gv} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \text{จะได้} \quad T1(S) = \frac{S + \frac{G2 + G0 - Gv}{C2}}{S + \frac{G2 + G0 + Gv}{G2}} \quad (3.3.16)$$

\therefore

จากสมการที่ (3.3.16) นำมาเทียบกับสมการ $T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$ จะได้

$$K = 1$$

$$a = \frac{G2 + G0 - Gv}{C2}$$

$$b = \frac{G2 + G0 + Gv}{C2}$$

จากสมการ $T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$

จะได้ $|T(j\omega)| = K \frac{\sqrt{S^2 + a^2}}{\sqrt{S^2 + b^2}}$

$$|T(j\omega)|_{db} = 20 \log_{10} |T(j\omega)|$$

ที่ความถี่ต่ำ ($\omega = 0$) ต้องการให้มีการลดขนาดของสัญญาณที่ -10 dB

จะได้

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(j\omega)| = -10 \text{ dB}$$

$$0.31622 = K \frac{a}{b}$$

$$a = \frac{0.31622b}{K}$$

(3.3.17)

ที่ความถี่สูง ($\omega = \infty$) ไม่ต้องการการลดสัญญาณ

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(j\omega)| = 0 \text{ dB}$$

จะได้ $K = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ ($\omega = 1$) ต้องการให้การลดสัญญาณ -7 dB

$$\lim_{\omega \rightarrow 1} |T(j\omega)| = -7 \text{ dB}$$

จะได้ $K \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+b^2}} = 0.44668$ แทนค่า

$$K = 1$$

$$a = 0.316226b$$

จะได้

$$a = 0.8968$$

$$b = 2.8359$$

สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T(S) = \frac{S + 0.8968}{S + 2.8359} \quad (3.3.18)$$

ในการออกแบบวงจรเพื่อที่จะทำการหาค่า R, C ในวงจร เราต้องนำค่าในสมการที่ (3.3.16) และ (3.3.18) มาเทียบกัน จะได้

$$\frac{S + 0.8968}{S + 2.8359} = \frac{S + \frac{G_2 + G_o - G_v}{C_2}}{S + \frac{G_2 + G_o + G_v}{C_2}}$$

เมื่อต้องการการลดอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดที่ -10 dB กำหนดให้ $G_v = G_o$ จะได้

$$a = 0.8968 = \frac{G_2}{C_2}$$

$$b = 2.8359 = \frac{G_2 + 2G_o}{C_2}$$

เมื่อกำหนดให้ $G_o = 1 \text{ s}$

$$G_v = 1 \text{ s}$$

จะได้

$$G_2 = 0.9249 \text{ s}$$

$$C_2 = 1.0314 \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอิมพีแดนซ์

$$R_o = 1 \ \Omega$$

$$R_v = 1 \ \Omega$$

$$R_2 = 1.0812 \ \Omega$$

$$C_2 = 1.0314 \ F$$

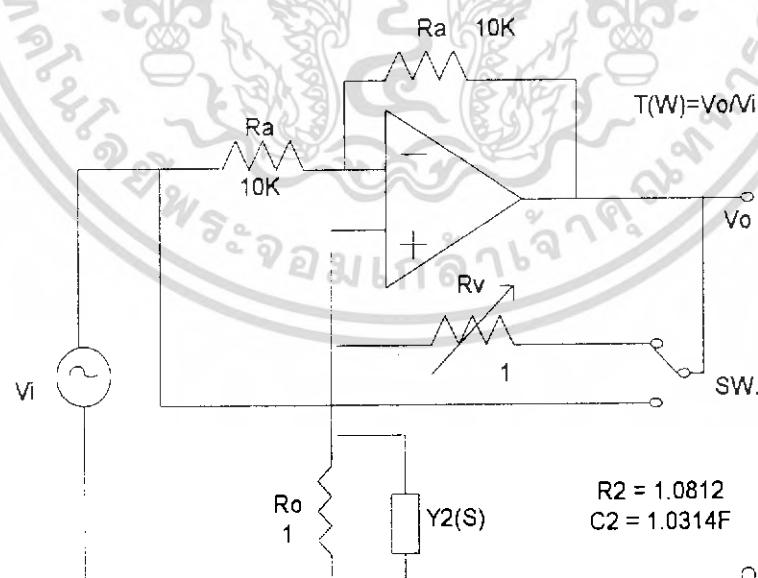
เพื่อให้ได้ค่าอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ตามในท้องตลาด เราจำเป็นต้องทำการสเกลทางขนาดเท่ากับ 10^5 และสเกลทางความถี่ให้มีการขยายและลดขนาดของสัญญาณทางด้านความถี่ต่ำอยู่ในช่วง 20 Hz - 500 Hz โดยต้องทำการสเกลทางความถี่เท่ากับ $2\pi * 500$ จะได้

$$R_o = 10K\Omega$$

$$R_v = 10K\Omega$$

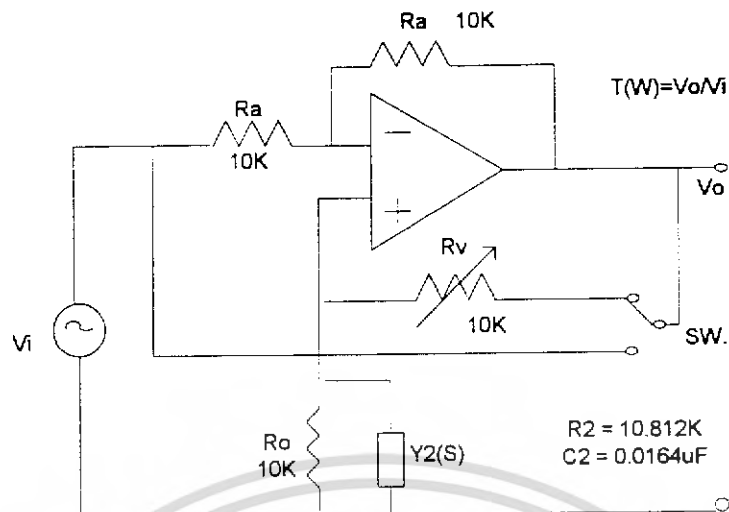
$$R_2 = 10812K\Omega$$

$$C_2 = 0.0164\ \mu F$$



รูปที่ 3.3.6 แสดงวงจรใช้งานก่อนการสเกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.7 แสดงวงจรใช้งานหลังการสเกล

ข. เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งสวิตช์ที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงการเพิ่มขนาดของสัญญาณ (Boost)

จากสมการ
$$T1(S) = \frac{1 + yH(S)}{1 - yH(S)} \quad (3.3.19)$$

เมื่อ
$$y = \frac{Gv}{Go}, \quad 0 \leq Gv \leq Go$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + \frac{Y2(S)}{Gv}}$$

$$Y2(S) = SC2 + G2$$

แทนค่า y , $H(S)$, $Y2(S)$ ลงในสมการ $T1(S)$

$$\begin{aligned} T1(S) &= \frac{1 + \frac{Gv}{Go} \cdot \frac{Go}{Go + Y2(S)}}{1 - \frac{Gv}{Go} \cdot \frac{Go}{Go + Y2(S)}} = \frac{1 + \frac{Gv}{Go + Y2(S)}}{1 - \frac{Gv}{Go + Y2(S)}} \\ &= \frac{Go + Y2(S) + Gv}{Go + Y2(S) - Gv} = \frac{SC2 + G2 + Go + Gv}{SC2 + G2 + Go - Gv} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \text{จะได้} \quad T1(S) = \frac{S + \frac{G2 + G0 + Gv}{C2}}{S + \frac{G2 + G0 - Gv}{C2}} \quad (3.3.20)$$

จากสมการที่ (3.3.16) นำมาเทียบกับสมการ $T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$ จะได้

$$K = 1$$

$$a = \frac{G2 + G0 + Gv}{C2}$$

$$b = \frac{G2 + G0 - Gv}{C2}$$

จากสมการ

$$T(S) = K \frac{S+a}{S+b}$$

จะได้

$$|T(j\omega)| = K \frac{\sqrt{S^2 + a^2}}{\sqrt{S^2 + b^2}}$$

$$|T(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |T(j\omega)|$$

ที่ความถี่ต่ำ ($\omega = 0$) ต้องการให้มีการลดขนาดของสัญญาณที่ +10 dB

จะได้

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(j\omega)| = +10 \text{ dB}$$

$$3.1622 = K \frac{a}{b}$$

$$a = \frac{3.1622b}{K}$$

(3.3.21)

ที่ความถี่สูง ($\omega = \infty$) ไม่ต้องการการลดสัญญาณ

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(j\omega)| = 0 \text{ dB}$$

จะได้

$$K = 1$$

ที่ ($\omega = 1$) ต้องการให้การลดสัญญาณ +7 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lim_{\omega \rightarrow 1} |T(j\omega)| = +7 \text{ dB}$$

จะได้ $K \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+b^2}} = 2.2387$ แทนค่า

$$K = 1$$

$$a = 3.16226b$$

จะได้

$$a = 2.8359$$

$$b = 0.8968$$

สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T(S) = \frac{S + 2.8359}{S + 0.8968} \quad (3.3.22)$$

ในการออกแบบวงจรเพื่อที่จะทำการหาค่า R , C ในวงจร เราต้องนำค่าในสมการที่ (3.3.20)

และ (3.3.22) มาเทียบกัน จะได้

$$\frac{S + 2.8359}{S + 0.8968} = \frac{S + \frac{G_2 + G_o + G_v}{C_2}}{S + \frac{G_2 + G_o - G_v}{C_2}}$$

จะได้

$$a = 2.8359 = \frac{G_2 + G_o + G_v}{C_2}$$

$$b = 0.8968 = \frac{G_2 + G_o - G_v}{C_2}$$

ต่อจากนั้นก็ทำการหาค่า G_2, C_2 เหมือนกับวิธีของ ข้อ ก. ดังที่ได้แสดงวิธีทำมาแล้ว แล้วทำการเปลี่ยนจาก G_2, C_2 ให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์

3.4 การออกแบบวงจรใช้งานจริงอันดับสอง (Second Order)

การออกแบบวงจรใช้งานจริงอันดับสองนี้เราใช้วิธีการ ซิงเกิ้ล แอมพลิฟายเออร์ (Single Amplifier)

โดยตัวอย่างที่นำมาสาธิตการสร้างวงจรนี้ จะเอามาจากสมการทางด้านความถี่สูงหรือเสียงแหลม ซึ่งทำการคิดที่ $|T(j\omega)|_{dB} = +10 \text{ dB}$

$$\therefore \text{จะได้สมการเป็น } T(S) = \frac{3.1623S^2 + 10S + 1}{S^2 + 10S + 1} = \frac{P(S)}{Q(S)}$$

$$\text{โดยกำหนดให้ } D(S) = (S+2)(S+5)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{P(S)}{D(S)} = Y1 - Y2, \quad \frac{Q(S)}{D(S)} = Y6 - Y5, \quad \frac{Q(S) - P(S)}{D(S)} = Y3 - Y4$$

$$\text{จะได้ } \frac{P(S)}{SD(S)} = \frac{3.1623S^2 + 10S + 1}{S(S+2)(S+5)} = \frac{A}{S} + \frac{B}{S+2} + \frac{C}{S+5}$$

หาค่า A, B, C ออกมาโดยการใช้เศษส่วนย่อย จะได้

$$A = 0.1$$

$$B = 1.058$$

$$C = 2.004$$

$$\therefore \frac{P(S)}{D(S)} = \frac{0.1S}{S} + \frac{1.058S}{S+2} + \frac{2.004S}{S+5} = Y1 - Y2$$

$$\text{จะได้ } Y1 = \frac{1}{10} + \frac{1}{0.945 + \frac{1}{0.529S}} + \frac{1}{0.499 + \frac{1}{0.4008S}}$$

$$Y2 = 0$$

$$\frac{Q(S)}{SD(S)} = \frac{S^2 + 10S + 1}{S(S+2)(S+5)} = \frac{D}{S} + \frac{E}{S+2} + \frac{F}{S+5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าของ D, E, F ออกมาโดยใช้เศษส่วนย่อย
จะได้

$$\begin{aligned} D &= 0.1 \\ E &= 2.5 \\ F &= -1.6 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{Q(S)}{D(S)} = \frac{0.1S}{S} + \frac{2.5S}{S+2} - \frac{1.6S}{S+5} = Y_6 - Y_5$$

จะได้
$$Y_6 = \frac{1}{10} + \frac{1}{0.4 + \frac{1}{1.25S}}$$

$$Y_5 = \frac{1}{0.625 + \frac{1}{0.32S}}$$

$$Y_3 - Y_4 = \frac{Q(S) - P(S)}{D(S)} = (Y_6 - Y_5) - (Y_1 - Y_2)$$

$$= \frac{1.442S}{S+2} - \frac{3.604S}{S+5}$$

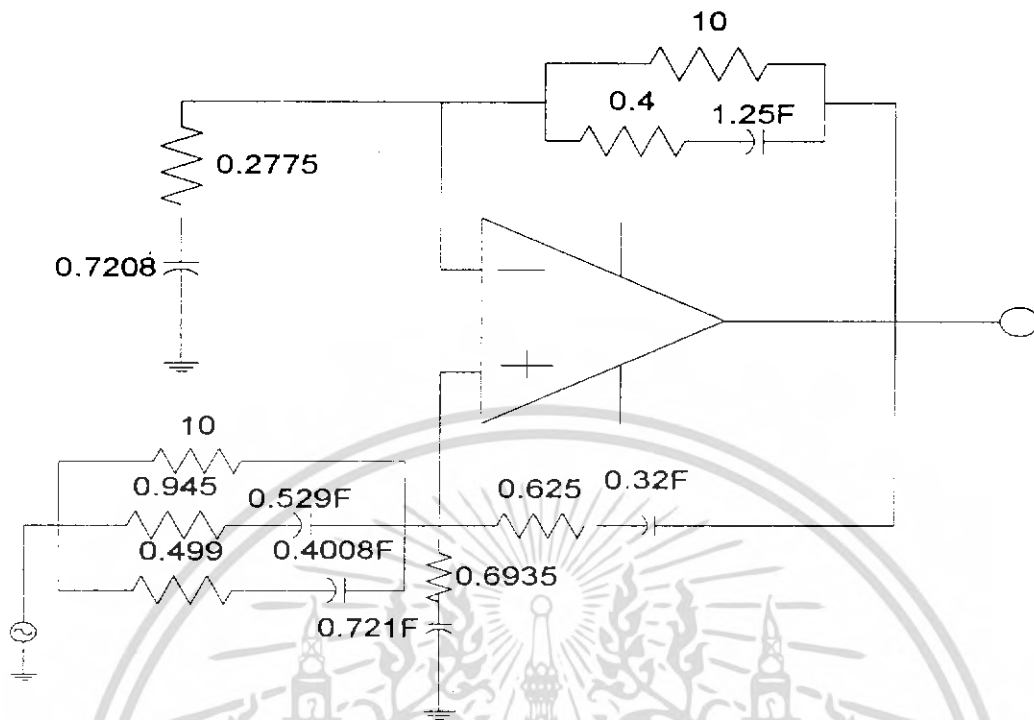
จะได้

$$Y_3 = \frac{1}{0.6935 + \frac{1}{0.721S}}$$

$$Y_4 = \frac{1}{0.2775 + \frac{1}{0.7208S}}$$

ต่อจากนั้นเราก็นำค่าที่ได้นี้ไปเขียนวงจรในรูปแบบมาตรฐานของ ซิงเกิ้ล แอมพลิฟายเออร์ โดยเรานำค่าของ R, C ที่ได้จากการคำนวณนี้ไปทำการสเกลทางขนาดและความถี่เสียก่อน เพื่อให้ได้ค่า R, C ตามที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.4.1 แสดงวงจรที่ได้จากการคำนวณ (ก่อนการสเกล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การจำลองการทำงานของวงจรโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

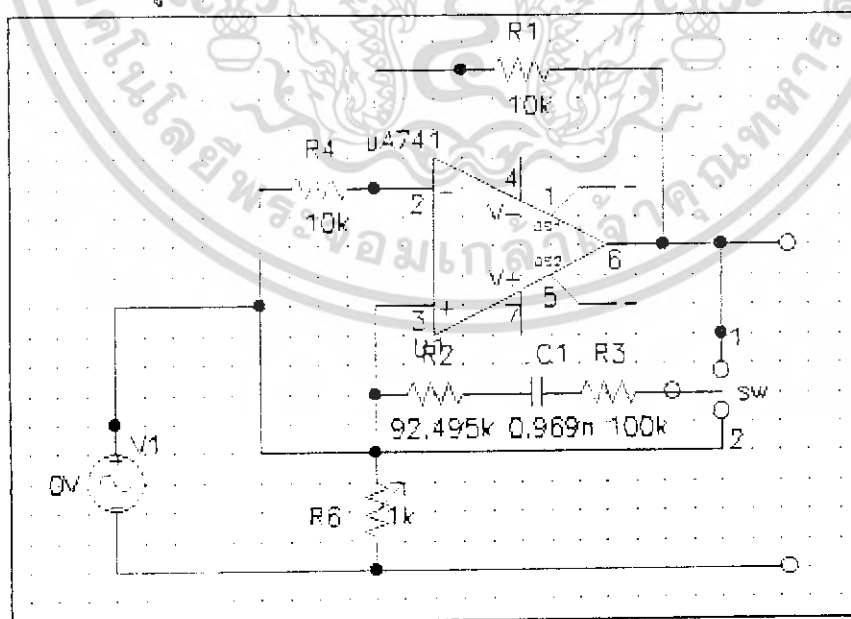
4.1 การจำลองการทำงานของวงจรโดยการใช้โปรแกรม Pspice

เราก็ทราบกันดีอยู่แล้วว่าโปรแกรม Pspice เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรที่เราทำการออกแบบก่อนจะนำไปสร้างวงจรจริง ซึ่งโปรแกรม Pspice เป็นเพียงโปรแกรมตรวจสอบความถูกต้องของวงจรที่เราออกแบบขึ้นมา ว่าผลการทำงานของวงจรตรงกับทฤษฎีหรือไม่ ถ้าเรากำหนดวงจรถูกต้องผลการจำลองของโปรแกรมก็จะออกมาตามที่เรต้องการ และโปรแกรม Pspice นี้จะเป็นตัวยืนยันความถูกต้องของวงจรก่อนที่จะทำการต่อวงจรจริงถ้าวงจรที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ถูกต้องเราก็สามารถที่จะต่อวงจรจริงตามนั้นได้เลย แต่ถ้าวงจรที่เราทำการจำลองผิดเราก็สามารถทำการแก้ไขได้ก่อนที่จะต่อวงจรจริง ซึ่งจะทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการต่อวงจรจริง

ในบทนี้เรานำโปรแกรม Pspice มาใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรอันดับหนึ่ง (First Order) และวงจรอันดับสอง (Second Order) ที่เราได้ทำการออกแบบขึ้นมาก่อนที่เราจะทำการต่อวงจรจริง ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะทำการแสดงอยู่ในรูปหน้าต่างไป โดยแยกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

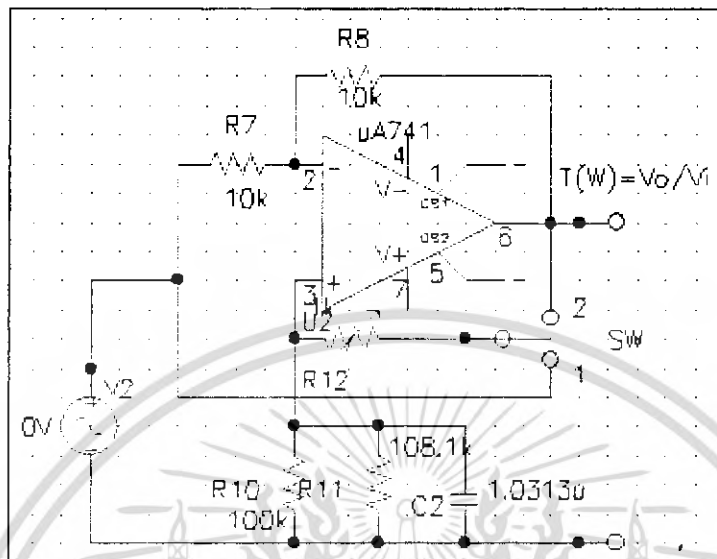
4.1.1 การจำลองการทำงานของวงจรอันดับหนึ่ง (First Order)

วงจรที่เราใช้ในการจำลองการทำงานหลังจากที่ได้ออกแบบแล้วในบทที่ 3 แสดงดังต่อไปนี้ โดยสวิตช์ 1 จะเป็นด้านบู้ท , สวิตช์ 2 ด้านคัท



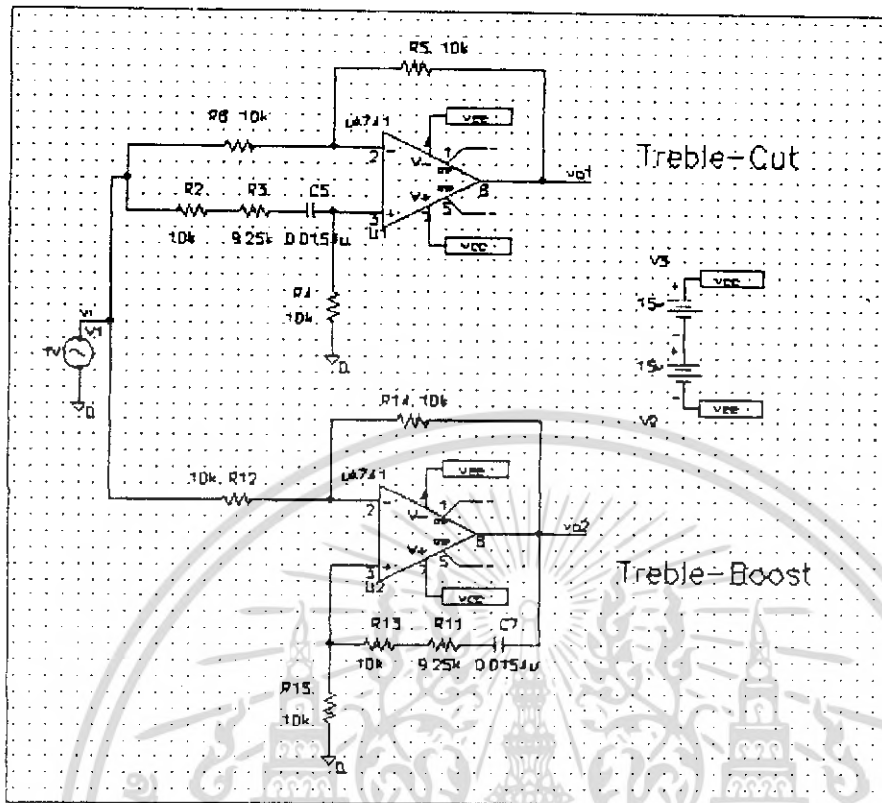
รูปที่ 4.1.1.1 แสดงวงจรเสียงแหลม (Treble) ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

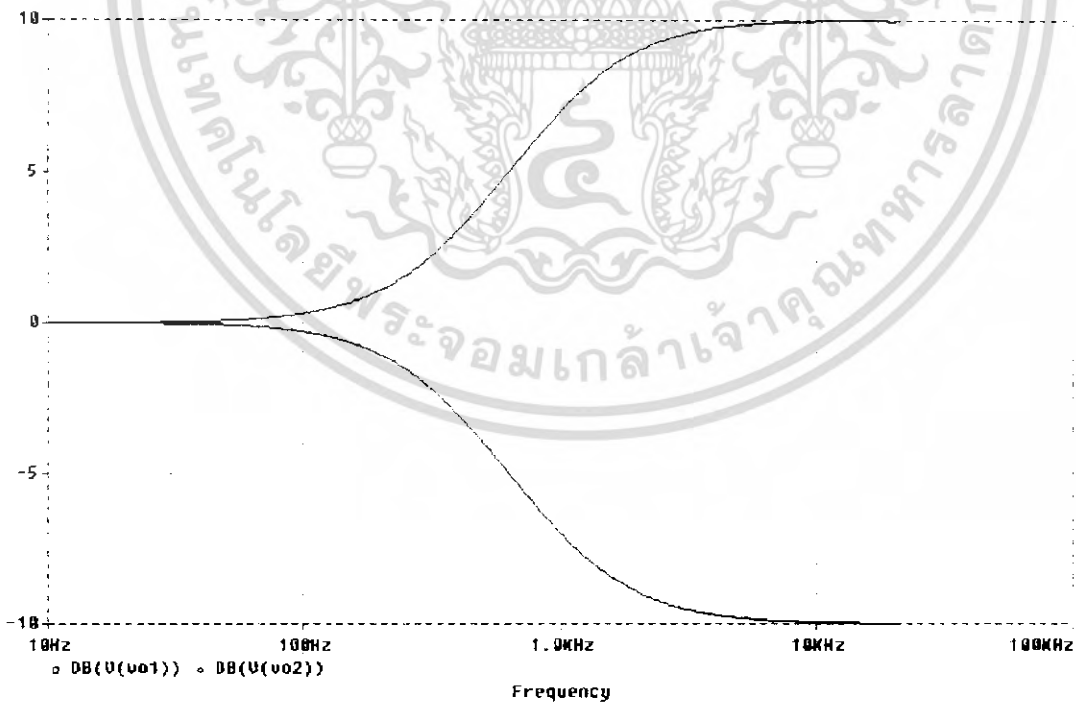


รูปที่ 4.1.1.2 แสดงวงจรเสียงทุ้ม (Bass) ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองจะทำการจำลองการทำงานของวงจรหาผลตอบสนองทางแอมพลิจูดต่อความถี่ของวงจร โดยวงจรนี้จะมีการสับสวิตช์ระหว่าง สวิตช์ 1 กับสวิตช์ 2 ดังรูป เพื่อหาผลตอบสนองของวงจรทั้งทางด้านนิวส์และด้านคัท ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปหน้าถัดไป

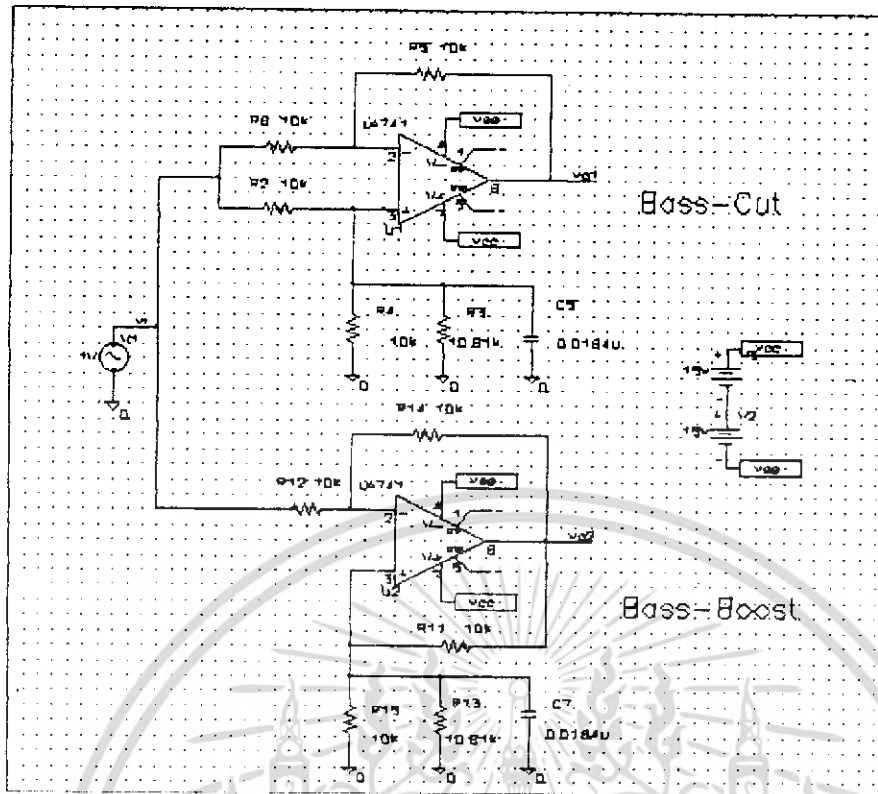


รูปที่ 4.1.1.3 แสดงวงจรเสียงแหลม (treble) เมื่อ sw. อยู่ ที่ 1 และ 2 ที่ $\pm 10\text{dB}$

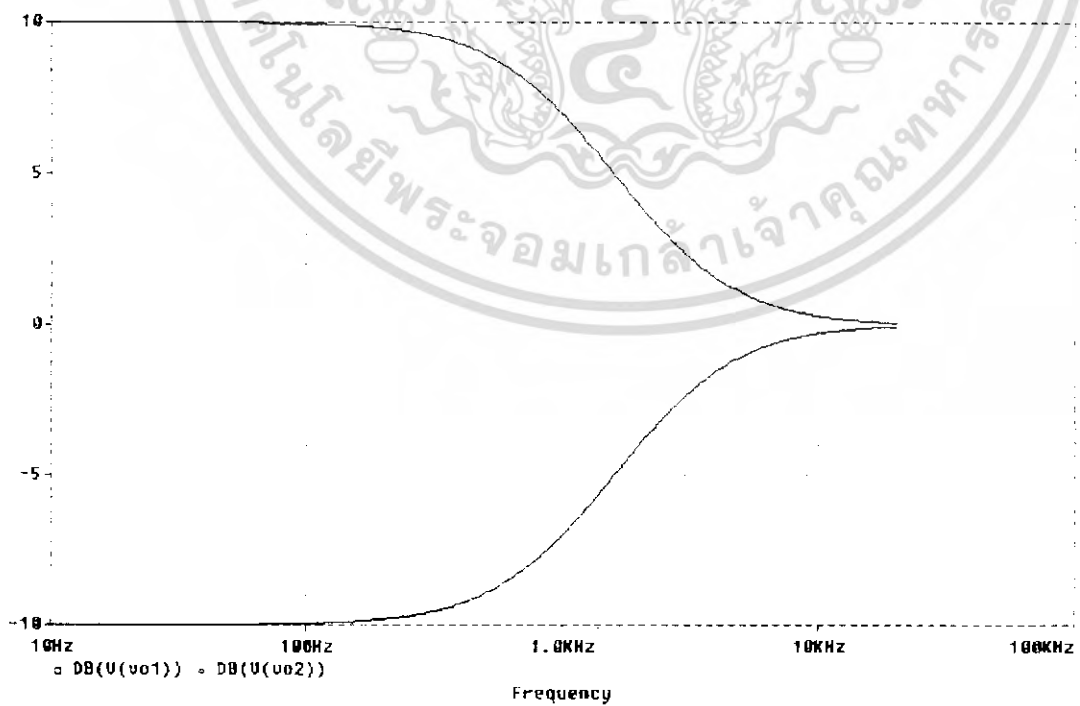


รูปที่ 4.1.1.4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่และแอมพลิจูดเสียงแหลม (treble) เมื่อ sw. อยู่ ที่ 1 และ 2 ที่ $\pm 10\text{dB}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

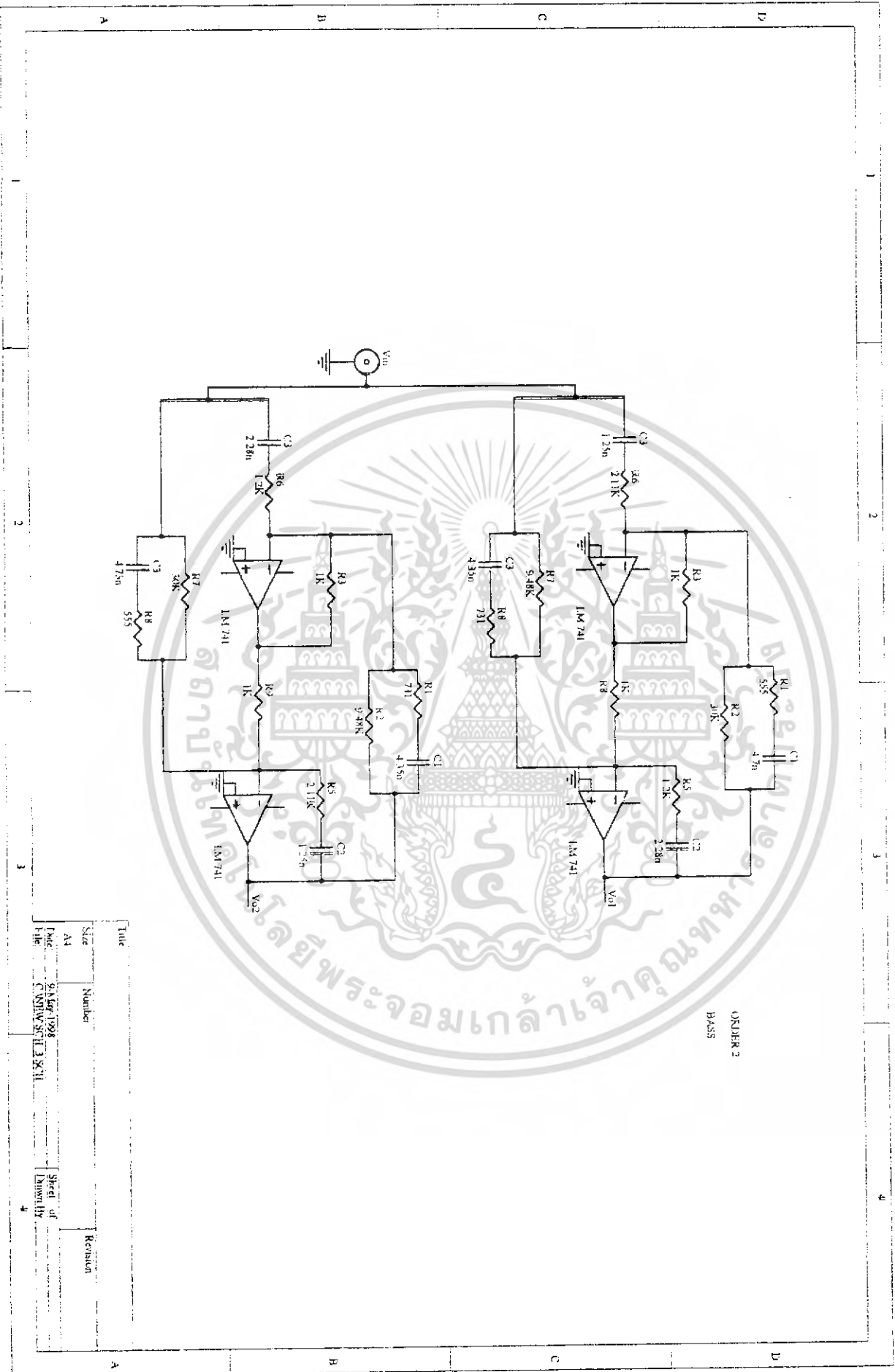


รูปที่ 4.1.1.5 แสดงวงจรเสียงทุ้ม (bass) เมื่อ sw. อยู่ที่ 1 และ 2 ที่ ± 10 dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.1.1.6 แสดงผลตอบสนองของทางความถี่และแอมพลิจูดเสียงทุ้ม (bass) เมื่อ sw. อยู่ที่ 1 และ 2 ที่ ± 10 dB
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1.2.1 แสดงวงจรอินทรีย์ของทางคำนวณเสียงทุ้ม



Time	Number	Revision
Size	A4	
Date	24 Nov 1998	
File	C:\MSW\SR\T.3.K.11	
Speed of	10000	
Printed by		

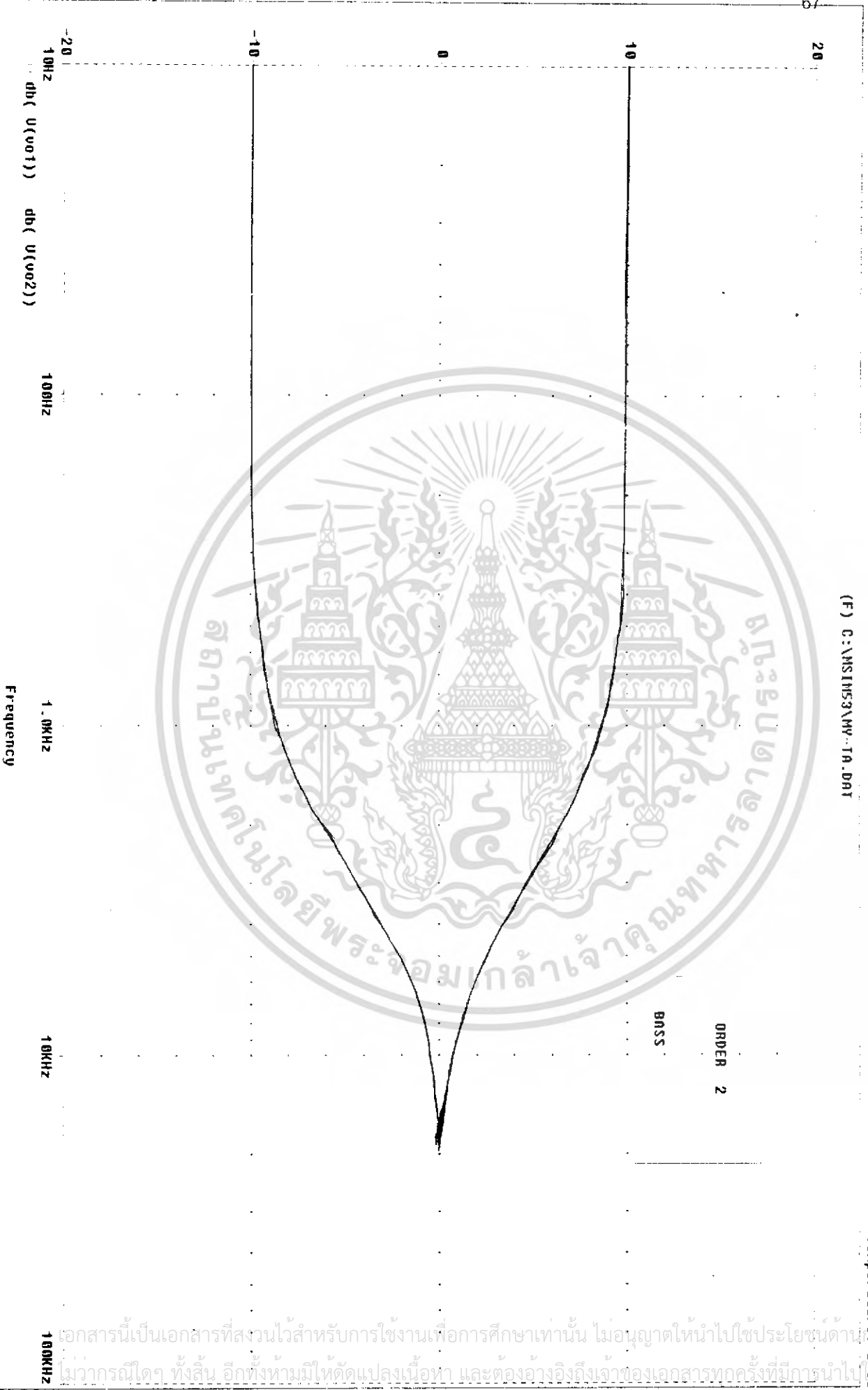
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date/Time run: 04/24/98 04:35:49

รูปที่ 4.1.2.2 แสดงกราฟที่ได้จากโปรแกรม Psipice ทางด้านเสียงทุ้ม (Bass)

(F) C:\NSIMS3\MV-1A.dat

Temperature: 27.0



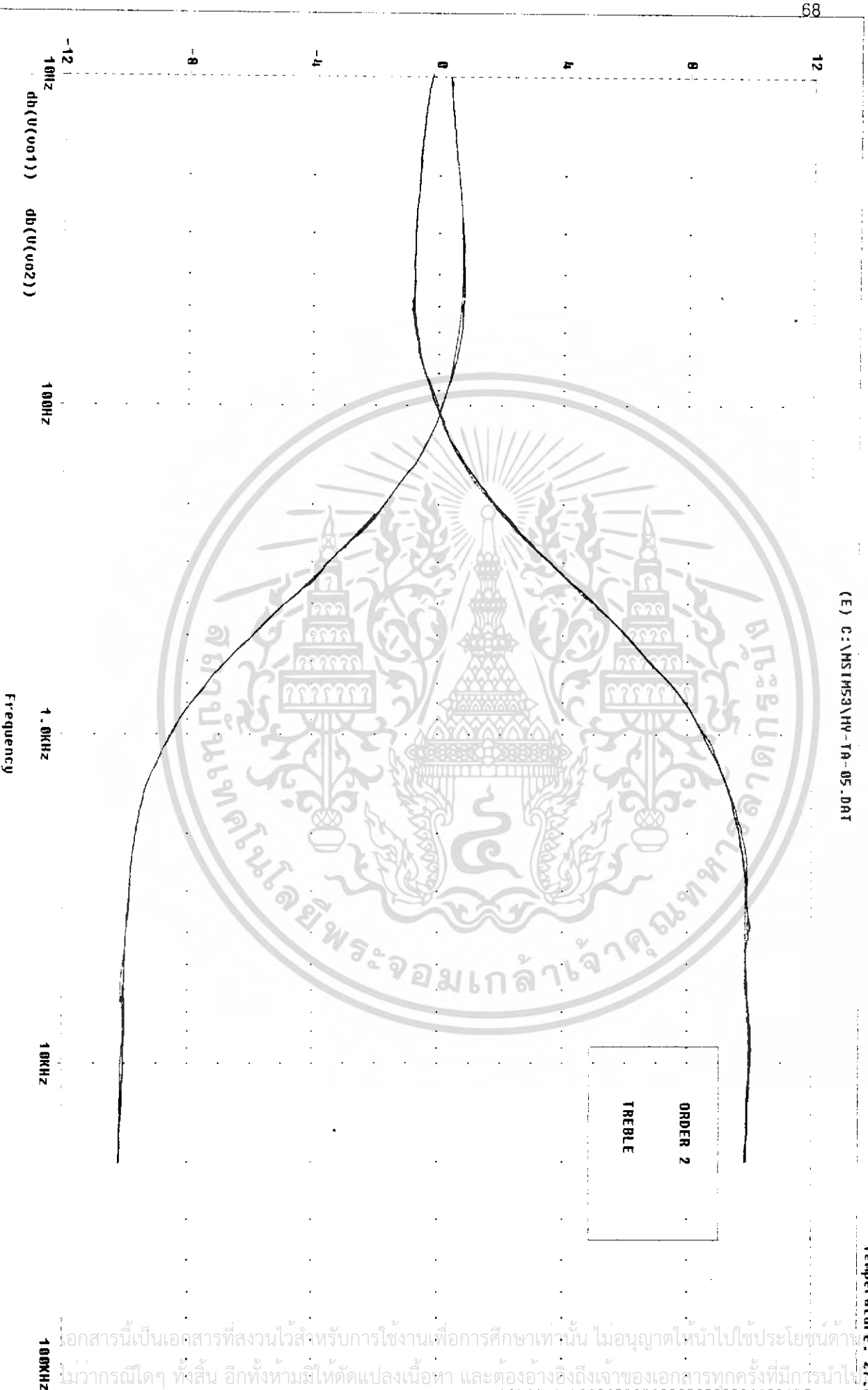
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป

Date/Time run: 04/24/98 03:53:36

รูปที่ 4.1.2.4 แสดงกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงแหลม (Treble)

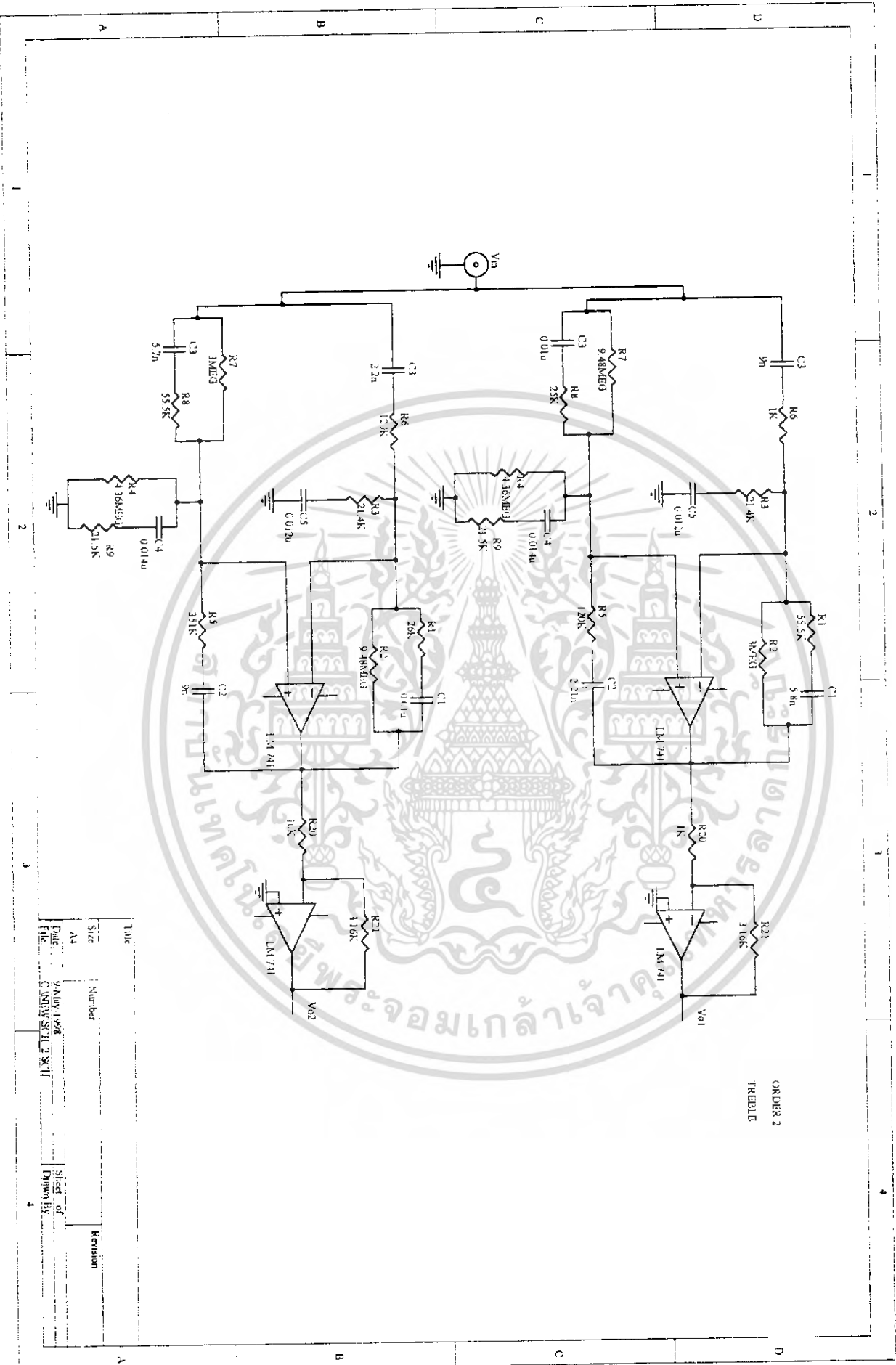
(E) C:\MSIM53\HW-1A-05.DAT

Temperature: 27.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป

รูปที่ 4.1.2.3 แสดงวงจรอินทิเกรตทางคัมพิยงเทตม



Title	Number	Revision
Size A4	9-AMV-1998	Sheet of 1
File C:\MSW\SR\1.2.SCH	Drawn By	Checked By

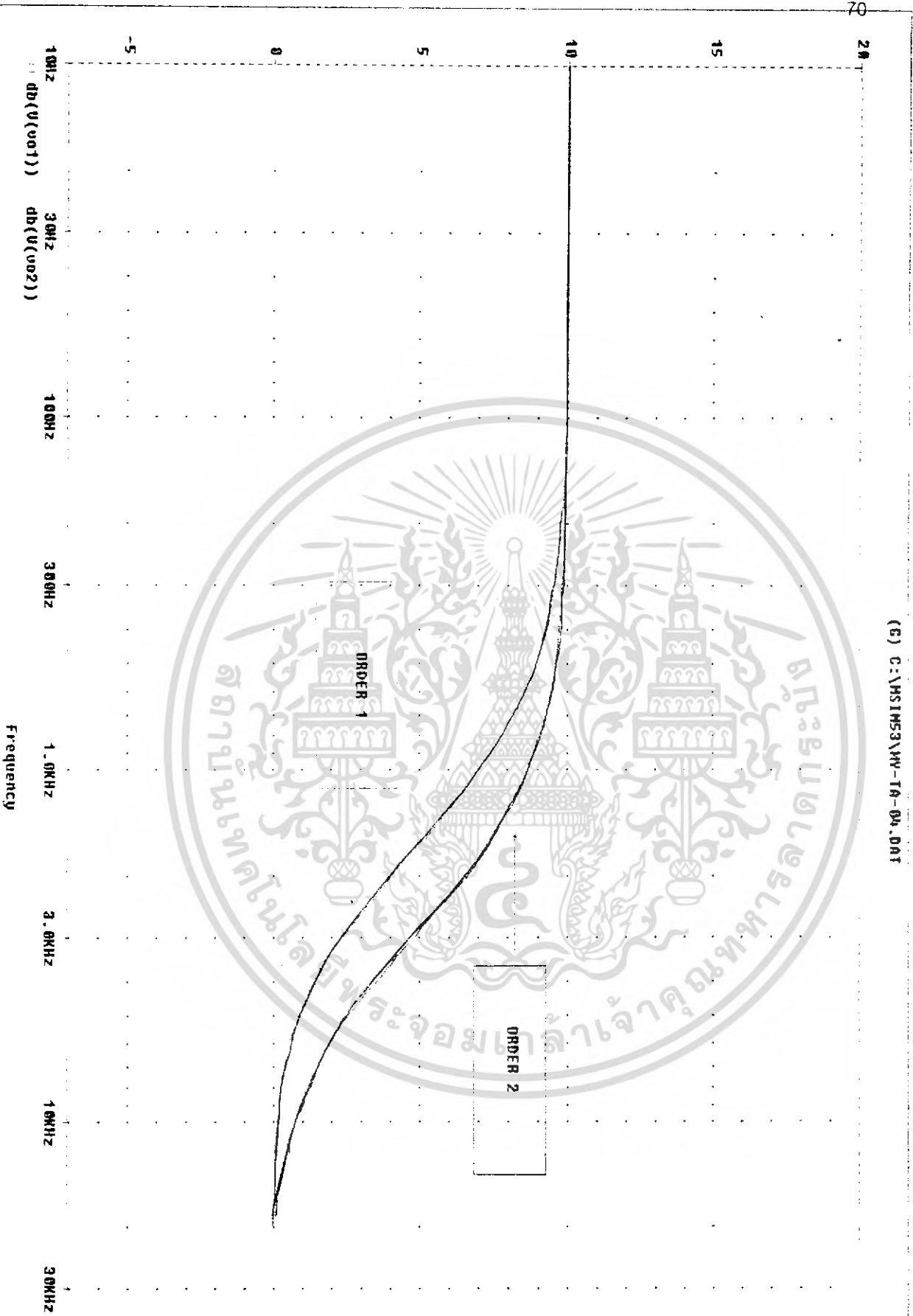
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date/Time run : 04/23/98 06:27:57

รูปที่ 4.1.2.5 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างวงจรมอดูเลเตอร์กับวงจรมอดูเลเตอร์

(G) C:\MSIMS3\HW-TR-04.DAT

Temperature : 27.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป

4.1.2 การจำลองการทำงานของวงจรอันดับสอง (Second Order)

การจำลองการทำงานของวงจรอันดับสองด้วยโปรแกรม Pspice ก็มีหลักการในการปฏิบัติเช่นเดียวกับวงจรอันดับหนึ่ง แต่เส้นกราฟที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรอันดับสองจะมีความชันมากกว่าวงจรอันดับหนึ่ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอ็ควอไลเซอร์อันดับสองย่อมดีกว่าวงจรอ็ควอไลเซอร์ของวงจรอันดับหนึ่งด้วย ซึ่งรูปวงจรการทำงานของวงจรอ็ควอไลเซอร์อันดับสอง และกราฟที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรแสดงดังต่อไปนี้

1. วงจรอันดับสองทางด้านเสียงทุ้ม แสดงดังรูปที่ 4.1.2.1
2. กราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงทุ้ม แสดงดังรูปที่ 4.1.2.2
3. วงจรอันดับสองทางด้านเสียงแหลม แสดงดังรูปที่ 4.1.2.3
4. กราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงแหลม แสดงดังรูปที่ 4.1.2.3

4.2 การจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) เป็นซอฟต์แวร์ประสิทธิภาพสูงใช้สำหรับการคำนวณต่าง ๆ ในเชิงคณิตศาสตร์ทั้งทางวิศวกรรมศาสตร์ และทางวิทยาศาสตร์ MATLAB เริ่มแรกถูกใช้เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการคำนวณที่ต้องใช้ matrix แต่ปัจจุบัน MATLAB ได้ถูกนำมาใช้กว้างขวางมากขึ้น โดยเฉพาะการนำมาใช้ในการพล็อตกราฟตามรูปแบบต่าง ๆ ของสมการที่กำหนดขึ้นมา ตามวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน

ในบทนี้เราได้้นำ MATLAB มาใช้ในการพล็อตกราฟที่ได้จากสมการที่เราคำนวณขึ้นมา จากบทข้างต้น การที่เราใช้ MATLAB ทำการพล็อตกราฟออกมาก็เพื่อนำกราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีว่ากราฟที่ได้จากสมการที่เราคำนวณขึ้นนี้ ตรงตามทฤษฎีหรือไม่ก่อนที่จะนำสมการนี้ไปทำการสร้างวงจร โดยการใช้ทฤษฎีของเนตเวิร์คฟังก์ชันหาค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรออกมา โดยกราฟที่ได้จาก MATLAB เป็นดังนี้

1. กราฟของสมการอันดับหนึ่ง (First Order)

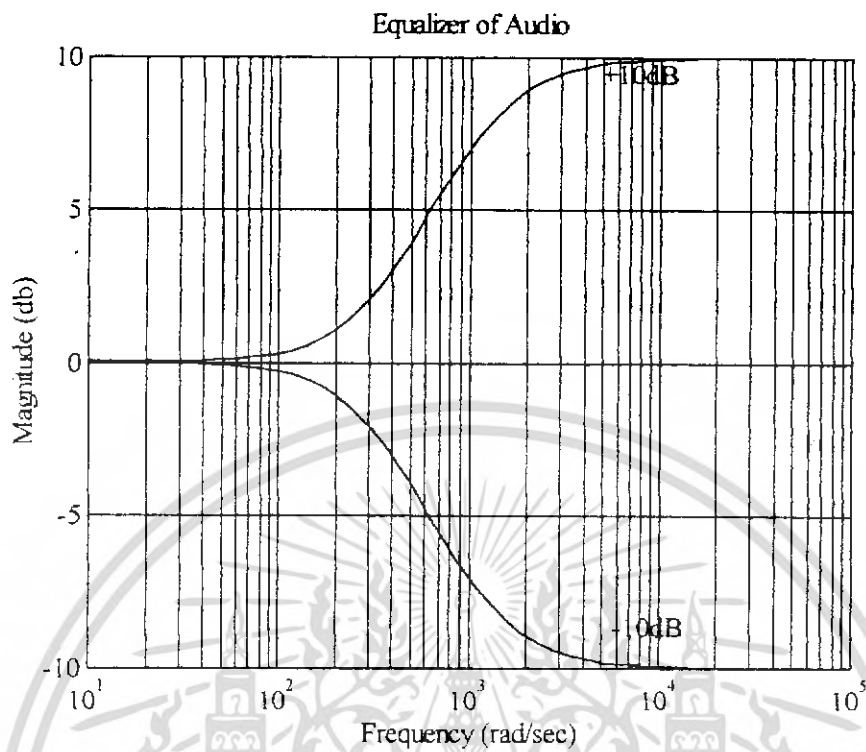
1.1 กราฟของสมการด้านเสียงแหลม (Treble) แสดงดังรูปที่ 4.2.1

1.2 กราฟของสมการด้านเสียงทุ้ม (Bass) แสดงดังรูปที่ 4.2.2

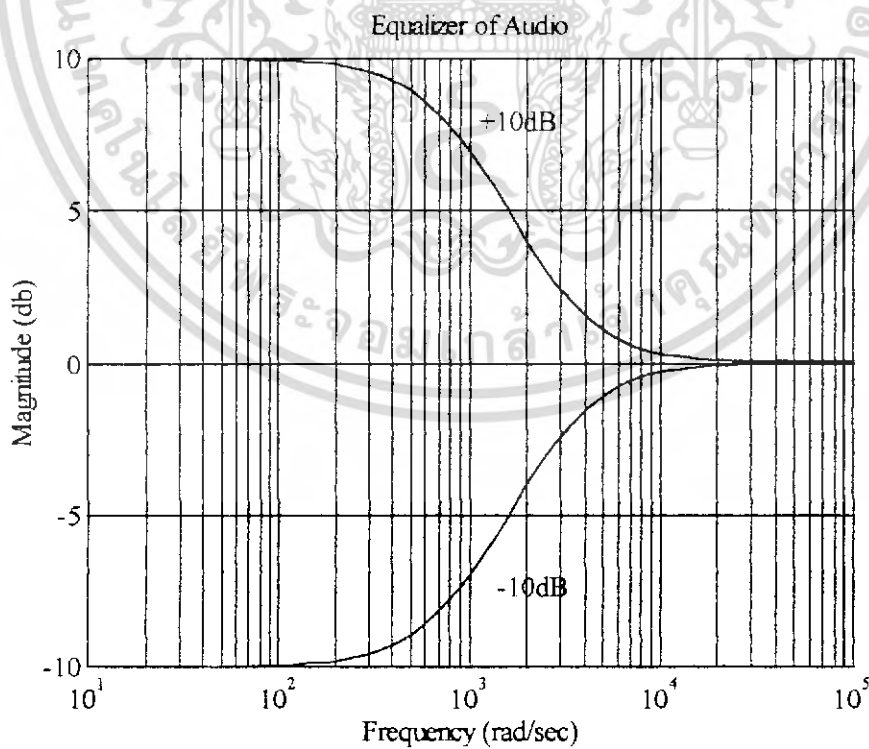
2. กราฟของสมการอันดับสอง (Second Order)

1.1 กราฟของสมการด้านเสียงแหลม (Treble) แสดงดังรูปที่ 4.2.3

1.2 กราฟของสมการด้านเสียงทุ้ม (Bass) แสดงดังรูปที่ 4.2.4

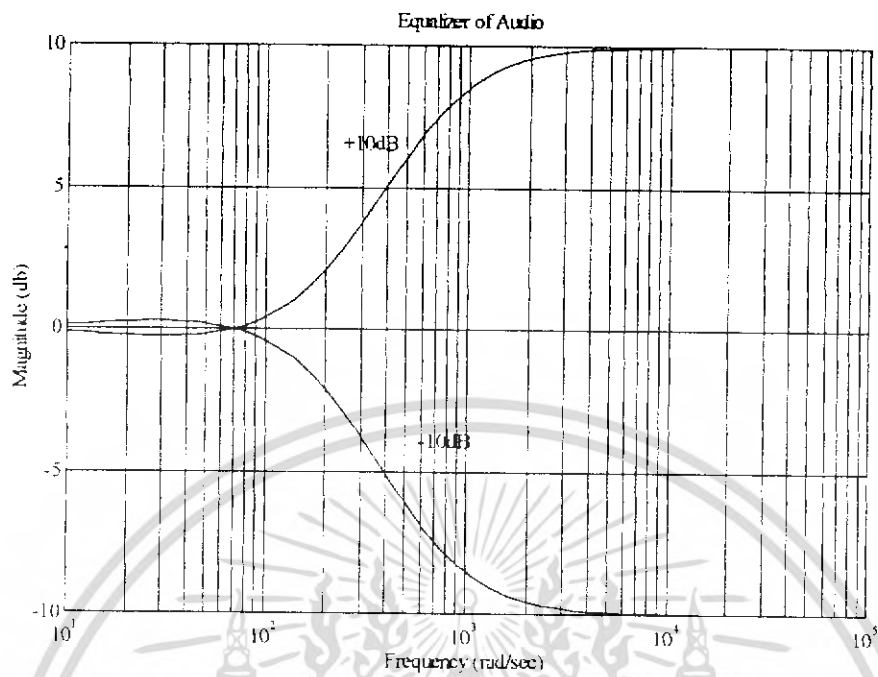


รูปที่ 4.2.1 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่เสียงแหลมที่ ± 10 dB (order 1)

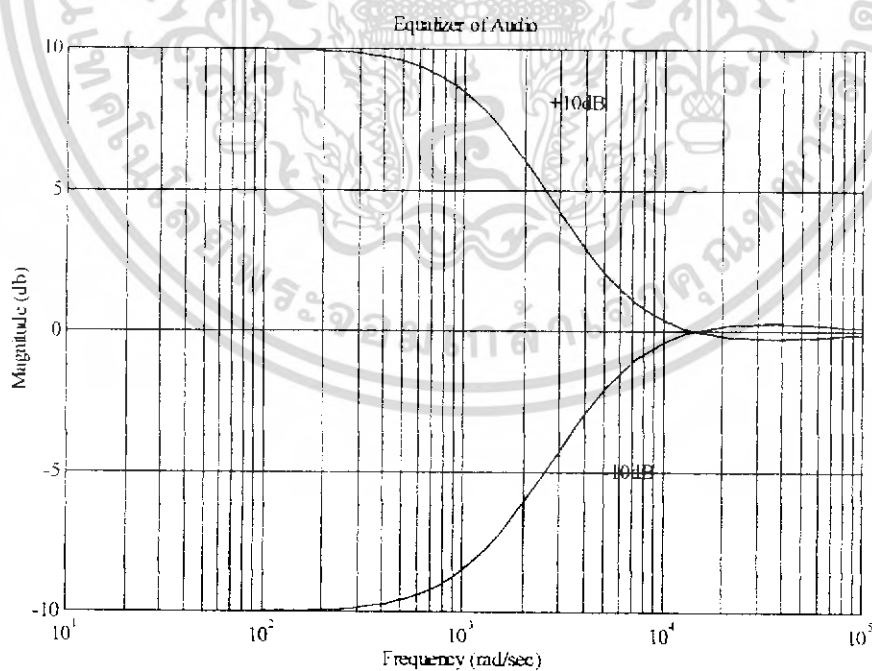


รูปที่ 4.2.2 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่เสียงทุ้มที่ ± 10 dB (order 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

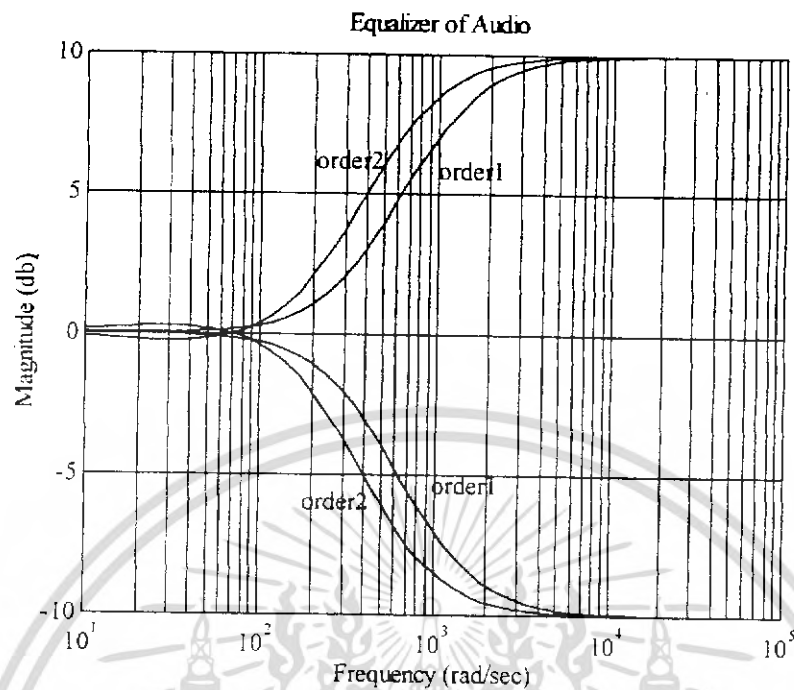


รูปที่ 4.2.3 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่เสียงแหลมที่ ± 10 dB (order 2)

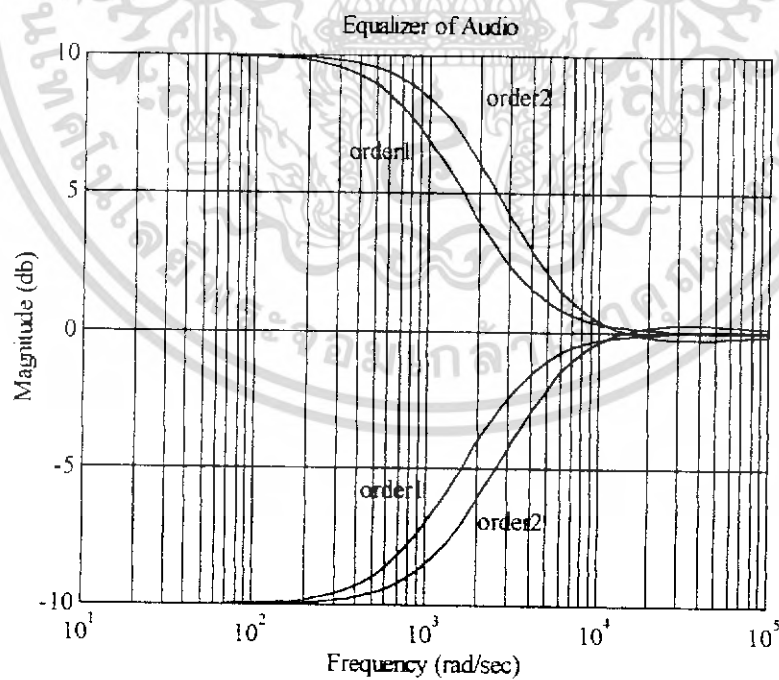


รูปที่ 4.2.4 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่สูงที่ ± 10 dB (order 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.5 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่เชิงแหลม
เปรียบเทียบกันระหว่าง order1 และ order2



รูปที่ 4.2.6 แสดงผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและความถี่เชิงหุ้ม

เปรียบเทียบกันระหว่าง order1 และ order2

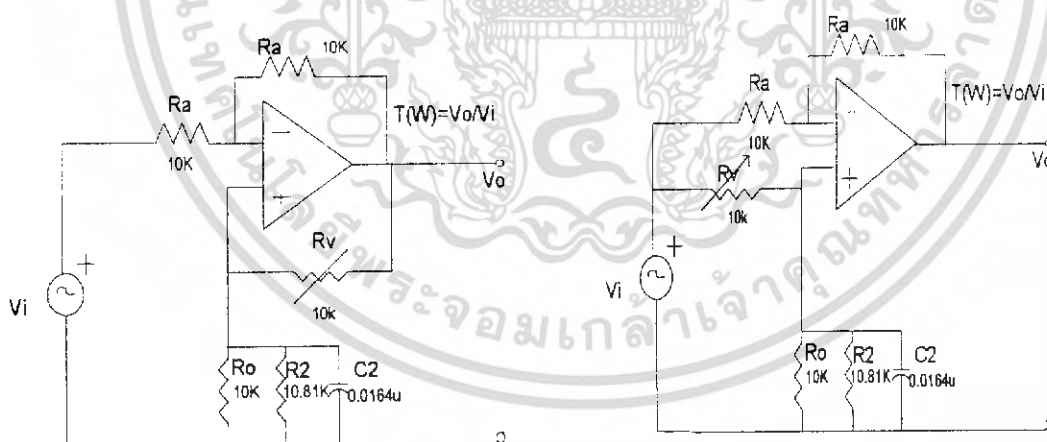
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและการทดสอบการทำงานของวงจร

ในบทนี้เป็นการนำวงจรที่ได้จากการออกแบบมาทำการทดลอง และทำการทดสอบการทำงาน ของวงจรด้วย เครื่อง ออติโค อนุไลเซอร์ ซึ่งเราได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตจากเครื่อง ออติโค อนุไลเซอร์ เข้าไปในวงจรการทดลอง ต่อจากนั้นก็ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก วงจรการทดลองด้วยเครื่อง ออติโค อนุไลเซอร์ แล้วป้อนคำสั่งให้เครื่อง ออติโค อนุไลเซอร์ ทำ การพล็อตสัญญาณออกมาอยู่ในรูปของ ระดับของ dBu กับความถี่ (Level vs. Frequency) เพื่อ ที่จะเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวงจรจริง กับผลการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้จาก โปรแกรม Pspice ในบทที่แล้วว่าผลที่ได้ออกมาเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร

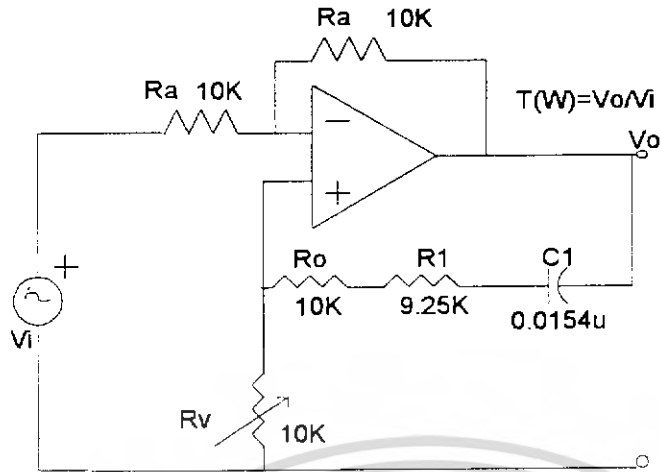
5.1 การทดลองวัดสัญญาณของวงจรอันดับหนึ่ง (First Order)



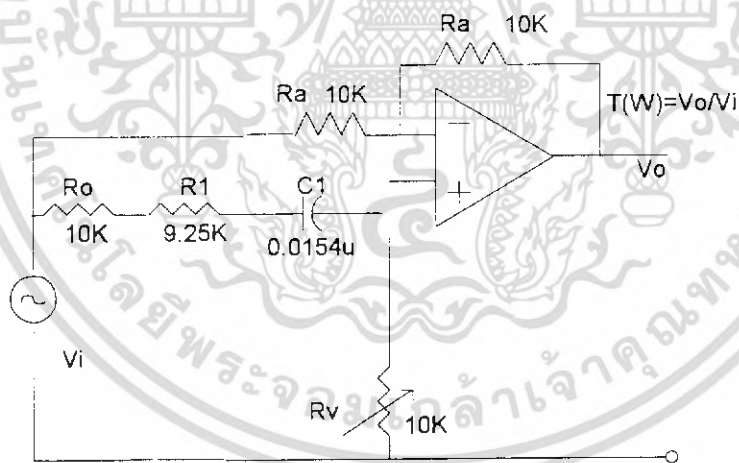
รูปที่ 5.1.1 แสดงวงจรเสียงท่อมช่วงสัญญาณมีท

รูปที่ 5.1.2 แสดงวงจรเสียงท่อมช่วงสัญญาณคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.3 แสดงวงจรเสียงช่วงสัญญาณบีท

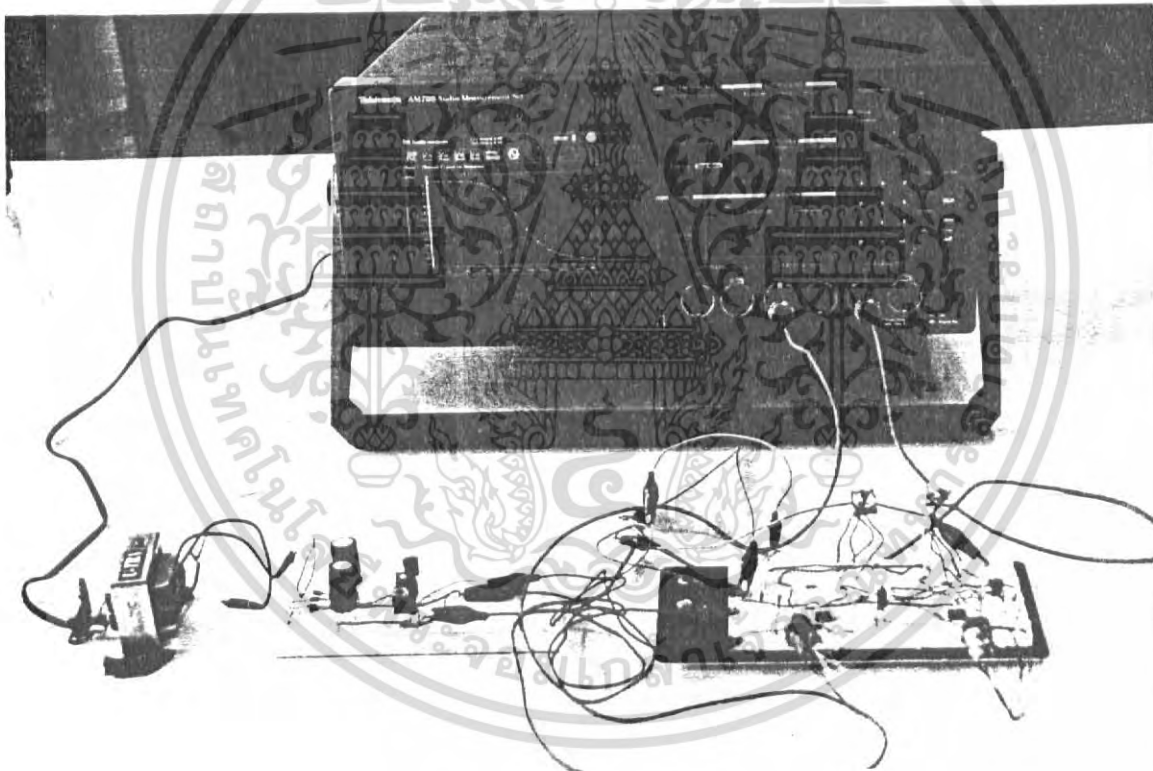


รูปที่ 5.1.4 แสดงวงจรเสียงแหลมช่วงสัญญาณคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

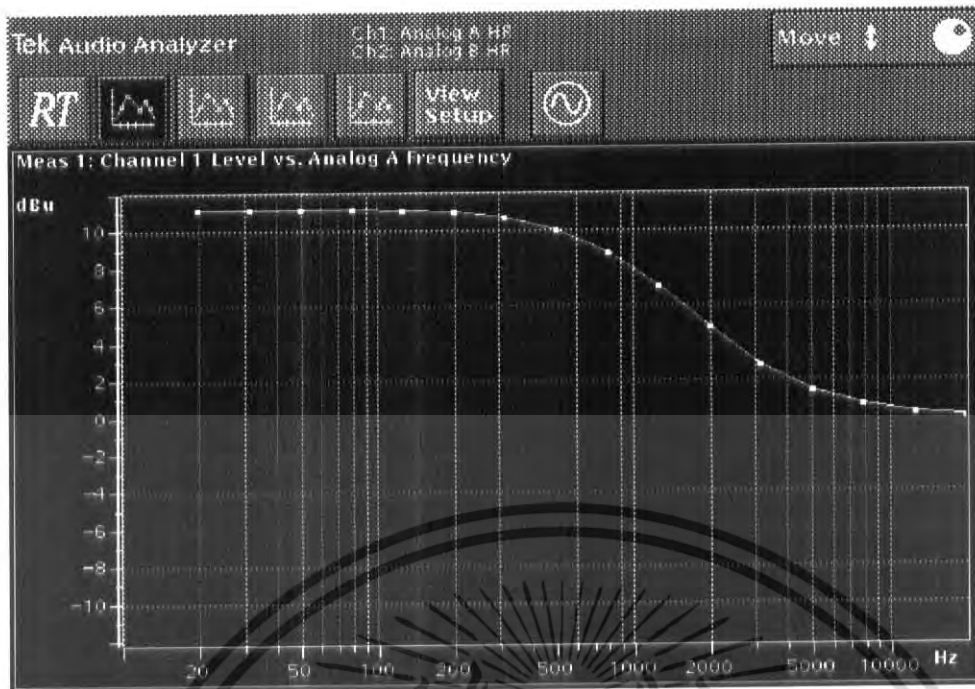
5.1.1 การทดลองโดยใช้เครื่องออดิโอ อนาลิเซอร์

1. ทำการต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปข้างล่าง
2. ทำการเซ็ทค่าตัวแปรต่าง ๆ ในเครื่องออดิโอ อนาลิเซอร์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการวัดค่าต่าง ๆ ภายในวงจร
3. ทำการป้อนสัญญาณอินพุทจากเครื่องออดิโอ อนาลิเซอร์ เข้าไปในวงจรการทดลอง ในขณะที่เดียวกันก็จ่ายไฟดีซี ± 15 โวลต์ จากวงจรเรกกูเลเตอร์เข้าไปเลี้ยงวงจรด้วย
4. ทำการวัดขนาดต่อความถี่ของสัญญาณที่ทางค่านเอาต์พุท แล้วบันทึกสัญญาณที่ได้ลงในแผ่นดิสก์ ต่อจากนั้นก็ทำการนำแผ่นดิสก์นั้นมาเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์แล้วทำการปริ้นท์รูปภาพของสัญญาณที่ได้ออกมา



รูปที่ 5.1.7 แสดงวงจรการทดลองต่อเข้ากับเครื่องออดิโอ อนาลิเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

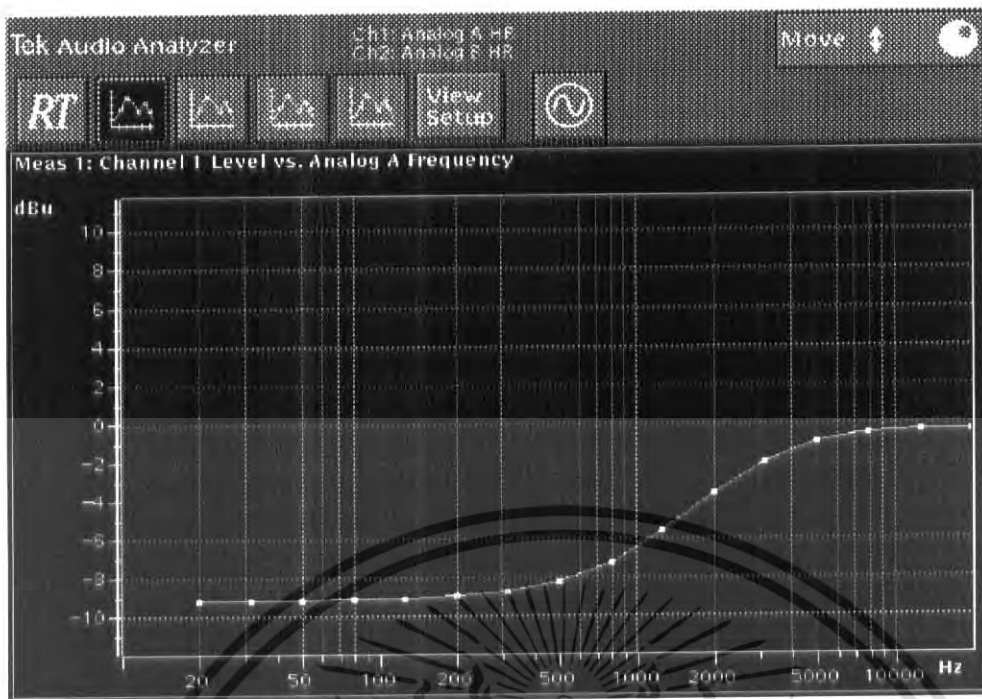


5.1.1.1 การวัดวงจรทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) ช่วงบูท

Frequency (Hz)	Level (dBu)
20.00	11.18
31.76	11.18
50.20	11.17
79.80	11.16
126.20	11.11
200.00	10.98
317.00	10.89
502.40	10.75
796.20	8.81
1261.90	6.53
2000.00	4.77
3183.00	2.77
5023.00	1.41
7962.10	0.61
12619.10	0.18
20000.00	-0.06

รูปที่ 5.1.1 แสดงกราฟและตารางที่ได้จากเสียงทุ้มช่วงบูท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

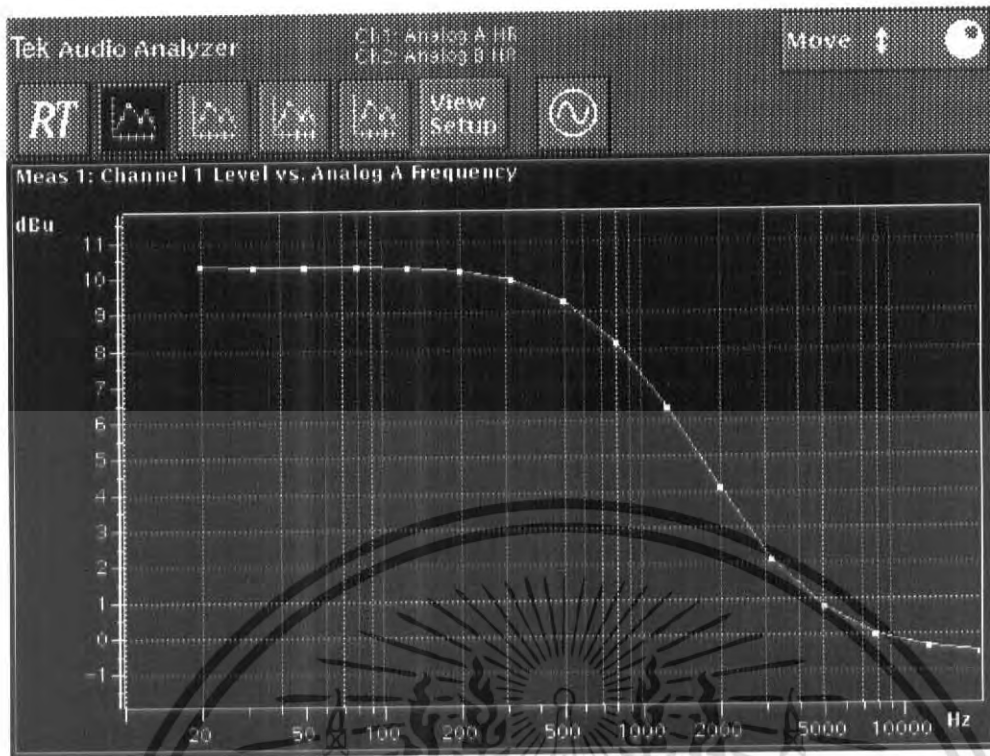


รูปที่ 5.1.2 แสดงกราฟของเสียงทุ้มช่วงคัท

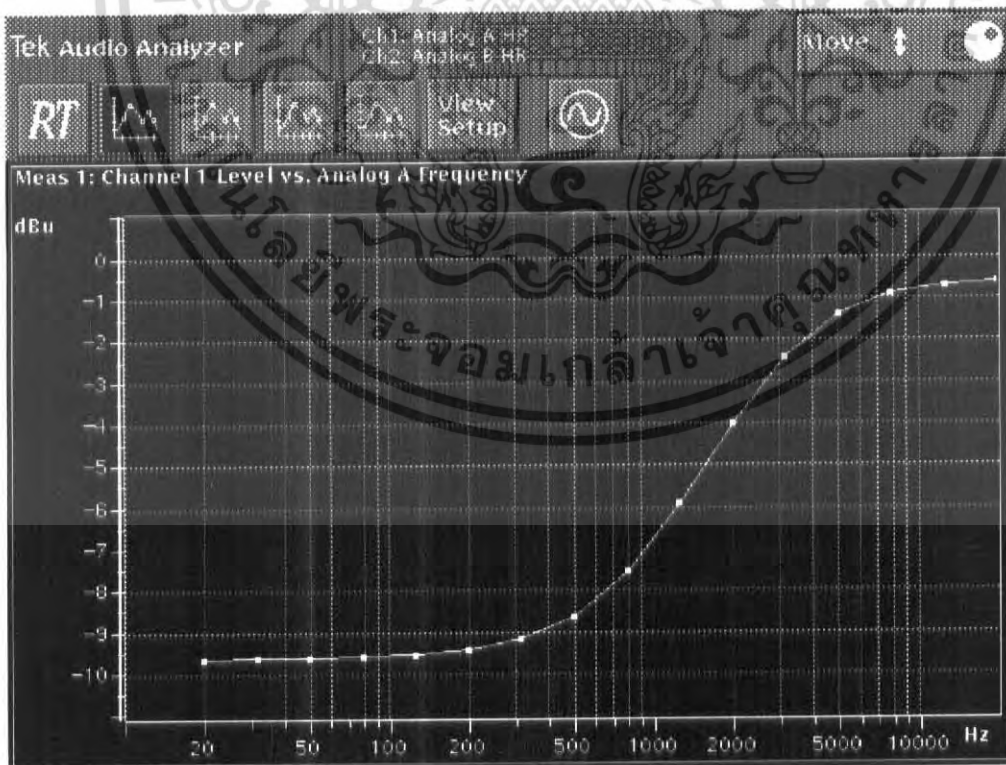


รูปที่ 5.1.3 แสดงตารางของเสียงทุ้มช่วงคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

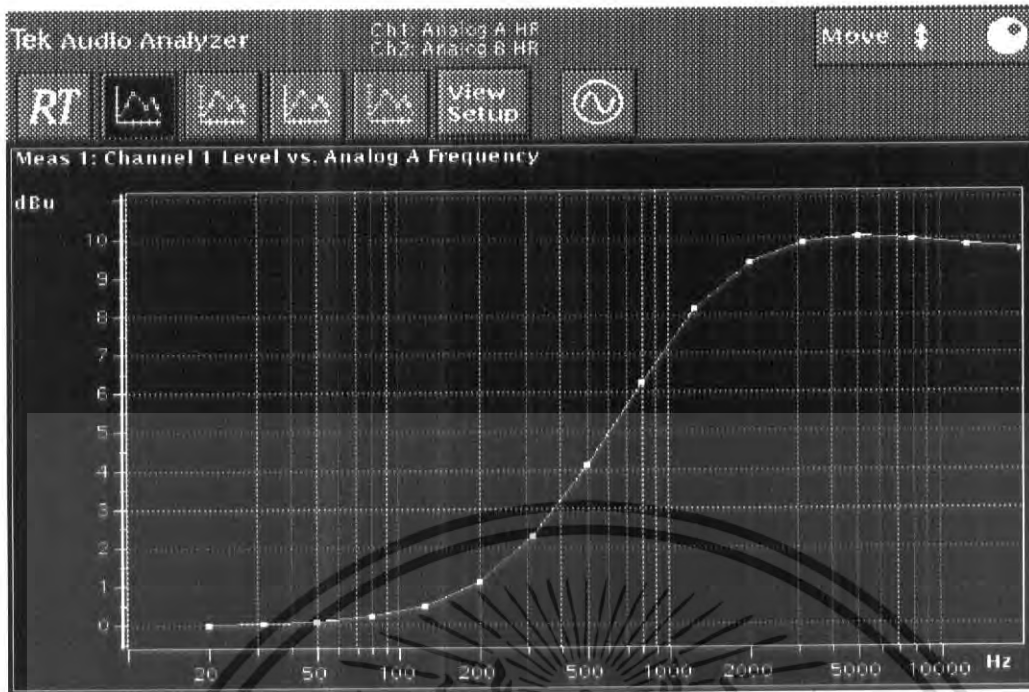


รูปที่ 5.1.4 แสดงกราฟของวงจรถอไอเซอร์ทางด้านเสียงทุ้ม(Bass)ช่วงมีท



รูปที่ 5.1.5 แสดงกราฟของวงจรถอไอเซอร์ทางด้านเสียงทุ้ม(Bass)ช่วงคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



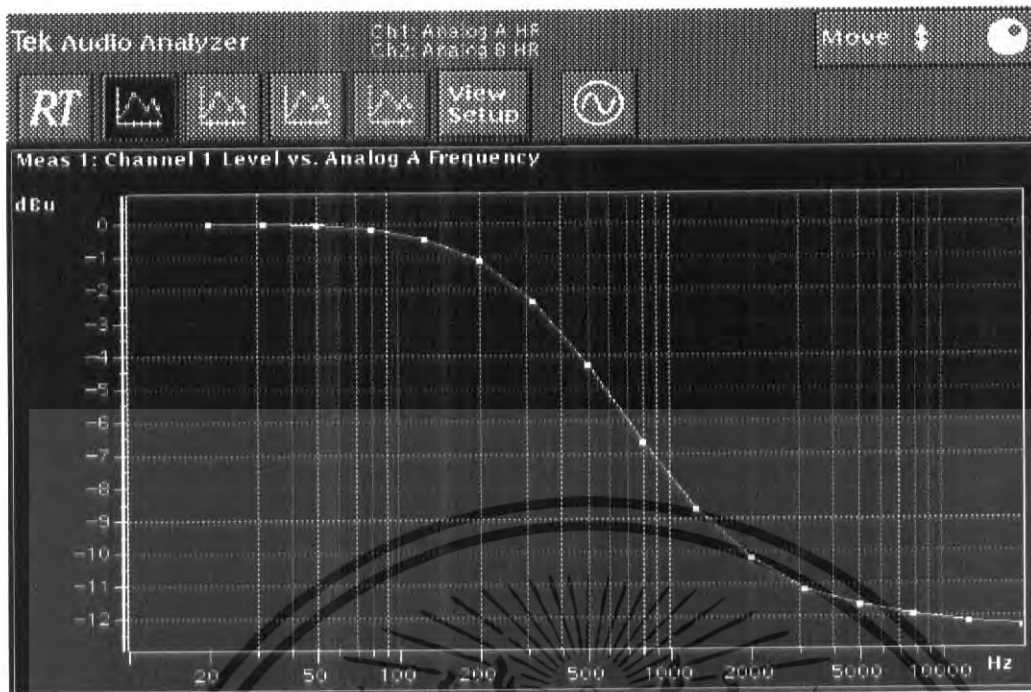
รูปที่ 5.1.6 แสดงกราฟที่ได้จากเสียงแหลมช่วงบูท

Channel 1 Level vs. analog A Frequency

Frequency (Hz)	Level (dBu)
20.00	0.02
31.74	0.05
50.20	0.10
79.60	0.22
126.20	0.50
200.00	1.12
317.00	2.31
502.40	4.13
796.20	6.25
1261.00	8.16
2000.00	9.94
3169.00	9.80
5023.00	9.67

รูปที่ 5.1.7 แสดงตารางที่ได้จากเสียงแหลมช่วงบูท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.8 แสดงกราฟของเสียงแหลมช่วงคัท

Channel 1 Level vs. Analog A Frequency

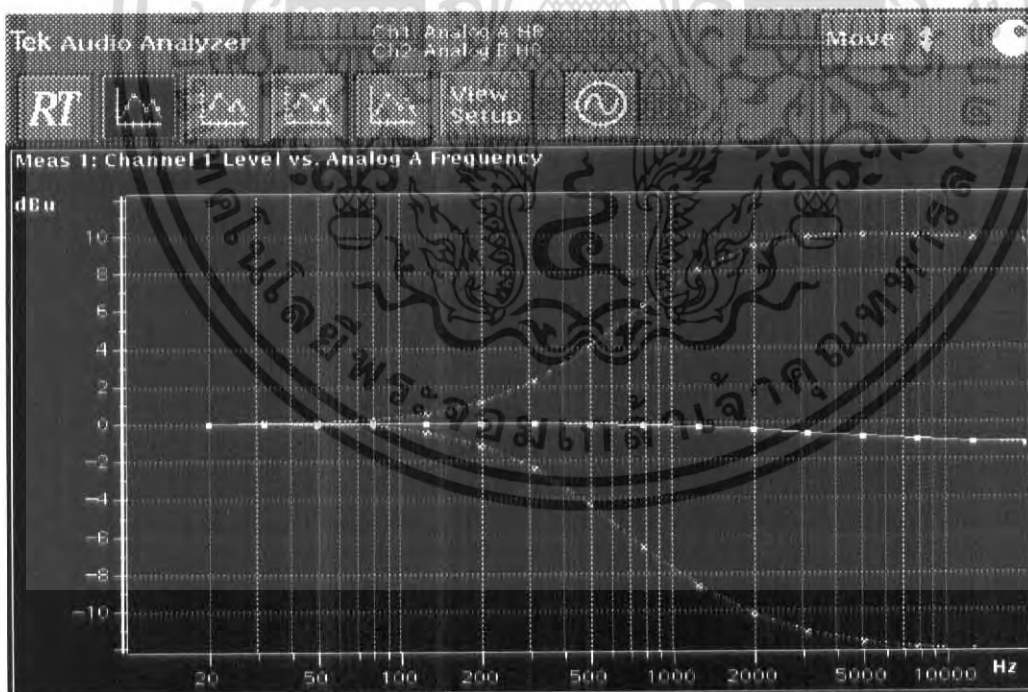
Frequency (Hz)	Level (dBu)
20.00	-0.00
31.70	-0.02
50.20	-0.07
79.60	-0.18
126.20	-0.48
200.00	-1.13
317.00	-2.36
502.40	-4.32
796.20	-6.56
1261.90	-9.73
2000.00	-10.23
3169.00	-11.17
5023.00	-11.67
7962.10	-11.97
12619.10	-12.18
20000.00	-12.30

รูปที่ 5.1.9 แสดงตารางของเสียงแหลมช่วงคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.10 แสดงกราฟของวงจรรีควอไลเซอร์ทางด้านเสียงทุ้ม



รูปที่ 5.1.11 แสดงกราฟของวงจรรีควอไลเซอร์ทางด้านเสียงแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.12 แสดงกราฟของวงจรรีควิวไลเซอร์ทั้งวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การวัดสัญญาณของวงจรจาก ออสซิลโลสโคป

5.1.2.1 การวัดวงจรทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) ช่วงบู้ทสัญญาณ

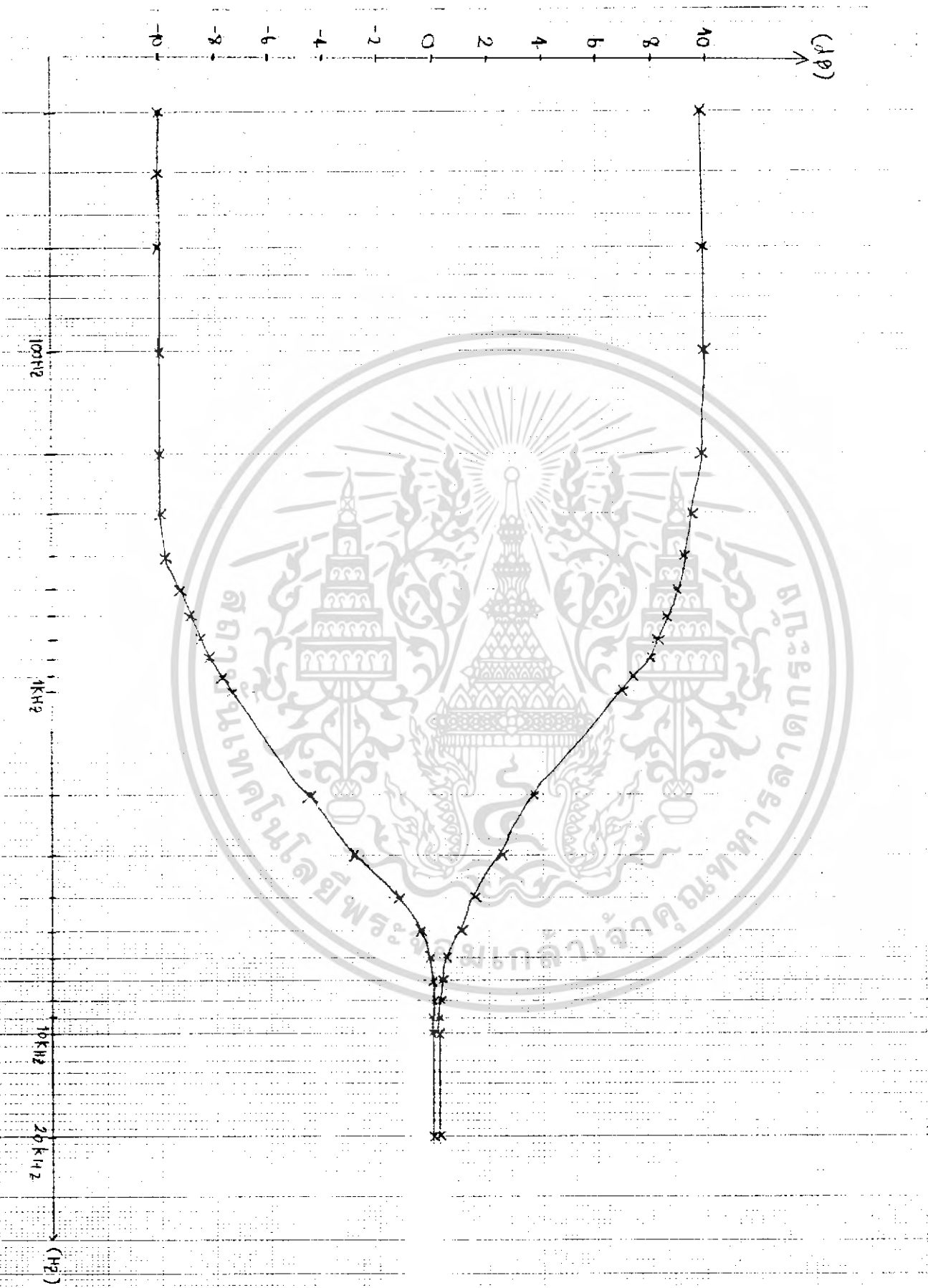
Frequency (Hz)	Vo (Volt)	Gain (dB)
20	3.1	9.82
50	3.1	9.82
100	3.1	9.82
200	3.1	9.82
500	2.75	8.78
1000	2.25	7.04
2000	1.56	3.86
5000	1.12	0.98
10000	1.01	0.08
20000	1.01	0.08

ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) ช่วงบู้ทสัญญาณ

5.1.2.2 การวัดวงจรทางด้านเสียงทุ้ม (Bass) ช่วงคัท

Frequency (Hz)	Vo (Volt)	Gain (dB)
20	0.31	-10.17
50	0.31	-10.17
100	0.31	-10.17
200	0.31	-10.17
500	0.315	-10.03
1000	0.42	-7.53
2000	0.6	-4.43
5000	0.85	-1.41
10000	0.98	-0.17
20000	0.98	-0.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.3 การวัดวงจรทางด้านเสียงแหลม (Treble) ช่วงบูท

Frequency (Hz)	Vo (Volt)	Gain (dB)
20	0.95	-0.044
50	0.95	-0.044
100	1	0
200	1.1	0.828
500	1.6	4.082
1000	2.3	7.23
2000	2.95	9.39
5000	3.35	10.5
10000	3.5	10.88
20000	3.5	10.88

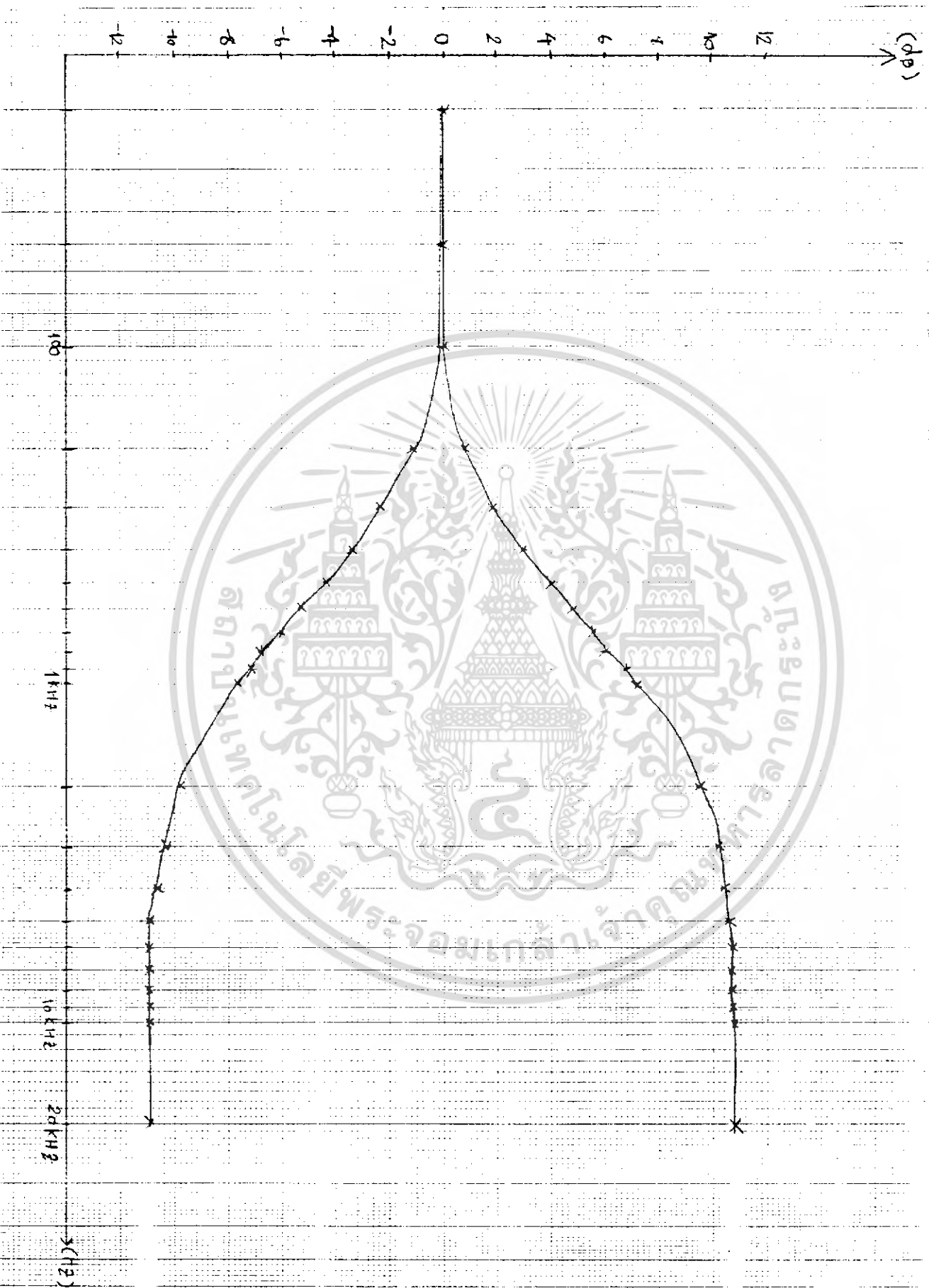
ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงแหลม (Treble) ช่วงบูท

5.1.2.4 การวัดวงจรทางด้านเสียงแหลม (Treble) ช่วงคัท

Frequency (Hz)	Vo (Volt)	Gain (dB)
20	0.95	-0.044
50	0.95	-0.044
100	0.9	-0.91
200	0.86	-1.31
500	0.6	-4.43
1000	0.4	-7.95
2000	0.32	-9.89
5000	0.285	-10.9
10000	0.285	-10.9
20000	0.285	-10.9

ตารางที่ 5.4 บันทึกผลการทดลองวงจรทางด้านเสียงแหลม (Treble) ช่วงคัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสสารนี้เป็นของสสารที่ส่งผ่านไว้สให้เรียกว่าเชิงเพื่อสสารที่ซึ่เข้าในเมื่อนำเข้าให้เข้าระบบนิเวศตามราคา
 ในวาทกรรมได้ฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งทำมิให้คิดเปลี่ยนแปลง และต้องอึ่งถึงเงิ่ของเอกสสารทุกครั้งที่มีกรนำเข้าไป

5.2 การเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองกับกราฟจากโปรแกรม Pspice ของวงจรอันดับหนึ่ง (First Order)

จากการทดลองเราพบว่า กราฟที่ได้จากการทดลองเมื่อทำการพล็อตออกมาจะมีลักษณะใกล้เคียงกับทฤษฎี และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice พบว่า กราฟทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลอง โดยการวัดจากสโคปกับกราฟที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice สามารถพิจารณาเป็นค้ำ ๆ ได้ดังนี้

1. พิจารณาทางด้านเสียงทุ้ม (Bass)

ช่วงการบู๊ตสัญญาณ กราฟที่ได้จากการทดลองจะมีแอมพลิจูดน้อยกว่ากราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice เล็กน้อย โดยช่วงที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดคือช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตถึง 200 เฮิร์ต ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ประมาณ 9.82 dB ส่วนค่าที่ได้จากโปรแกรม Pspice มีค่าอยู่ที่ 10 dB ลงมาจนถึง 9dB

ช่วงการคัทสัญญาณ จะพบว่ากราฟที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่ากราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice เล็กน้อย โดยในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตถึง 200 เฮิร์ต กราฟจากการทดลองมีค่าอยู่ประมาณ -10.17 dB ส่วนกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice จะมีค่าอยู่ประมาณ -10.03 dB ส่วนจุดที่แตกต่างกันมากที่สุดคือที่ความถี่ 500 เฮิร์ต กราฟที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ -10.03 dB ส่วนค่าที่ได้จากโปรแกรม Pspice มีค่าประมาณ -9 dB

2. พิจารณาทางด้านเสียงแหลม (Treble)

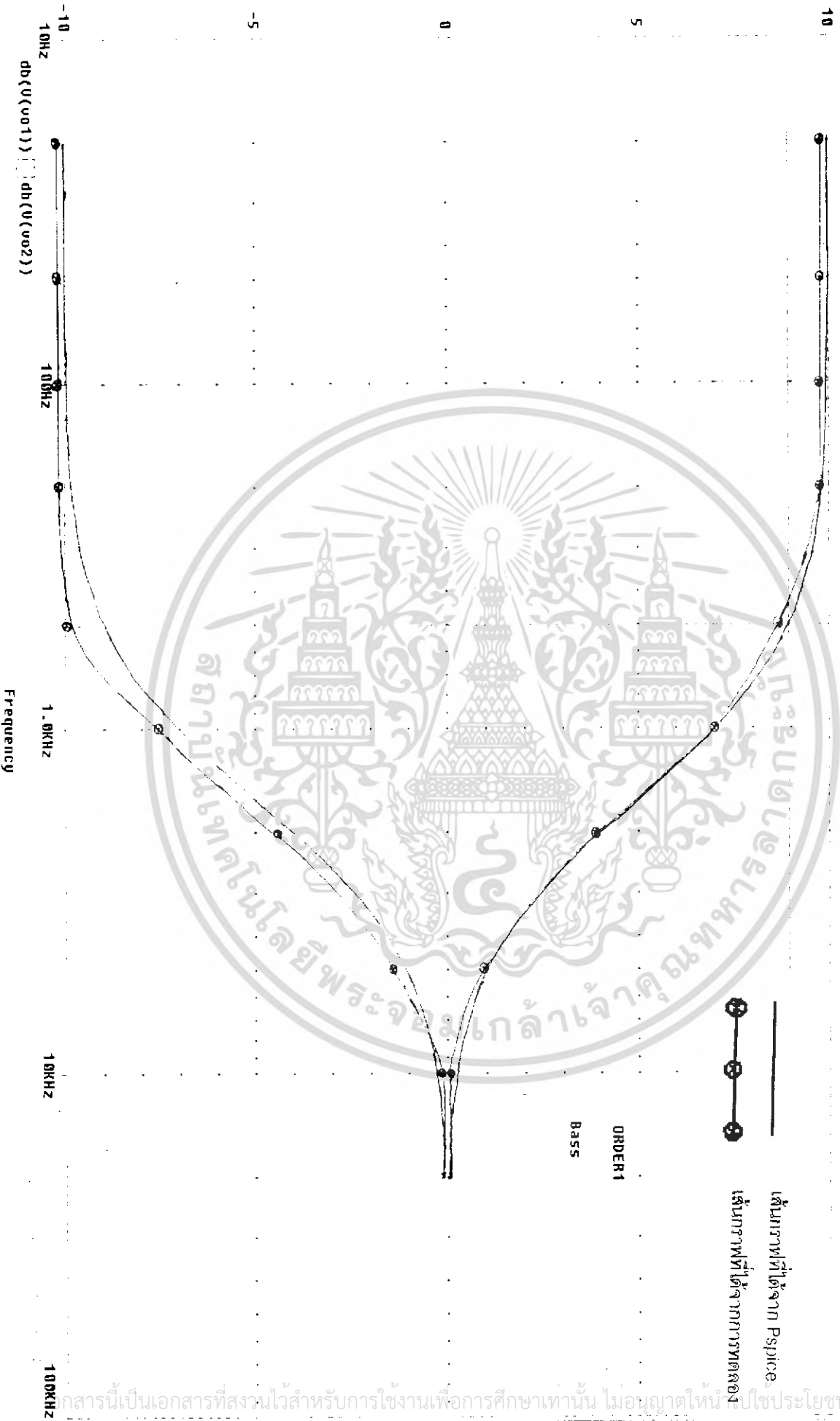
ช่วงการบู๊ตสัญญาณ กราฟที่ได้จากการทดลองจะมีแอมพลิจูดมากกว่ากราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice เล็กน้อย โดยช่วงที่แตกต่างกันมากที่สุดคือช่วงความถี่ 10 KHz - 20 KHz โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 10.88 dB ส่วนค่าที่ได้จากโปรแกรม Pspice มีค่าประมาณ 10 dB

ช่วงการคัทสัญญาณ กราฟที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่ากราฟที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice เล็กน้อย โดยช่วงที่แตกต่างกันมากที่สุดคือช่วงความถี่ 5 KHz - 20 KHz ค่าที่ได้จากการทดลองประมาณ -10.9 dB ส่วนค่าที่ได้จากโปรแกรม Pspice จะมีค่าอยู่ในช่วง -9.8dB ถึง -10 dB

การเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ของวงจรอันดับหนึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.2.1 และ รูปที่ 5.2.2

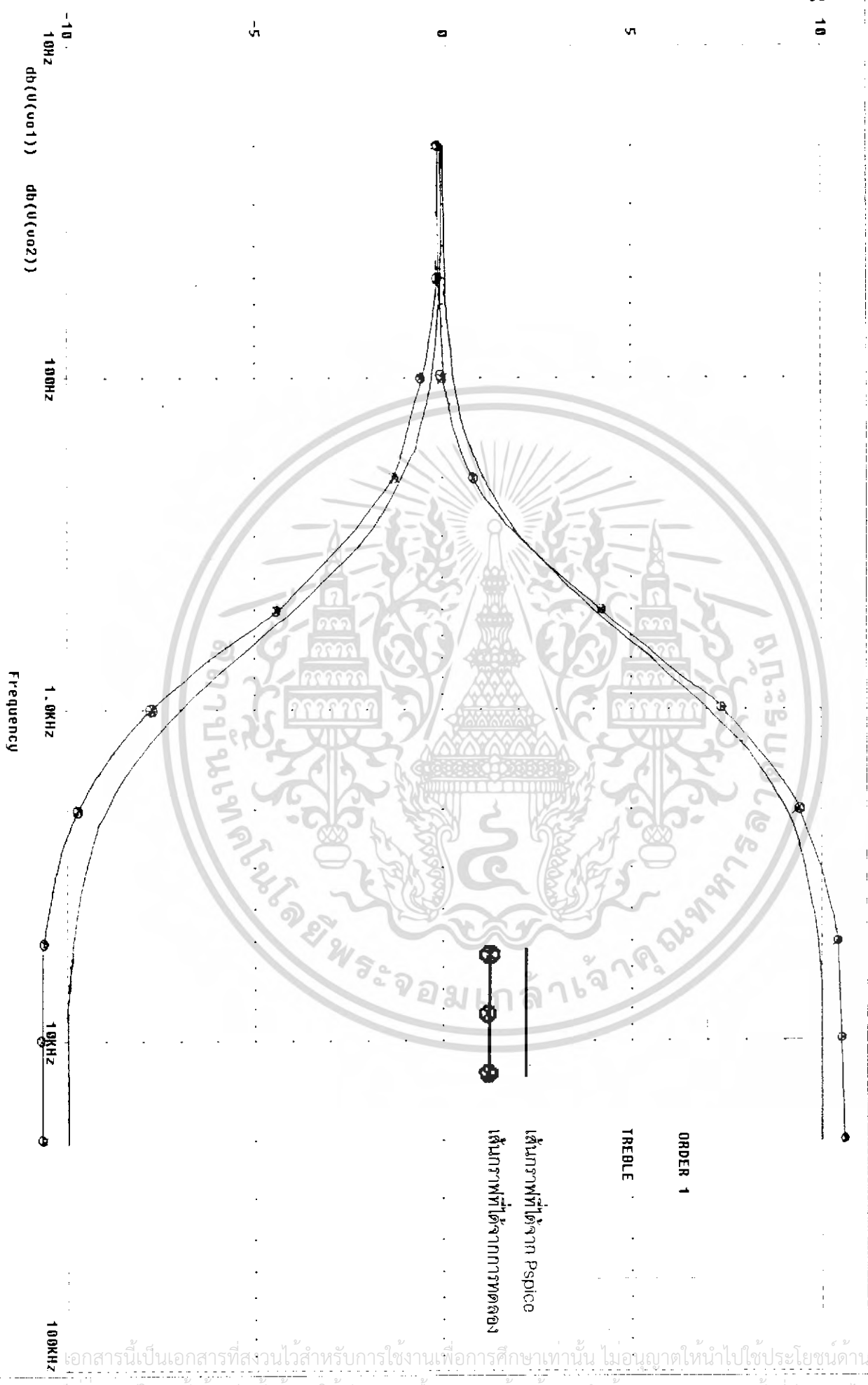
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2.1 แสดงการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2.2 แสดงการเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดลองกับกราฟที่ได้จากโปรแกรม Pspice ทางด้านเสียงแหลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

วงจรแอมป์ ออติโอ อีควอไลเซอร์ จะมีคุณลักษณะในการปรับเพื่อยกระดับหรือลดระดับของสัญญาณเสียง ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 20 เฮิรท์ ถึง 20,000 เฮิรท์ ซึ่งวงจรจะมีขนาดเล็ก ประกอบด้วยออปแอมป์ และอุปกรณ์ อาร์ซี เพียงไม่กี่ตัวโดยจะตัดตัวอินคเตอร์ออกไปจากวงจร เพื่อเป็นการลดความยุ่งยากของวงจรและลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวงจรด้วย

ในการทดลองวัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ของวงจร จะได้ค่าออกมาใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice โดยผลการทดลองที่ออกมาทั้งทางด้านเสียงทุ้มและทางด้านเสียงแหลมมีค่าระดับของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ ± 10 dB ปัญหาในการทดลองค่าที่ได้จากการวัดระดับของสัญญาณด้วยเครื่องออติโอ อีควอไลเซอร์ มีความคลาดเคลื่อนบ้างเมื่อเราทำการสเกลทางขนาดและทางความถี่ในค่าที่สูงมากเกินไป เพราะฉะนั้นเราจึงต้องปรับลดค่าในการสเกลให้ลงมาอยู่ในค่าที่เหมาะสม และปัญหาอีกอย่างหนึ่งก็คือ หน่วยในการวัดระดับของสัญญาณจากเครื่องออติโอ อีควอไลเซอร์ มีหน่วยเป็น dBu ต่อความถี่ แต่ในการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice ระดับของสัญญาณมีหน่วยเป็น dB ต่อความถี่ จึงทำให้เกิดความสับสนในการเปรียบเทียบกัน

ในส่วนของการทดสอบวงจร เราจะใช้สัญญาณจากเครื่องออติโอ อีควอไลเซอร์ ป้อนเป็นสัญญาณอินพุทให้กับวงจรและจ่ายไฟดีซี ± 15 โวลต์ จากวงจรเร็กกูเลเตอร์ให้กับวงจรการทดลองด้วย ซึ่งได้เอาท์พุท จากวงจรการทดลองออกมาเป็นไปตามทฤษฎี

จากวงจรอีควอไลเซอร์ที่ได้ออกแบบนี้ จะเป็นพื้นฐานในการที่จะพัฒนางจรใหม่ที่มีประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์ในการใช้งานได้กว้างขวางขึ้น ซึ่งในอนาคตอาจมีการพัฒนางจรอีควอไลเซอร์ที่ใช้ในการปรับแต่งเสียงของสัญญาณออติโอ ได้อย่างมีคุณภาพสูงสุดก็ได้ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำคาดหวังว่าปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

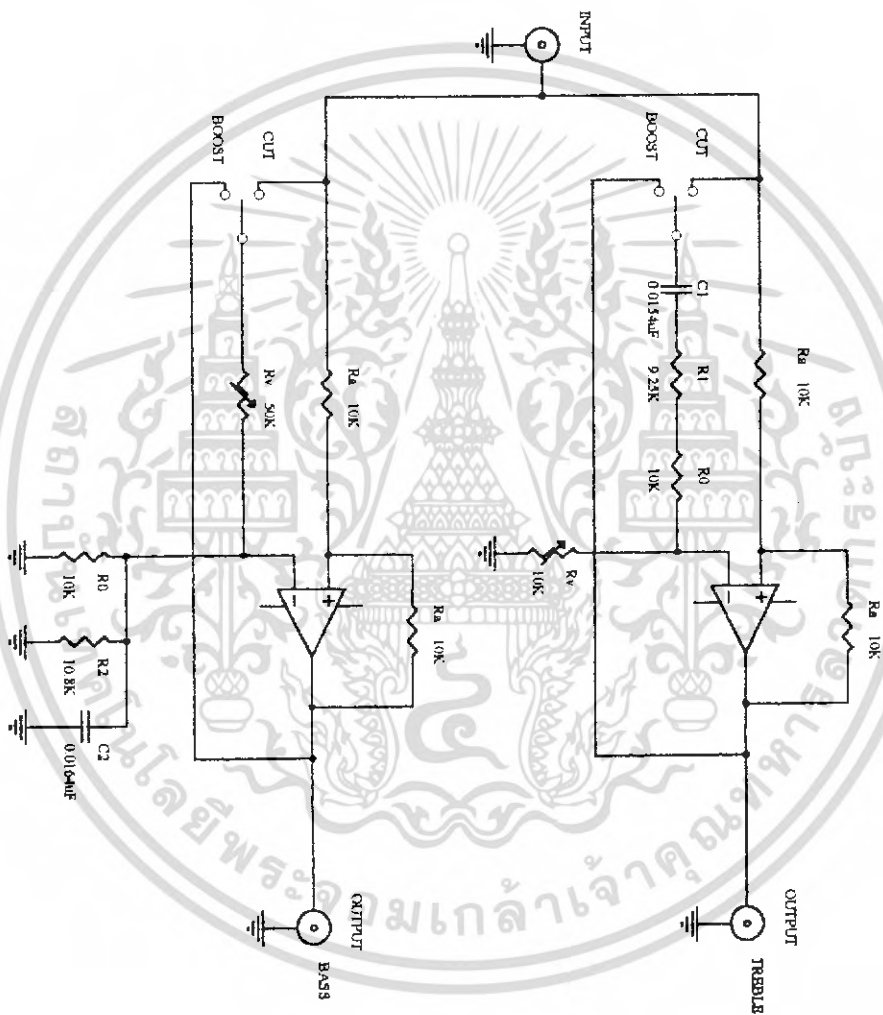
1. พันธุ์ศักดิ์ พุฒิมานิตพงศ์ , ทฤษฎีเครื่องเสียง
2. กิตติ ศิริเศรษฐ , การวิเคราะห์ระบบควบคุมเชิงเส้น
3. Franc Brglez , Minimally Active RC Variable Equalizers , IEEE Transactions on Circuits and Systems , VOL. CAS - 22 , NO. 8 , August 1975
4. H. W. Bode “ Variable Equalizers ” Bell Syst. Tech. J. , Vol.17 , pp.229-244
5. Wai-Kai Chen , Passive and Active Filters , pp. 194 - 211 , 220 - 226



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

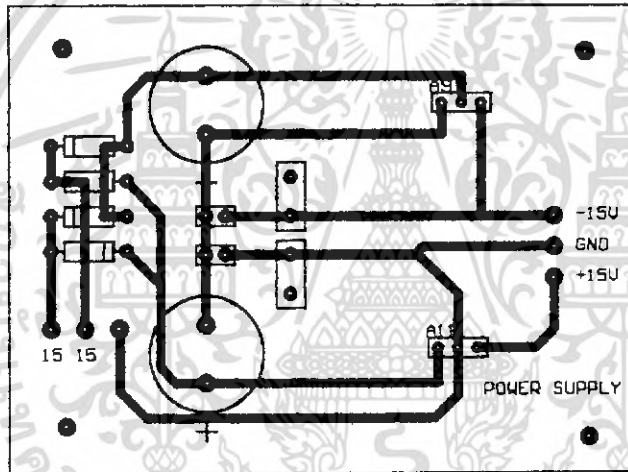


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

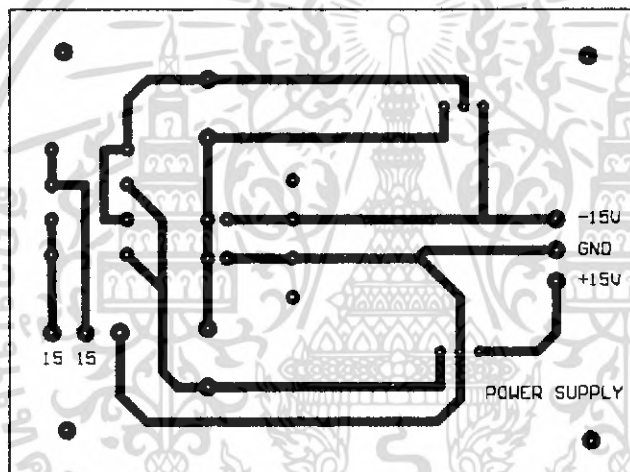


Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date	26 Apr 1994	Sheet of	
File	A1SCH101.SCH	Drawn By:	

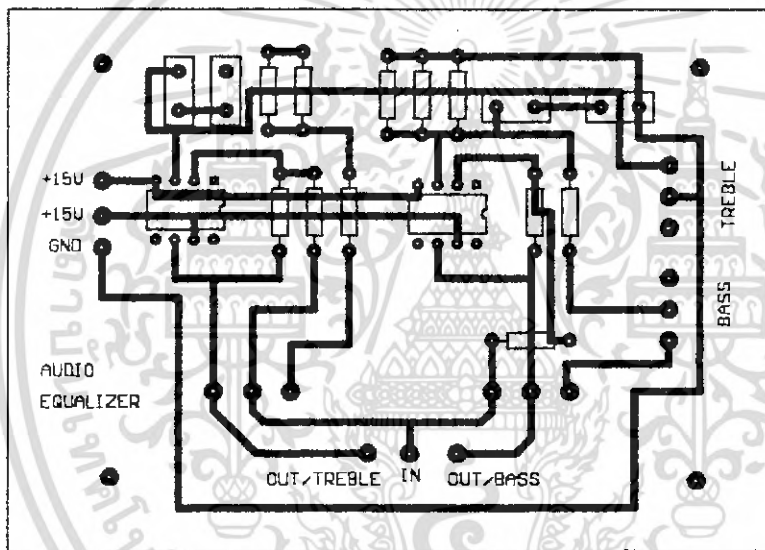
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม้วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเหตดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



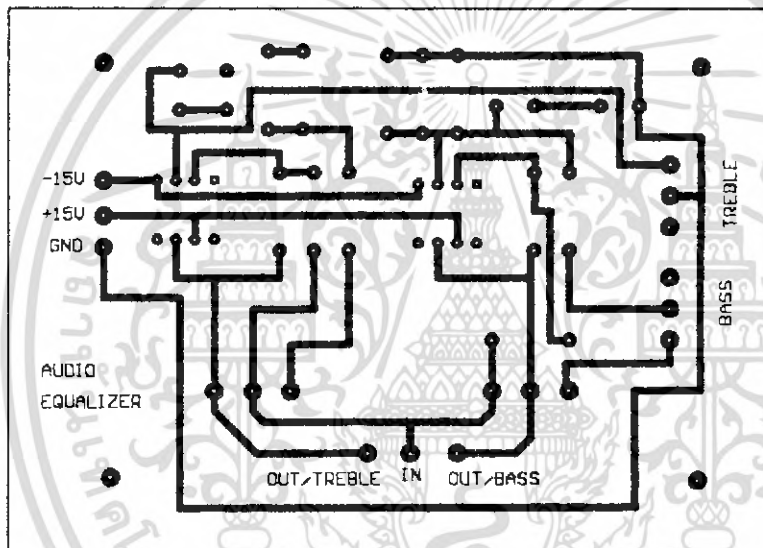
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM741 Operational Amplifier

General Description

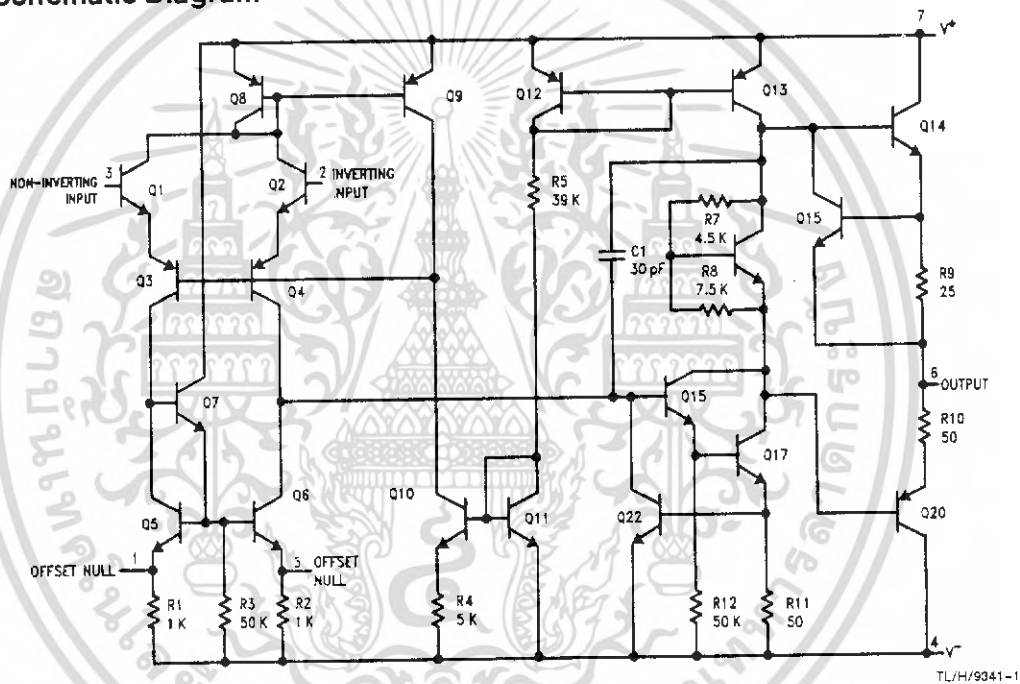
The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

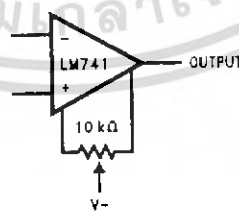
The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Schematic Diagram



TL/H/9341-1

Offset Nulling Circuit



TL/H/9341-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.
(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C

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

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
ESD Tolerance (Note 6)	400V	400V	400V	400V

Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	±10				±15			±15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$			70		85	500			300	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$			0.210			1.5			0.8	μA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M Ω
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M Ω
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$				±12	±13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200		V/mV V/mV
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $V_S = \pm 20\text{V}$, $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_O = \pm 10\text{V}$	32			25			15			V/mV V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$, $V_O = \pm 2\text{V}$	10									V/mV

Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10 k\Omega$ $R_L \geq 2 k\Omega$	± 16									V V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10 k\Omega$ $R_L \geq 2 k\Omega$				± 12 ± 10	± 14 ± 13		± 12 ± 10	± 14 ± 13		V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ C$	10	25	35		25			25		mA mA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10		40							
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10 k\Omega, V_{CM} = \pm 12V$ $R_S \leq 50\Omega, V_{CM} = \pm 12V$	80	95		70	90		70	90		dB dB
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10 k\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB dB
Transient Response Rise Time Overshoot	$T_A = 25^\circ C$, Unity Gain		0.25 6.0	0.8 20		0.3 5			0.3 5		μs %
	$T_A = 25^\circ C$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ C$, Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ μs
Supply Current	$T_A = 25^\circ C$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ C$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150		50	85		50	85	mW mW
	LM741A $V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165 135							mW mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			150 150							mW mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW mW

Note 1: For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and T_{jmax} (listed under "Absolute Maximum Ratings"). $T_j = T_A + (\theta_{JA} P_D)$.

Thermal Resistance	CerDip (J)	DIP (N)	HO8 (H)	SO-8 (M)
θ_{JA} (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	170°C/W	195°C/W
θ_{JC} (Junction to Case)	N/A	N/A	25°C/W	N/A

Note 2: For supply voltages less than $\pm 15V$, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 3: Unless otherwise specified, these specifications apply for $V_S = \pm 15V$, $-5^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$.

Note 4: Calculated value from: BW (MHz) = $0.35/\text{Rise Time}(\mu s)$.

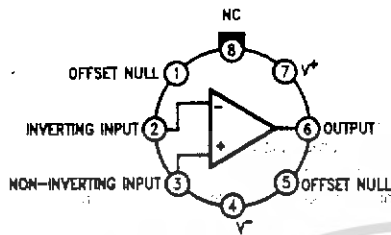
Note 5: For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

Note 6: Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Diagrams

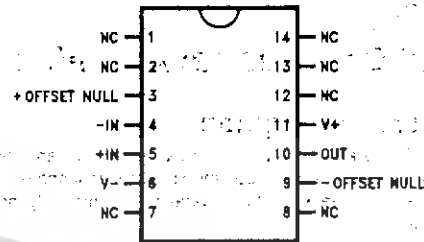
Metal Can Package



TL/H/8341-2

Order Number LM741H, LM741H/883*,
LM741AH/883 or LM741CH
See NS Package Number H08C

Ceramic Dual-In-Line Package

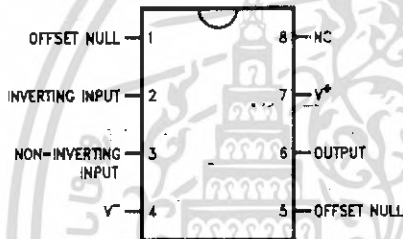


TL/H/8341-5

Order Number LM741J-14/883*, LM741AJ-14/883**
See NS Package Number J14A

*also available per JM38510/10101
**also available per JM38510/10102

Dual-In-Line or S.O. Package



TL/H/8341-3

Order Number LM741J, LM741J/883,
LM741CM, LM741CN or LM741EN
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

Ceramic Flatpak



TL/H/8341-6

Order Number LM741W/883
See NS Package Number W10A

*LM741H is available per JM38510/10101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้