

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรอติโอกราฟฟิโกอีควอไลเซอร์โดยใช้โซลิตสเตทอินดีกเตอร์จำลอง



โดย
นายธีรพัฒน์ ไกรโทสง
นายอัศวพล พลบำรุง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขที่.....
เลขทะเบียน.....36956
วัน, เดือน, ปี..... 29 ต.ค. 2542

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design of Audio Graphic Equalizer by using solid state Simulated Inductor



By

Mr.Teerapat Kraitaisong

Mr.Asawaphol Pholbamrung

Project Report Submitted in partial Fulfillment of the requirement

For the Bachelor 's Degree

Department of Industrial Technology

Faculty of Engineering

Academic Year 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร การออกแบบวงจรรอดิโกราฟีทีลิวอิลเซอร์โดยใช้ซิลิคอนเตทอินดิกเตอรืจำลอง

โดย นายธีรพัฒน์ ไกรไทสง

นายอัศวพล พลบำรุง


อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2542

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตร

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(กนก เจนจิระพงศ์เวช)

กรรมการ

()

กรรมการ

()

กรรมการ

()

กรรมการ

()

กรรมการ

()

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title Design of Audio Graphic Equalizer by using solid state Simulated
 Inductor

By Mr.Teerapat Kraitaisong
 Mr.Asawaphol Pholbamrung

Advisor Assoc.Prof.Dr. Knok Janchitrapongvej

Department of Industrial Technology

Academic Year 1999

Accept by the Faculty of Engineering, King Mongkut 's Institute of
Technology, Ladkrabang in partial fulfillment for the Bachelor's degree.

Project Report Committee

_____ Advisor

(*ดร. กนก จันทประพจน์*)

_____ Member

()

_____ Member

()

_____ Member

()

_____ Member

()

_____ Member

()

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์โดยใช้โซลิตสเตทอินดักเตอร์จำลอง

โดย

นายธีรพัฒน์ ไกรโทสง

นายอัศวพล พลบำรุง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ปีการศึกษา

2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์โดยใช้โซลิตสเตทอินดักเตอร์จำลอง ซึ่งมีการทำงานโดยอาศัยหลักการของวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance) เพื่อให้ผลตอบสนองทางความถี่มีลักษณะของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter: BPF) โดยจะประกอบด้วย ส่วนอินดักเตอร์จำลองและส่วนออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์

ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอินดักเตอร์จำลองจะคำนึงถึงค่าความไวต่อการตอบสนองและลักษณะอิมพีแดนซ์ของวงจรมารวม และจะนำแบบที่เหมาะสมที่สุดไปใช้งาน โดยจะต่อร่วมกับวงจรรองแถบความถี่ผ่านของส่วนออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์ และในส่วนออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์จะเป็นการออกแบบวงจรรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งสามารถปรับค่า Q (0.2 ถึง 10) ได้ เพื่อให้สามารถชดเชยผลตอบสนองทางความถี่ได้เพียงพอ

จากการทดลอง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมจะทำให้ได้คุณสมบัติของวงจรรอได้ออดิโอกราฟฟิควอลเลย์เซอร์ตามต้องการ และเราสามารถพิสูจน์ผลการทดลองได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB หรือ โปรแกรม PSpice ซึ่งผลที่ได้นั้นจะมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลที่ได้ในทางปฏิบัติ

Design of Audio Graphic Equalizer by using solid state Simulated Inductor

By

Mr.Teerapat Kraitaisong

Mr.Asawaphol Pholbamrung

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Knok Janchitrapongvej

Academic

Year 1999

Abstract

This thesis proposes the design of audio graphic equalizer by using solid state simulated inductor. Normally, the inductors are used in the conventional design. In order to avoid the used of inductor, a simulated inductor is utilized. The proposed circuit has the series resonance with band pass filter response. Herein, active RC network can be realized by using simulated inductor.

Therefore, the simulated inductor sensitivity and impedance characteristic of the audio equalizer are carried out, and the most suitable type with selective band pass filter of audio graphic equalizer is designed. The proposed audio graphic equalizer can be adjusted to have a Quality factor between 0.2 to 10 for equalize the desired response.

Finally, the experiment results are agree with the theoretical value. MATLAB and PSpice are carried out for design consistence .

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช ที่ให้โอกาสและให้การช่วยเหลือแนะนำ
ต่างๆพร้อมทั้งเอกสาร จนปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ผศ.อุทัย ศรีธีระ
วิโรจน์ ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องมือที่มีคุณภาพที่ใช้ในการ
ทดลองและทดสอบ ขอขอบคุณพี่สรพงษ์ แซ่เตีย(พี่ตี๋) ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ตีมาโดย
ตลอด และขอบคุณพี่ศักดา(พี่ตี๋) พี่ก้องเกียรติ ที่ช่วยเหลือในส่วนของอุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่1 บทนำ	
1.1 อีควอไลเซอร์	1
1.2 กราฟฟิก อีควอไลเซอร์	2
1.3 คัท และ บูสท์ อีควอไลเซอร์	2
1.4 พาราเมตริก อีควอไลเซอร์	3
1.5 อินด์คเตอร์จำลอง	4
1.6 ลักษณะของโครงการและจุดมุ่งหมายของโครงการ	4
บทที่2 ทฤษฎีการคำนวณ	
2.1 ค่าความไว	6
2.2 การจำลองค่าความเหนี่ยวนำ	7
2.3 ตัวอย่างของอินด์คเตอร์จำลองแบบต่างๆและการวิเคราะห์	9
2.4 ตัวอย่างการกำเนิดอินด์คเตอร์จำลอง	13
บทที่3 การออกแบบวงจรส่วนวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	
3.1 โครงสร้างของวงจรและสมการที่ใช้ในการออกแบบ	17
3.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ให้ได้ค่าความถี่กลางและช่วงของการปรับค่า Q ตามต้องการ	23
3.3 การออกแบบวงจรที่ใช้งานจริง	24
3.4 การพิจารณาค่าค่าความไวของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	27
3.5 ลักษณะของวงจร บูสท์ – คัท	38
บทที่4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองเพื่อวัดผลตอบสนองทางขนาด	54
4.2 การทดลองเพื่อวัดผลตอบสนองทางเฟส	62
4.3 การทดสอบเพื่อปรับแต่งสภาพทางอคูสติกของห้องฟัง	73
บทที่5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา	
5.1 การทดลองวัดค่าผลตอบสนองทางขนาดและ ผลตอบสนองทางเฟส	83
5.2 การทดลองในการปรับแต่งสภาพอคูสติกของห้องฟัง	86
5.3 แนวทางการพัฒนาโครงการ	86

ภาคผนวก ก
ภาคผนวก ข
ภาคผนวก ค
บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่1-1 อีควอไลเซอร์แบบ 28 ย่านความถี่ 1/3 ออกเดเฟ	2
รูปที่1-2 ส่วนฟิลเตอร์ทั้งหมดถูกปรับให้มีการลดทอนสูงสุด	3
รูปที่1-3 แสดงลักษณะของการอีควอไลซ์ที่สามารถปรับค่า Q ได้	3
รูปที่2-1 แสดง ทูพอร์ตเน็ตเวิร์ก ที่เราพิจารณา	7
รูปที่2-2 แสดง อินดักเตอร์จำลองแบบที่ 1	9
รูปที่2-3 แสดง อินดักเตอร์จำลองแบบที่ 2	11
รูปที่ 2-4 แสดงค่าความไวทางเฟสของ $Zin(s)$ ซึ่งรูปที่ได้ หมายถึง ผลกระทบต่อความ เป็นอินดักเตนซ์มีค่าน้อยเพียงใด($G=1 / 10k\Omega$ และ $C=0.001\mu F$)	13
รูปที่2-5 อินดักเตอร์จำลองที่ได้และวงจรมุมูลย์	15
รูปที่3-1 ลักษณะของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน	16
รูปที่3-2 วงจรลบสัญญาณ (Subtractor)	17
รูปที่3-3 วงจรรองแถบความถี่ผ่านที่ได้	18
รูปที่3-4 วงจรรองแถบความถี่ผ่านที่ใช้งาน	23
รูปที่3-5 วงจรรองแถบความถี่ผ่านที่นำมาพิจารณาค่าความไว	26
รูปแสดง ค่าความไวทางขนาด ที่ $f_p = 60$ Hz	32
รูปแสดง ค่าความไวทางขนาด ที่ $f_p = 240$ Hz	32
รูปแสดง ค่าความไวทางขนาด ที่ $f_p = 1$ KHz	33
รูปแสดง ค่าความไวทางขนาด ที่ $f_p = 4$ KHz	33
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 16$ KHz	34
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 60$ Hz	34
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 240$ Hz	35
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 1$ KHz	35
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 4$ KHz	36
รูปแสดง ค่าความไวทางเฟส ที่ $f_p = 16$ KHz	36
รูปที่3-6 วงจร บูลท์-คัท เมื่อต่อร่วมกับวงจรรองแถบความถี่ผ่าน	38
รูปที่3-7 วงจรมุมูลย์เมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง B	39
รูปที่3-8 วงจรมุมูลย์เมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง C	42

รูปที่ 3-9 ลักษณะของวงจร บูลท์-คัท เมื่อต่อร่วมกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่านทั้งหมด	46
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อบูลท์สูงสุด ที่ $f_p=60$ Hz	47
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อบูลท์สูงสุด ที่ $f_p=240$ Hz	47
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อบูลท์สูงสุด ที่ $f_p=1$ KHz	48
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อบูลท์สูงสุด ที่ $f_p=4$ KHz	48
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อบูลท์สูงสุด ที่ $f_p=16$ KHz	49
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อคัทสูงสุด ที่ $f_p=60$ Hz	49
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อคัทสูงสุด ที่ $f_p=240$ Hz	50
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อคัทสูงสุด ที่ $f_p=1$ KHz	50
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อคัทสูงสุด ที่ $f_p=4$ KHz	51
รูปแสดง ผลตอบสนองเมื่อคัทสูงสุด ที่ $f_p=16$ KHz	51
รูปที่ 4-1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ใช้งานจริง	52
รูปที่ 4-2 วงจร บูลท์-คัท ที่ใช้งานจริง	53
รูปที่ 4-3 บล็อกไดอะแกรม ที่ใช้ในการทดลองผลตอบสนองทางขนาด	54
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 60$ Hz)	54
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 240$ Hz)	54
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 1$ KHz)	55
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 4$ KHz)	56
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 16$ kHz)	56
รูปแสดง ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSpice สำหรับผลตอบสนองทางขนาด	57
รูปที่ 4-4 บล็อกไดอะแกรม ที่ใช้ในการทดลองผลตอบสนองทางเฟส	62
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 60$ Hz)	62
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 60$ Hz)	63
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 240$ Hz)	63
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 240$ Hz)	64
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 1$ KHz)	64
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 1$ KHz)	65
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 4$ KHz)	65
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 4$ KHz)	66

รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บุสท์ สูงสุด ($f_p = 16\text{KHz}$)	66
รูปแสดง ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 16\text{KHz}$)	67
รูปแสดง ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSpice สำหรับผลตอบสนองทางเฟส	68
รูปที่ 4-5 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการทดสอบเพื่อปรับแต่ง สภาพอคูสติกของห้องฟัง	73
รูปแสดง ลักษณะสถานที่และระบบที่ใช้ทดสอบ สังเกตไมโครโฟนวาง ณ จุดตำแหน่งนั่งฟัง	75
รูปแสดง เครื่องขยายเสียงที่ใช้	75
รูปแสดง เครื่องออดิโอ อนุโลเซอร์ที่ใช้	76
รูปแสดง การต่อ PreMic เข้าเครื่องออดิโออนุโลเซอร์	76
รูปแสดง ด้านหน้าของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์	77
รูปแสดง ด้านบนของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์	77
รูปแสดง ด้านหลังของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์	78
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดที่ได้ก่อนการปรับแต่งสภาพอคูสติก (ไม่มีการปรับแต่งใดๆที่อีควอไลเซอร์)	78
รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดที่ได้หลังการปรับแต่งสภาพอคูสติก (หลังจากการปรับแต่งที่อีควอไลเซอร์)	79
รูปที่ 4_6 ระบบที่ใช้ทดสอบสภาพอะคูสติกที่ง่ายต่อการปรับแต่งมากขึ้น	80
รูปแสดง ลักษณะของสเปกตรัม ก่อนปรับแต่งสภาพทางอะคูสติก	82
รูปแสดง ลักษณะของสเปกตรัม หลังปรับแต่งสภาพทางอะคูสติก	82
รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่าง โปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ บุสท์ สูงสุด	84
รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่าง โปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ คัท สูงสุด	84
รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่าง โปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ คัท สูงสุด	85
รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่าง โปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ คัท สูงสุด	85

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 อีควอลไลเซอร์ (Equalizer)

อีควอลไลเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อชดเชยขนาดและเฟสของสัญญาณที่ขาดหายบกพร่องไปในบางความถี่ ในระบบหรือในตัวของท่านดิวิเซอร์เราสามารถจะควบคุมตัวแปรต่างๆได้ภายในตลอดช่วงย่านความถี่ ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 40 Hz ถึง 20 KHz รูปร่างสเปกตรัมสามารถปรับปรุงแก้ไขให้ใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุดได้ โดยการปรับแต่งขนาดที่ส่วนควบคุมของวงจรมีเตอร์ต่างๆโดยไม่มีผลข้างเคียงแก่กันเลย(อาจมีบ้างเล็กน้อย ขึ้นกับคุณภาพของวงจรและอุปกรณ์)

อีควอลไลเซอร์ อาจจะจำแนกได้หลายประเภทดังนี้

1. Active
2. Passive
3. One – third octave
4. One – half octave
5. Two – third octave
6. Octave band
7. Q or selectivity
8. Parametric
9. band reject or cut
10. band select or boost
11. Boost and cut

12. ประเภทที่ใช้เป็น Digital filter เช่น Adaptive , Digital IIR นอกเหนือจากที่กล่าวมานี้ อาจจะมีแบบอื่นๆที่แตกต่างกันออกไปอีกมากมาย

ในทางการค้า อีควอลไลเซอร์ ทั่วไปจะมีความถี่กลางที่เป็นมาตรฐานเดียวกันที่วงจรมีเตอร์ของแต่ละ วงจร แต่จะค่าความกว้างของแบนวิดท์และความถี่ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับค่า Q ของวงจรมันๆ ถ้า Q ต่ำๆก็จะเป็นอีควอลไลเซอร์ ที่มีช่วงไม่ละเอียดนัก แต่ถ้า Q สูงๆความละเอียดของแต่ละย่านความถี่ที่สามารถปรับแต่งได้ก็จะละเอียดมาก ซึ่งเราดูได้จากการแบ่งช่วงออกเตฟ (Octave) ของแต่ละความถี่กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

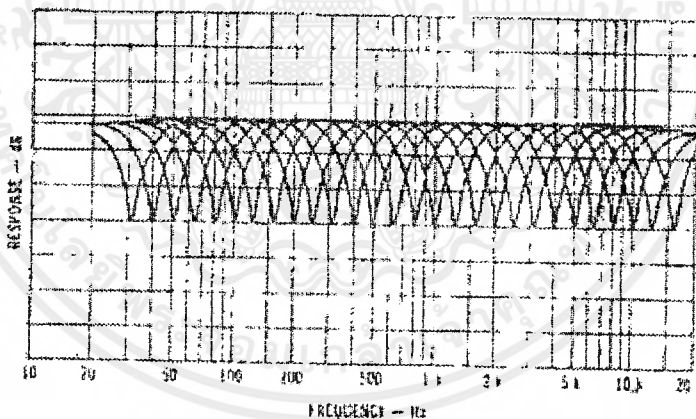
1.2 กราฟฟิกอีควอลไลเซอร์ (Graphic Equalizer)

กราฟฟิกอีควอลไลเซอร์ มักใช้ในการปรับแต่งรูปร่างของสัญญาณขณะที่กำลังทำการบันทึกอยู่ ที่เราเรียกว่า "กราฟฟิก" เนื่องจากผลตอบสนองทางขนาดที่ได้จากเอาต์พุตสามารถดูได้จากตำแหน่งของ โฟเทนิซิโอมิเตอร์ ของโน้ตความถี่นั้นว่ามากหรือน้อยเท่าใด

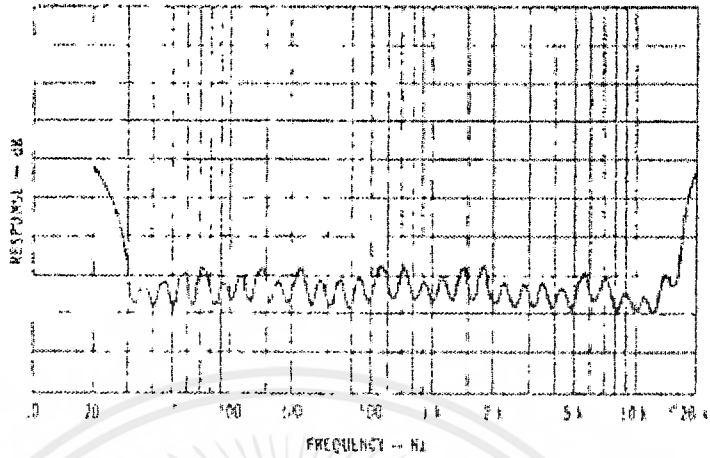
กราฟฟิกอีควอลไลเซอร์ อาจจะมีให้เลือกหลายรูปแบบ เช่น One – third , Two – third หรือ full – octave band filter เป็นต้น

1.3 คัท และ บูสท์ อีควอลไลเซอร์ (Cut and Boost Equalizer)

กราฟฟิกอีควอลไลเซอร์แบบนี้มีความสามารถที่ขยายสัญญาณหรือลดทอนสัญญาณเฉพาะย่านความถี่ได้ โดยแต่ละย่านความถี่จะสามารถปรับแต่งอัตราขยายได้อิสระต่อกัน ถ้าปรับอัตราขยายไว้ที่ 0 dB จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่เอาต์พุตจะมีลักษณะราบเรียบ ถ้าปรับทุกย่านความถี่ให้ บูสท์ หรือ คัท สูงสุดจะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดจะมีลักษณะเป็น ริบเบิล (Ripple) เนื่องจากการเสริมกันของแต่ละยอด (peak) ของทุกย่านความถี่ ดังรูป



รูปที่ 1-1 อีควอลไลเซอร์แบบ 28 ย่านความถี่ 1/3 ออกเตฟ

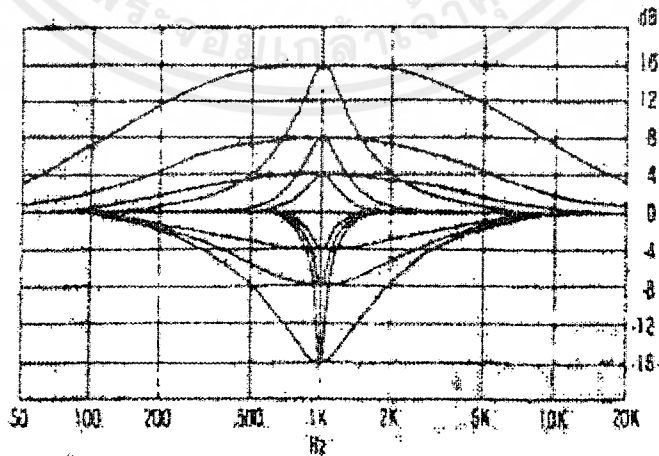


รูปที่1-2 ส่วนฟิลเตอร์ทั้งหมดถูกปรับให้มีการลดทอนสูงสุด

1.4 พารามетริก อีควอลไลเซอร์ (Parametric Equalizer)

กราฟฟิควอไลเซอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ สามารถควบคุมการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ มีดังนี้

- 1.4.1 อัตราการขยายหรือลดทอนของแต่ละย่านความถี่ (Boost or Cut)
- 1.4.2 ความถี่กลางสามารถเลื่อนได้ (Center Freq.)
- 1.4.3 ปรับความกว้างของแบนด์วิธได้ (Q-Adjustable) ทำให้สามารถปรับรูปร่างของการตอบสนองได้ดีขึ้น



รูปที่1-3 แสดงลักษณะของการอีควอลไลซ์ที่สามารถปรับค่า Q ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 อินดัคเตอร์จำลอง (Simulated Inductor)

คือ การจำลองวงจรขึ้นมาให้มีคุณสมบัติที่เหมือนกับ อินดัคเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้ อินพุท อิมพีแดนซ์ เปรียบเหมือนว่าเป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้หลักการของ Y – พารามิเตอร์ สำหรับ ทูพอร์ทเน็ตเวิร์ก โดยให้ $Y_{11}, Y_{22} = 0$ ปัจจุบัน อินดัคเตอร์จำลอง มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ละแบบก็มีโครงสร้างวงจรที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานประเภทที่ต่างกันไป อินดัคเตอร์จำลองที่ทำงานเหมาะสมกับวงจรหนึ่งก็อาจจะไม่เหมาะสมกับอีกวงจรหนึ่งก็ได้ เช่น ถ้าเป็นงานที่ต้องใช้กับความถี่สูงๆ การใช้ อินดัคเตอร์จำลองแบบธรรมดา ก็จะไม่เหมาะสม เนื่องจากถูกจำกัดด้วยค่า ยูนิตีเกน (Unity Gain) ของออปแอมป์เอง หรืองานที่ต้องการอุปกรณ์น้อยชิ้น ก็จะใช้ อินดัคเตอร์จำลองแบบที่มีอุปกรณ์น้อยที่สุดเพื่อความประหยัด เป็นต้น

1.6 ลักษณะและจุดมุ่งหมายของโครงการ

โครงการนี้เป็นการสร้างและออกแบบวงจร ออดิโอกราฟฟิคอีควอไลเซอร์ โดยการใช้ อินดัคเตอร์จำลองซึ่ง อินดัคเตอร์จำลองในปัจจุบันมีหลายแบบ ดังนั้นเราต้องวิเคราะห์ อินดัคเตอร์จำลองแบบต่างๆที่ได้ค้นคว้ามาว่าแบบใดที่เหมาะสมกับงานของเราที่สุด ค่าความไว (Sensitivity) เป็นทฤษฎีหนึ่งที่เรานำมาใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วย นอกจากการใช้ทฤษฎีของ ค่าความไว แล้ว รูปแบบของวงจรและ อิมพีแดนซ์ของ อินดัคเตอร์จำลองก็นำมาพิจารณาคู่กันด้วย

ส่วน ออดิโอกราฟฟิคอีควอไลเซอร์ในปัจจุบันก็มีอยู่มากมายเช่นกัน แต่โดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบค่าความถี่กลางและแบนด์วิธคงที่ ดังนั้นจะทำให้การปรับแต่งลักษณะของ ผลตอบสนองทางความถี่ตามที่เรารับต้องการนั้นไม่ราบเรียบพอ ดังนั้นถ้าสามารถปรับค่าความกว้างของแบนด์วิธได้ด้วย ก็จะทำให้การปรับแบนด์วิธเป็นไปตามต้องการได้ดีขึ้นอีก ดังนั้นเราจะออกแบบออดิโอกราฟฟิคอีควอไลเซอร์ให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า Q ได้ด้วย ซึ่งรูปแบบวงจรมัน เดิมทีเดียวจะใช้ได้กับ อินดัคเตอร์จำลองแบบ อินดัคเตอร์ล้วนๆ เท่านั้น แต่จะไม่สามารถใช้กับ อินดัคเตอร์จำลองแบบที่มี ค่าความต้านทานต่ออนุกรมปนอยู่ด้วย ดังนั้นเราจึงปรับปรุงวงจรส่วนนี้ใหม่ให้ใช้ได้กับ อินดัคเตอร์จำลองทุกแบบ และสามารถปรับค่า Q ได้ ซึ่งลักษณะของวงจรและการออกแบบจะอยู่บทต่อไปรวมถึงผลการทดลองด้วย

ส่วนจุดมุ่งหมายของโครงการนี้ก็เพื่อให้สามารถวิเคราะห์หรือออกแบบวงจรอডিโอกราฟฟิซีควอลไลเซอร์ โดยใช้อินต็คเตอร์จำลองด้วยตนเองได้ โดยใช้หลักทฤษฎีต่างๆและสมการทางคณิตศาสตร์มาประกอบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบให้ได้คุณสมบัติของวงจรตามต้องการ ซึ่งเราสามารถนำหลักการและสมการต่างๆที่ปรากฏอยู่ในโครงการนี้ไปออกแบบใช้งานจริงได้ทันที โดยขั้นตอนการออกแบบจะมีลักษณะเป็นขั้นตอนไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการคำนวณ และ อินดิเคเตอร์จำลองแบบต่างๆ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่จำเป็นในการวิเคราะห์หรือออกแบบอินดิเคเตอร์จำลองแบบต่างๆ เนื่องจากว่าในปัจจุบันนี้มีอินดิเคเตอร์จำลองมีมากมายหลายแบบ ดังนั้นการที่จะวิเคราะห์ว่าแบบใดดีกว่ากันจะต้องพิจารณา 2 อย่าง คือ พิจารณา ค่าความไว และพิจารณารูปแบบของอิมพีแดนซ์ ของตัวมันเอง

2.1 ค่าความไว(Sensitivity)

ค่าความไว คือการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทาง Performance บางอย่างของเน็ตเวิร์กใดๆ (หรือฟังก์ชันใดๆ)อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอินพุต 1 ตัวหรือมากกว่า ซึ่งประกอบอยู่ในเน็ตเวิร์กนั้นๆ(หรือฟังก์ชันนั้นๆ) ค่าความไว จะใช้สัญลักษณ์ S ซึ่งมีนิยามตามสมการต่อไปนี้

$$S_x^y = \frac{\partial(\ln y)}{\partial(\ln x)} = \frac{\partial y / y}{\partial x / x}$$
$$\therefore S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

ซึ่งในกรณีนี้ y หมายถึง ค่า อิมพีแดนซ์ ฟังก์ชัน ของ อินดิเคเตอร์จำลอง
 x หมายถึง ค่าอุปกรณ์ พาสซีฟ (R หรือC) ต่างๆในวงจร
อินดิเคเตอร์จำลองที่เราต้องพิจารณานั้นเอง

และจากสมการที่ (2.1) นี้ยังหมายถึง อัตราส่วนต่อ 1 หน่วยหรือค่าของ y จะเปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่า x เปลี่ยนแปลงไปด้วย

$$\text{สมมติ} \quad S_{R_2}^{Leq} = \frac{1}{2}$$

จะหมายถึง ถ้า R_2 ของวงจรอินดิเคเตอร์จำลอง (Leq) เปลี่ยนแปลงไป 1% จะมีผลทำให้ค่าของ Leq เปลี่ยนแปลงค่าไป $\frac{1}{2}$ % ด้วยเช่นกัน

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ฟังก์ชันของ y มักอยู่ในรูปที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากในการค่า ค่าความไว ของฟังก์ชันใดๆ เราควรใช้ตารางคุณสมบัติของ ฟังก์ชันค่าความไว ประกอบควบคู่กันไปด้วย ดังต่อไปนี้

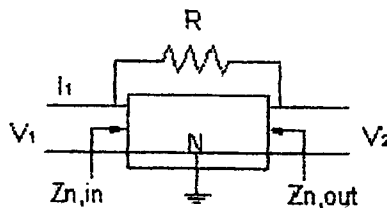
Number	Identify or property
1	$S_x^{ky} = S_{kx}^y = S_x^y$
2	$S_{1/x}^y = S_x^{1/y} = -S_x^y$
3	$S_x^{yu} = S_x^y + S_x^u$
4	$S_x^{y/u} = S_x^y - S_x^u$
5	$S_x^{y^n} = nS_x^y$
6	$S_{x^n}^y = \frac{1}{n} S_x^y$
7	$S_{x_1}^y = S_{x_2}^y \cdot S_{x_1}^{x_2}$
*8	$S_x^y = S_x^{ y } + jUS_x^{\arg y}$
*9	$S_x^{ y } = \text{Re} S_x^y$
*10	$US_x^{\arg y} = \text{Im} S_x^y$
11	$S_x^{y+u} = \frac{1}{y+u} (yS_x^y + uS_x^u)$
12	$S_x^{\ln y} = \frac{1}{\ln y} S_x^y$

ตารางแสดงคุณสมบัติของ ฟังก์ชันค่าความไว

* หมายเหตุ เมื่อ y เป็นจำนวนเชิงซ้อน และ k เป็นค่าคงที่

2.2 การจำลองความเหนี่ยวนำ (Simulated Inductance)

หมายถึง การนำวงจรใดๆมาประกอบกันเป็นเน็ตเวิร์ก เพื่อให้ได้วงจรมันแสดงคุณสมบัติของค่าความเหนี่ยวนำขึ้นมา เราเรียกววงจรที่จำลองขึ้นมาว่า อินดักเตอร์จำลอง หลักของการกำเนิด อินดักเตอร์จำลอง ขึ้นนั้น เราสามารถพิจารณาได้จาก ทูพอร์ทเน็ตเวิร์ก ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-1 แสดง ทูพอร์ทเน็ตเวิร์ก ที่เราพิจารณา

ซึ่งการจำลอง ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นมานั้นเราจะใช้ลักษณะโครงสร้างของ เน็ตเวอร์ก ดังรูปที่ 2-1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทูพอร์ทเน็ตเวอร์ก N ที่เราไม่ทราบส่วนประกอบภายในว่ามี ลักษณะเป็นอย่างไรบ้าง (Undetermined) และค่าความต้านทานที่ใช้ในการป้อนกลับ (Feedback Resister ; $R=1/G$) และเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น เราสมมติให้ทูพอร์ทเน็ตเวอร์ก ดังกล่าว มีความต้านทานทางอินพุต เป็นอนันต์ (Infinity) และอิมพีแดนซ์ทางเอาต์พุตเป็นศูนย์(0) จากรูปที่ 2-1 เราจะได้ว่า ;

$$\frac{V_1}{I_1} = Zin(s) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

และ

$$I_1 = G(V_1 - V_2) \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

จากสมการที่ (2.2) ถ้าเรามอง ในรูปแอดมิตแตนซ์(Admittance) จะได้ ;

$$\frac{I_1}{V_1} = \frac{1}{Zin(s)} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

แทนค่าในสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.4) เราจะได้ ;

$$\frac{G(V_1 - V_2)}{V_1} = \frac{1}{Zin(s)}$$

หรือ

$$G(1 - \frac{V_2}{V_1}) = \frac{1}{Zin(s)} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

สำหรับโครงสร้างของ ทูพอร์ทเน็ตเวอร์ก ในรูป 2-1 แล้ว สมการที่ (2.5) จะเป็นสมการหลักในการกำเนิด อิมพีแดนซ์ แบบต่างๆ ไม่ว่าจะ เป็น ค่าความเหนี่ยวนำ(Inductance) หรือ ค่าความจุไฟฟ้า(Capacitance) แต่ในที่นี้เราจะกำเนิดอิมพีแดนซ์ให้เป็นลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นเราจะกำหนด $Zin(s)$ ในรูปของ sK หรือถ้าต้องการให้อยู่ในรูปค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานเรากำหนดให้ $Zin(s)$ อยู่ในรูปของ $R_s + sK$ ดังสมการ

$$G(1 - \frac{V_2}{V_1}) = \frac{1}{sK} \quad ; \text{ สำหรับ Pure Inductance} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

และ

$$G(1 - \frac{V_2}{V_1}) = \frac{1}{R_s + sK} \quad ; \text{ สำหรับ Pure Inductance ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทาน} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่ใดๆ

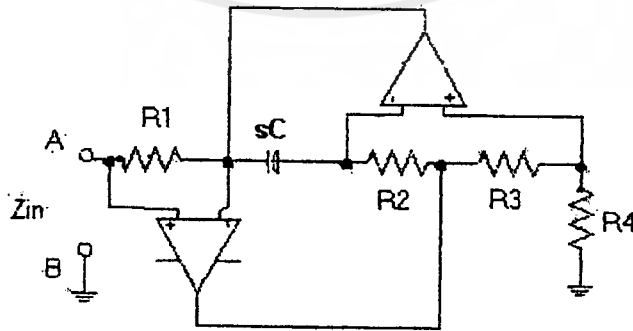
$R_s =$ ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม

ขั้นตอนต่อมาก็คือ การกำหนดค่า ฟังก์ชันถ่ายโอน ระหว่าง $V_2(s)$ กับ $V_1(s)$ ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดเป็นอิมพีแดนซ์ขึ้นมาในลักษณะที่เราต้องการนั่นเอง ซึ่งเราจะต้องกำหนด $\frac{V_2(s)}{V_1(s)}$ ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสม และให้สอดคล้องกับสมการที่ (2.6) หรือ (2.7) ด้วย จึงจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการออกมา และจากสมการที่ (2.6) และ (2.7) นี้เอง จะเป็นจุดเริ่มต้นของการกำเนิดอินดีคเตอร์จำลอง แบบต่างๆอีกหลายแบบในปัจจุบัน

2.3 ตัวอย่างของ อินดีคเตอร์จำลอง แบบต่างๆและการวิเคราะห์

เนื่องจาก อินดีคเตอร์จำลองนั้นมีหลายแบบด้วยกัน ดังนั้นเราจึงขอยกตัวอย่างอินดีคเตอร์จำลองบางแบบที่น่าสนใจพร้อมทั้งวิเคราะห์ ดังนี้

อินดีคเตอร์จำลองแบบที่ 1



รูปที่ 2-2 อินดีคเตอร์จำลองแบบที่ 1

อินดักเตอร์จำลองแบบนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Antoniou's general impedance converters (GIC) ซึ่งมีค่า Z_{in} คือ

$$Z_{in}(s) = \frac{sCR_1R_2R_4}{R_3} = sLeq \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

ซึ่ง

$$Leq = \frac{CR_1R_2R_4}{R_3} \quad (H) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

ในทางปฏิบัติจริง เราจะให้ $R_1=R_2=R_3=R_4=R$;

ดังนั้น

$$Leq = CR^2 \quad (H) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทาง ค่าความไว จะได้

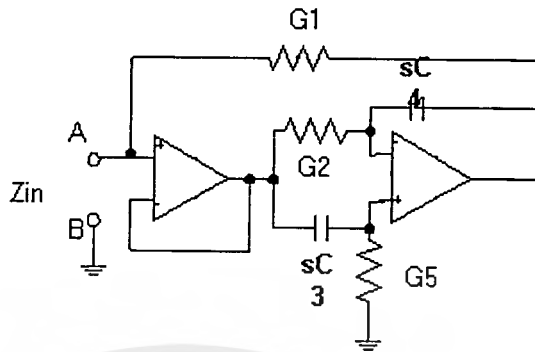
$$S_{R_1}^{Leq} = S_{R_2}^{Leq} = S_{R_4}^{Leq} = S_C^{Leq} = 1$$

และ

$$S_{R_3}^{Leq} = -1$$

นั่นหมายความว่า ลักษณะฟังก์ชันของ Leq จะมีความคงเส้นคงวา ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่และค่าของความเหนี่ยวนำ จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ตัวใดตัวหนึ่งโดยที่ไม่มีผลกระทบต่อฟังก์ชันของ Z_{in} เลย ดังนั้นจึงเป็น อินดักเตอร์จำลองแบบที่ดีแบบหนึ่งที่สามารถปรับค่า อินดักแทนซ์ ได้ แต่ถ้าพิจารณาในด้านอุปกรณ์ประกอบรวมในวงจร ยังพบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ยังคงมากขึ้นอยู่ ดังนั้นในการออกแบบที่ ต้องใช้อินดักเตอร์จำลองหลายๆตัว ก็จะทำให้สิ้นเปลืองอุปกรณ์มากขึ้นด้วย

อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2



รูปที่2-3 แสดง อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2

จากรูปวงจร เราจะได้ ;

$$Z_{in}(s) = \frac{s^2 C_3 C_4 + s C_4 G_5}{s C_4 G_1 G_5 + G_1 G_2 G_5} \dots\dots\dots(2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 ถ้าต้องการคุณสมบัติเป็น อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2 เราต้องกำหนด $C_3=C_4=C$;

$G_1=G_2=G_5=G$

ดังนั้น

$$Z_{in}(s) = \frac{sC}{G^2} = sCR^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

จะเห็นได้ว่าการเกิดค่า อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2 นั้น ยังคงต้องอาศัยการกำหนดเงื่อนไขของ อุปกรณ์ประกอบอีกด้วย ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริง ค่า Z_{in} ที่ได้ก็จะไม่ใช่ อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2 อีกต่อไป ดังนั้นเราไม่สามารถปรับค่า อินตคเตอรจําลองแบบที่ 2 โดยปรับค่า ความต้านทานตัวใดตัวหนึ่งได้ เนื่องจากจะมีผลกระทบต่อลักษณะของฟังก์ชัน เมื่อนำสมการที่ 2.11 มาพิจารณา ค่าความไว จะได้

$$S_{G_1}^{Z_{in}(s)} = 0 - \frac{(sC_4 G_5 + G_2 G_5) G_1}{s C_4 G_1 G_5 + G_1 G_2 G_5} = -1$$

$$S_{G_2}^{Z_{in}(s)} = 0 - \frac{G_1 G_2 G_5}{s C_4 G_1 G_5 + G_1 G_2 G_5} = -\frac{G}{sC + G}$$

$$S_{G_5}^{Zin(s)} = \frac{sC_4G_5}{s^2C_3C_4 + sC_4G_5} - \frac{(sC_4G_1 + G_1G_2)G_5}{sC_4G_1G_5 + G_1G_2G_5} = \frac{G}{sC + G} - 1$$

$$S_{C_3}^{Zin(s)} = \frac{s^2C_4C_3}{s^2C_3C_4 + sC_4G_5} = \frac{sC}{sC + G}$$

$$S_{C_4}^{Zin(s)} = 1 - \frac{sG_1G_5 \cdot C_4}{sC_4G_1G_5 + G_1G_2G_5} = 1 - \frac{sC}{sC + G}$$

ดังนั้น

$$S_{G_1}^{Zin(j\omega)} = -1$$

$$S_{G_2}^{Zin(j\omega)} = -\frac{G^2}{G^2 + (\omega C)^2} + j\frac{\omega CG}{G^2 + (\omega C)^2}$$

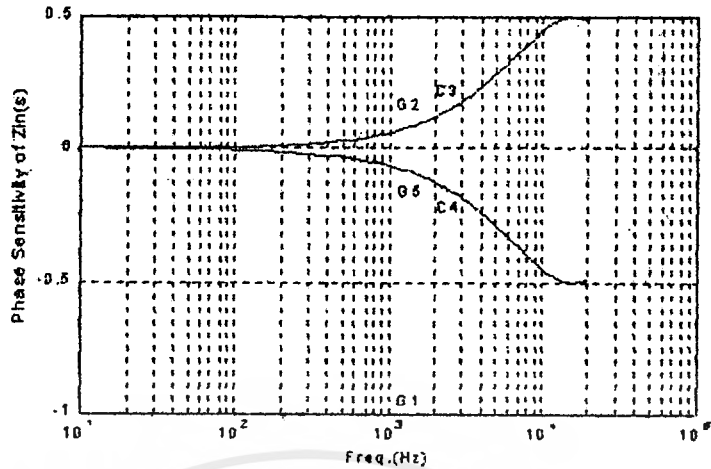
$$S_{G_5}^{Zin(j\omega)} = -\frac{(\omega C)^2}{G^2 + (\omega C)^2} - j\frac{\omega CG}{G^2 + (\omega C)^2}$$

$$S_{C_3}^{Zin(j\omega)} = \frac{(\omega C)^2}{(\omega C)^2 + G^2} + j\frac{\omega CG}{(\omega C)^2 + G^2}$$

$$S_{C_4}^{Zin(s)} = \frac{G^2}{G^2 + (\omega C)^2} - j\frac{\omega CG}{G^2 + (\omega C)^2}$$

จากการคำนวณข้างบน เมื่อเราเปรียบเทียบกับคุณสมบัติจากตารางข้อที่ 8 ได้แก่ $S_x^y = S_x^{|y|} + jUS_x^{\arg y}$ ก็หมายความว่าส่วนจำนวนจริงที่ได้จะหมายถึงค่าความไวทางขนาดต่อฟังก์ชัน y (Magnitude sensitivity) และส่วนจินตภาพจะหมายถึงค่าความไวทางเฟสต่อฟังก์ชัน y (Phase sensitivity) เมื่อพิจารณาดูเปรียบเทียบกับตารางข้างบน ฟังก์ชัน y ก็คือ $Zin(j\omega)$ และผลกระทบบนคุณลักษณะทาง อิมพีแดนซ์ ก็หมายถึงส่วนจินตภาพที่ได้นั่นเอง ซึ่งในการหา ค่าความไว ที่ผ่านมาเราสามารถทราบได้ว่าอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อลักษณะของฟังก์ชันหรือไม่ ก็ดูที่ส่วนจินตภาพของผลการคำนวณนั่นเอง หากปรากฏส่วนจินตภาพขึ้นหมายความว่า ลักษณะของฟังก์ชัน Zin ก็จะเปลี่ยนไปด้วย แต่ถ้าไม่ปรากฏส่วนจินตภาพขึ้น แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของ อีลีเมนต์ ใดๆ ในวงจรจะทำให้ขนาดของค่า อิมพีแดนซ์ เปลี่ยนไปเท่านั้น แต่จะไม่มีผลต่อลักษณะของฟังก์ชันเลย

จึงสรุปได้ว่า อินดักเตอร์จำลองแบบที่ 2 นี้มีค่าอุปกรณ์ พาสซีฟ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ก็มีผลต่อคุณสมบัติความเป็น อินดักแตนซ์ ด้วย ซึ่งเรานำส่วนจินตภาพมาพลอตกราฟ จะได้ดังรูป



รูปที่ 2-4 แสดง ค่าความไวทางเฟสของ Zn(s) ซึ่งรูปที่ได้ หมายถึง ผลกระทบต่อความ เป็น อินดักแตนซ์ มีค่ามากน้อยเพียงใด (G=1 / 10kΩ และ C=0.001µF)

2.4 อินดักเตอร์จำลองที่ใช้งาน

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาทำให้เราทราบว่า อินดักเตอร์จำลองที่ดีนั้นจะต้องมีความคงเส้นคงวาของลักษณะของฟังก์ชัน จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุปกรณ์ ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการกำเนิด อินดักเตอร์จำลองขึ้นโดยจะเป็นแบบที่มีเทอมของ ความต้านทานอนุกรมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นแบบที่ออกแบบได้ง่ายกว่าแบบที่มีแต่เทอมของ อินดักแตนซ์ เพียงอย่างเดียว

พิจารณาสมการที่ (2.7)

$$G(1 - \frac{V_2}{V_1}) = \frac{1}{R_s + sK}$$

เราต้องเลือก $\frac{V_2}{V_1}$ ที่เหมาะสม จึงจะทำให้สอดคล้องกับทางด้านขวามือของสมการ

ในที่นี้เราเลือก

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{sRC}{1 + sRC} \dots\dots\dots(2.13)$$

แทนค่าสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G\left(\frac{1}{1+sRC}\right) = \frac{1}{R_s + sK}$$

หรือ $\frac{1}{G}(sRC + 1) = R_s + sK$

ให้ $R = \frac{1}{G}$;

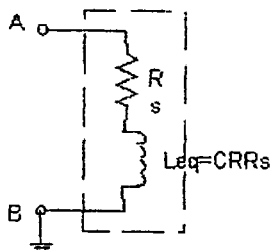
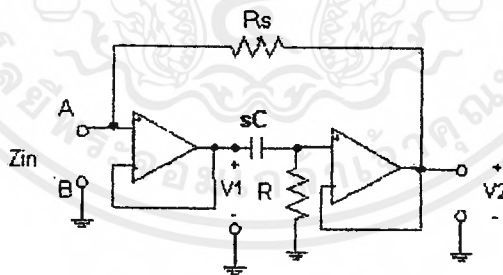
$$sR^2C + R = R_s + sK \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

ในที่นี้ $R_s = R, Leq = K = CR^2$

หรืออาจกำหนด

$$sRR_sC + R_s = R_s + sK \quad ; \text{เมื่อ } \frac{1}{G} = R_s \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

เทียบกับรูปที่ 2-1 เราแทนค่าความต้านทานในรูป 2-1 ด้วย R_s และเพื่อให้มีความสอดคล้องกับสิ่งที่สมมติขึ้นคือ ความต้านทานทางอินพุตเป็นอนันต์กับความต้านทานทางเอาต์พุตเป็นศูนย์ จึงต้องใช้ Op-Amp ต่อไว้ที่อินพุตและเอาต์พุต พร้อมทั้งนำ R และ C มาต่อให้ได้ลักษณะสอดคล้องกับสมการที่ 2.13 ดังนั้น เราจะได้วงจรดังรูปคือ



รูปที่ 2-5 อินดักเตอร์จำลองที่ได้ และ วงจรสมมูลย์

และเราจะได้;

$$R_s = R_s \quad (\Omega)$$

$$Leq = CRR_s \quad (H) \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\therefore S_{R_s}^{R_s} = 1$$

$$S_C^{Leq} = S_R^{Leq} = S_{R_s}^{Leq} = 1$$

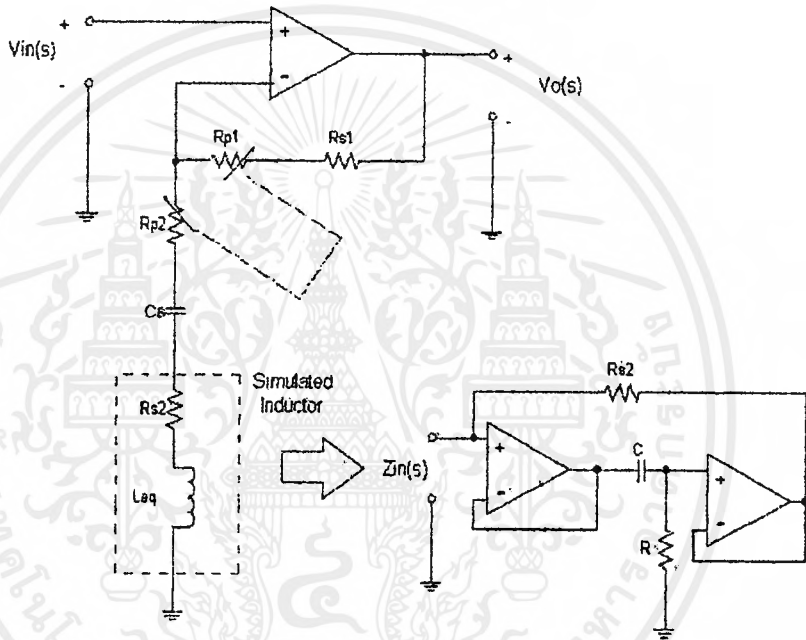
แสดงว่า อินดักเตอร์จำลองที่เราได้มานั้นมีความคงเส้นคงวาดี ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟังก์ชัน เมื่อค่าอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไป และจากรูปร่างลักษณะของสมการของ Leq คือ CRR_s ก็สามารถเปลี่ยนแปลงค่า อินดักแทนซ์โดยการปรับค่าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งใน CRR_s ให้เปลี่ยนไป โดยไม่มีผลกระทบข้างเคียงต่อสิ่งอื่น ๆ นอกจากค่า อินดักแทนซ์ ที่เปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น รวมทั้งใช้อุปกรณ์ พาสซีฟ น้อยชิ้นอีกด้วย

ดังนั้นในการออกแบบวงจร ฮอติโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์ เราก็จะนำวงจร อินดักเตอร์จำลอง แบบดังกล่าวมานี้ไปใช้งาน ซึ่งในบทที่ 3 จะเป็นการออกแบบส่วนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF.) เราจะนำ อินดักเตอร์จำลองแบบดังกล่าวไปเป็นส่วนวงจรเรโซแนนซ์ แบบอนุกรม (Series Resonance) อีกด้วย

บทที่ 3

การออกแบบวงจรส่วนวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

3.1 โครงสร้างของวงจรและสมการที่ใช้ในการออกแบบ



$$\begin{aligned} Z_{in}(s) &= R_{s2} + s(RR_{s2}C) \\ &= R_{s2} + s(L_{eq}) \\ L_{eq} &= RR_{s2}C \text{ (Henry)} \end{aligned}$$

รูปที่ 3-1 ลักษณะของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน
(Band Pass Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-1 มีสมการของ $H(s)$ คือ

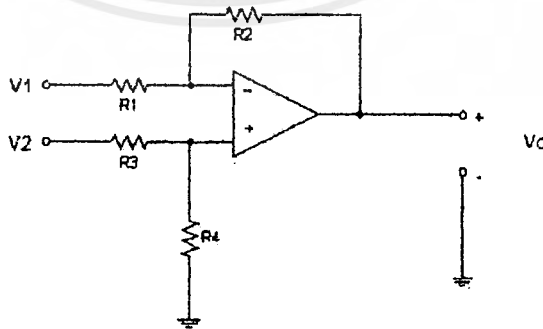
$$H(s) = 1 + \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{Leq} \right]}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{Leq} \right] + \frac{1}{Leq C_s}} \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ $H(s) = \frac{Vo(s)}{Vin(s)}$

เอา $Vin(s)$ คูณกับสมการที่(3.1) ตลอดสมการ จะได้ ;

$$Vo(s) = Vin(s) + \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{Leq} \right] Vin(s)}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{Leq} \right] + \frac{1}{Leq C_s}} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

จากสมการที่(3.2) เราจะเห็นว่า มีเทอมผลบวกของของ $Vin(s)$ ประปนเข้ามาด้วย เนื่องจากมีเทอมของ $Vin(s)$ บวกกันในสมการที่(3.2) ซึ่งในขณะนี้เราต้องการเพียงเทอมของ BPF ดังนั้นเราสามารถกำจัดเทอม $Vin(s)$ ให้หมดไปได้ โดยใช้วงจรลบสัญญาณ(Subtractor)เข้ามาช่วย โดยเราจะต่อวงจรลบสัญญาณดังรูป



รูปที่ 3-2 วงจรลบสัญญาณ(Subtractor)

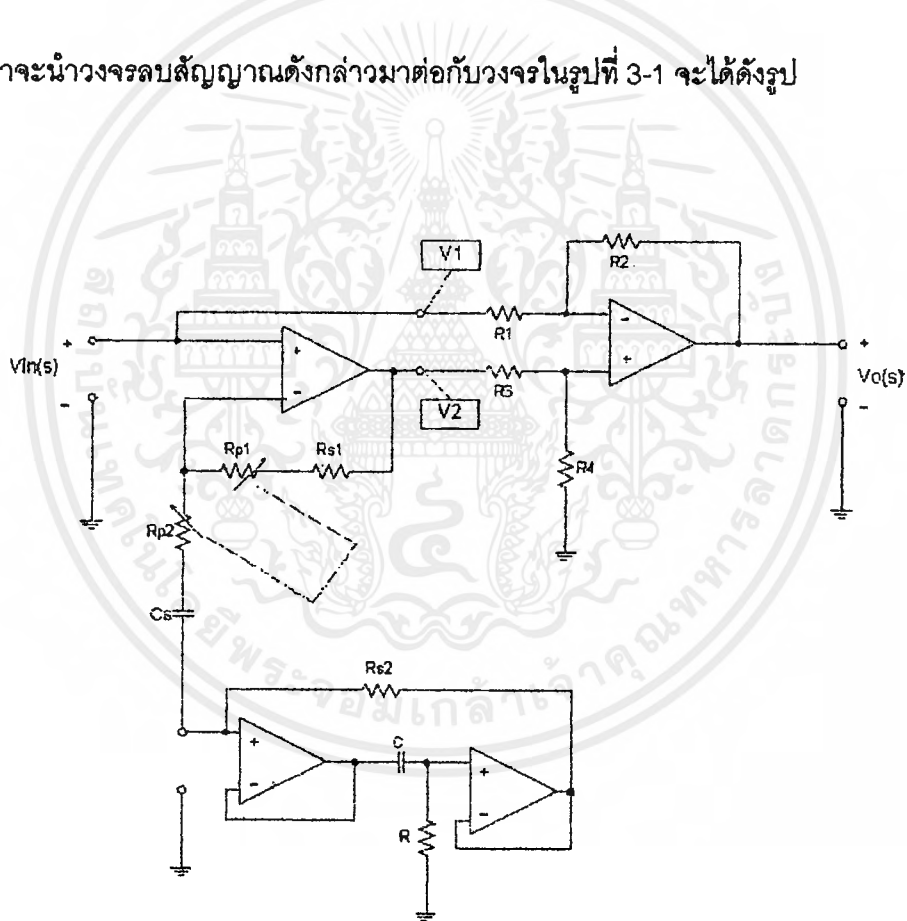
วงจรในรูปที่ 3-2 เราจะได้สมการของ V_o คือ

$$V_o = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

จากสมการที่(3.3) ถ้า $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ เราจะได้

$$V_o = V_2 - V_1 \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

ซึ่งเราจะนำวงจรลบสัญญาณดังกล่าวมาต่อกับวงจรในรูปที่ 3-1 จะได้ดังรูป



รูปที่ 3-3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ได้

จากรูปที่ 3-3 เราจะได้:

$$V_1(s) = Vin(s)$$

และ

$$V_2(s) = Vin(s) + \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{RR_{s2}C} \right] Vin(s)}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}$$

ถ้า $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ เราจะได้

$$Vo = V_2(s) - V_1(s) \dots\dots\dots(3.5)$$

แทนค่า $V_1(s)$ และ $V_2(s)$ ในสมการที่(3.5) จะได้

$$Vo(s) = \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{RR_{s2}C} \right] Vin(s)}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}} \dots\dots\dots(3.6)$$

ดังนั้น

$$\frac{Vo(s)}{Vin(s)} = \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{RR_{s2}C} \right]}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}$$

หรือ

$$H(s) = \frac{s \left[\frac{R_{p1} + R_{s1}}{RR_{s2}C} \right]}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}} \dots\dots\dots(3.7)$$

จากสมการที่(3.7)จะเห็นว่าเราได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนH(s) เป็น BPF ตามที่เราต้องการ

เมื่อเทียบกับรูปแบบฟังก์ชันมาตรฐานของ BPF เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s) = K \cdot \frac{s\omega_b}{s^2 + s\omega_b + \omega_p^2} \dots\dots\dots(3.8)$$

หรือ

$$H(s) = \frac{R_{p1} + R_{s1}}{R_{p2} + R_{s2}} \cdot \frac{s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}]}{s^2 + s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}} \dots\dots\dots(3.9)$$

ซึ่งจากสมการที่(3.9) เราได้ $K = 1$ เนื่องจาก R_{p1} กับ R_{p2} เราใช้เป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ แบบ 2 ชั้น แขนร่วม ดังนั้น $R_{p1} = R_{p2}$ และเราใช้ $R_{s1} = R_{s2}$ เพื่อสามารถปรับค่า Q ได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองทางขนาดของวงจร และจากวงจรรูปที่ 3-3 และสมการที่ (3.9) จะได้

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{RR_{s2}CC_s}} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$Q_p = \frac{\omega_p}{\omega_b} = \frac{1}{R_{s1} + R_{p2}} \sqrt{\frac{RR_{s2}C}{C_s}}$$

จากสมการที่(3.9) ;

$$C_s = \frac{1}{\omega_p^2 RR_{s2}C} \dots\dots\dots(3.11)$$

แทนค่าสมการที่(3.11) ลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$Q_p = \frac{\omega_p RR_{s2}C}{R_{s2} + R_{p2}} \dots\dots\dots(3.12)$$

หรือ

$$Q_p = \frac{\omega_p Leq}{R_{s2} + R_{p2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore Leq = \frac{Q_p(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} \dots\dots\dots(3.13)$$

พิจารณาสมการที่ (3.10) อีกครั้ง จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่า Q_p ได้โดยปรับค่า R_{p2} โดยไม่มีผลกระทบใดๆกับค่า Leq หรือค่าอื่นๆของวงจร และยังไม่มีผลกระทบต่ออัตราขยายของวงจรอีกด้วย เนื่องจาก $R_{p2} = R_{p1}$ และ $R_{s1} = R_{s2}$ จึงทำให้ค่า $K = 1$ ดังได้อธิบายแล้วในสมการที่(3.9)

ดังนั้นการปรับค่า Q_p ให้มีค่าสูงสุด ($Q_{p \max}$) และการปรับ Q_p ให้มีค่าต่ำสุด ($Q_{p \min}$) จะไม่ทำให้ค่าของ Leq เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด และพิจารณาสมการที่(3.10) , $Q_{p \max}$ จะเกิดขึ้นได้เมื่อปรับ $R_{p2} = 0\Omega$ และ $Q_{p \min}$ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปรับ R_{p2} ให้มีค่าสูงสุด เนื่องจาก Leq คงที่ ดังนั้นเรานำสมการที่(3.13)มาแทนค่า ดังนี้

$$Leq(Q_{p \max}) = Leq(Q_{p \min})$$

$$\frac{Q_{p \min}(R_{s2} + 0\Omega)}{\omega_p} = \frac{Q_{p \min}(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} ; Q_{p \max} \text{ เมื่อ } R_{p2} = 0 \Omega$$

$$Q_{p \max} R_{s2} = Q_{p \min} \cdot (R_{s2} + R_{ps})$$

$$\therefore R_{s2} = \frac{Q_{p \min} \cdot R_{p2}}{(Q_{p \max} - Q_{p \min})} \dots\dots\dots(3.14)$$

และในตอนต้น เรากำหนดให้ $R_{s1} = R_{s2}$ และ $R_{p1} = R_{p2}$

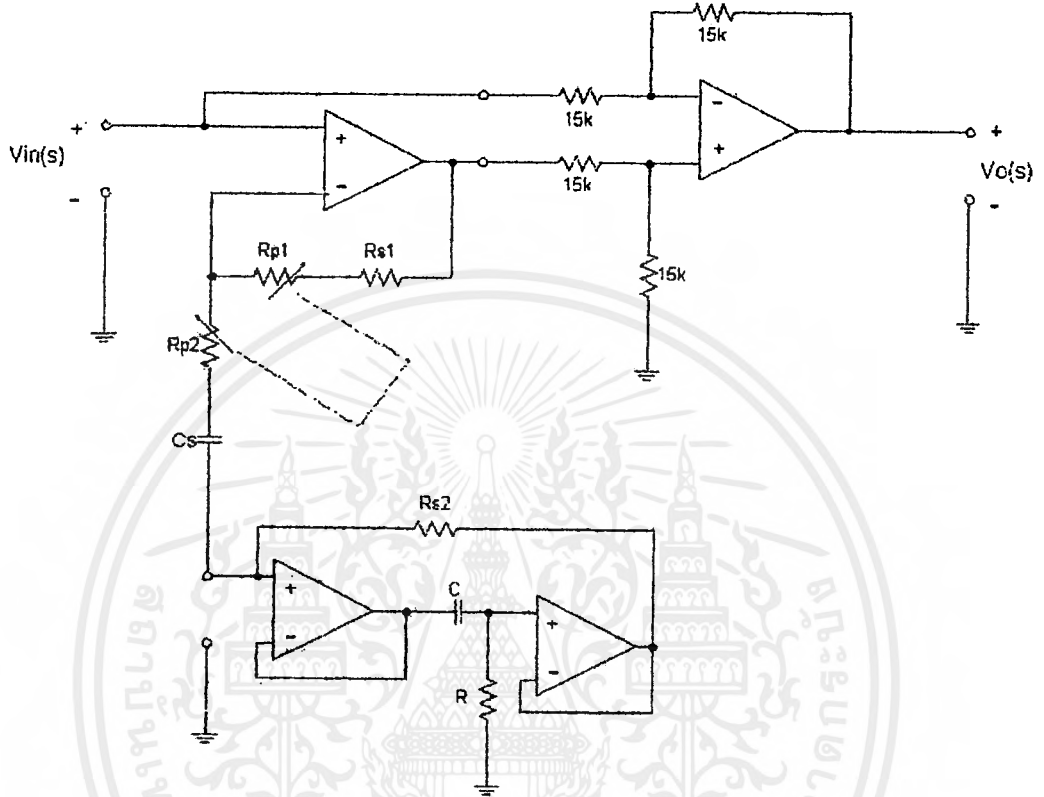
$$R_{s1} = R_{s2} = \frac{Q_{p \min} \cdot R_{p2}}{(Q_{p \max} - Q_{p \min})} = \frac{Q_{p \min} \cdot R_{p1}}{(Q_{p \max} - Q_{p \min})} \dots\dots\dots(3.15)$$

และในการออกแบบวงจรนั้น เราสามารถนำสมการทั้งหมดมาใช้ออกแบบเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

3.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านให้ได้ค่าความถี่กลาง (f_p) และช่วงของการปรับค่า Q_p ตามต้องการ

นำสมการที่ (3.10) ถึงสมการที่ (3.15) มาได้ดังนี้:

1. เริ่มแรก ต้องกำหนดช่วงค่า Q_p ที่ต้องการให้ปรับค่าได้นั้นคือ กำหนดค่า $Q_{p \min}$ เท่ากับเท่าไรและ $Q_{p \max}$ เท่ากับเท่าไร และกำหนดค่าความถี่กลาง (f_p) ที่เราต้องการด้วย
2. เลือกค่า R_{p1} และ R_{p2} ซึ่งเป็น โทเทนชิโอมิเตอร์ 2 ชั้นแบบแกนร่วม โดยใช้ค่าที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด
3. นำค่า $Q_{p \max}$, $Q_{p \min}$ และ R_{p1} (หรือ R_{p2}) มาแทนในสมการที่(3.15) ซึ่งในขั้นนี้เราจะได้ออกค่า R_{s1} และ R_{s2} ออกมา
4. นำค่าที่ได้จากข้อ 1. ถึงข้อ 3. มาแทนในสมการที่(3.13) (Q_p แทนด้วย $Q_{p \min}$) เราจะได้ออกค่า Leq ออกมา
5. จากสมการ $Leq = RR_{s2}C$ ให้เรากำหนดค่า R ขึ้นมาสักค่า โดยเป็นค่าที่หาซื้อได้ง่าย เมื่อเราเลือกค่า R แล้ว เราจะได้ค่า C จากสูตร $C = \frac{Leq}{RR_{s2}}$ และหาค่า C_s ได้จาก $C_s = \frac{1}{\omega_p^2 Leq}$
6. จากวงจรรูปที่ 3-3 เลือกค่า $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ (ใช้ค่าเท่าไรก็ได้ที่อยู่ในเงื่อนไขส่วนใหญ่่มักจะใช้ค่าที่ไม่สูงมากนัก)
7. เมื่อถึงขั้นนี้ เราจะได้ออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ที่มี ω_p และช่วงของการปรับค่า Q_p ตามที่เราต้องการ ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 รูปวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ที่ได้

3.3 การออกแบบวงจรใช้งานจริง

ในที่นี้ เราจะออกแบบวงจร อดติโอ กราฟฟิค อีควอลไลเซอร์ มีความถี่กลางจำนวน 5 ช่วงคือ 60 Hz, 240 Hz, 1 KHz, 4 KHz และ 16 KHz และปรับค่า Q ได้ตั้งแต่ 0.2 ถึง 10 ดังนั้น เราต้องออกแบบส่วนวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ดังรูปที่ 3-4 เสียก่อน ดังนี้

$$Q_{p \max} = 10, Q_{p \min} = 0.2 \text{ เลือก } R_{p1} = R_{p2} = 10 \text{ K}\Omega \text{ แบบ B}$$

$$\text{เลือก } R = 100 \text{ K}\Omega$$

จะได้;

$$R_{s1} = R_{s2} = \frac{(0.2)(10 \text{ K}\Omega)}{(10 - 0.2)} = 204.08 \Omega \text{ (เลือกใช้ค่า } 200 \Omega \text{)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $f_p = 60\text{HZ}$;

แทนค่าต่างๆในสมการที่ (3.13);

$$\therefore Leq = \frac{Q_p \min(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} = \frac{0.2(204.08 + 10\text{K})}{(2\pi * 60)} = 5.413(\text{Henry})$$

$$\therefore C = \frac{Leq}{RR_{s2}C} = \frac{5.413}{(100\text{K})(204.08)} = 0.265 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.27 \mu\text{F})$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega_p^2 Leq} = \frac{1}{(2\pi * 60)^2 * (5.413)} = 1.3 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 1.2 \mu\text{F})$$

ที่ $f_p = 240\text{HZ}$;

แทนค่าต่างๆในสมการที่ (3.13);

$$\therefore Leq = \frac{Q_p \min(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} = \frac{0.2(204.08 + 10\text{K})}{(2\pi * 240)} = 1.353(\text{Henry})$$

$$\therefore C = \frac{Leq}{RR_{s2}C} = \frac{1.353}{(100\text{K})(204.08)} = 0.066 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.068 \mu\text{F})$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega_p^2 Leq} = \frac{1}{(2\pi * 240)^2 * (1.353)} = 0.325 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.33 \mu\text{F})$$

ที่ $f_p = 1\text{KHZ}$;

แทนค่าต่างๆในสมการที่ (3.13);

$$\therefore Leq = \frac{Q_p \min(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} = \frac{0.2(204.08 + 10\text{K})}{(2\pi * 1000)} = 0.325(\text{Henry})$$

$$\therefore C = \frac{Leq}{RR_{s2}C} = \frac{0.325}{(100\text{K})(204.08)} = 0.016 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.015 \mu\text{F})$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega_p^2 Leq} = \frac{1}{(2\pi * 1000)^2 * (0.325)} = 0.078 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.082 \mu\text{F})$$

ที่ $f_p = 4\text{KHZ}$;

แทนค่าต่างๆในสมการที่ (3.13);

$$\therefore Leq = \frac{Q_p \min(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} = \frac{0.2(204.08 + 10\text{K})}{(2\pi * 4000)} = 0.081(\text{Henry})$$

$$\therefore C = \frac{Leq}{RR_{s2}C} = \frac{0.081}{(100\text{K})(204.08)} = 0.0039 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.0039 \mu\text{F})$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega_p^2 \cdot Leq} = \frac{1}{(2\pi * 4000)^2 * (0.081)} = 0.0195 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.02 \mu\text{F})$$

ที่ $f_p = 16\text{KHZ}$;

แทนค่าต่างๆในสมการที่ (3.13);

$$\therefore Leq = \frac{Q_p \min(R_{s2} + R_{p2})}{\omega_p} = \frac{0.2(204.08 + 10\text{K})}{(2\pi * 16000)} = 0.02(\text{Henry})$$

$$\therefore C = \frac{Leq}{RR_{s2}C} = \frac{0.02}{(100\text{K})(204.08)} = 980 \text{ pF} \quad (\text{ใช้ } 0.001 \mu\text{F})$$

$$\therefore C_s = \frac{1}{\omega_p^2 \cdot Leq} = \frac{1}{(2\pi * 16000)^2 * (0.2)} = 0.0049 \mu\text{F} \quad (\text{ใช้ } 0.0047 \mu\text{F})$$

ดังนั้น ในวงจรรูปที่ 3-4 เราจะได้ค่าอุปกรณ์ในวงจรดังต่อไปนี้

$$R_1 = R_2 = 15\text{K}\Omega, VR_1 = \text{Pot ค่า } 100\text{K}\Omega$$

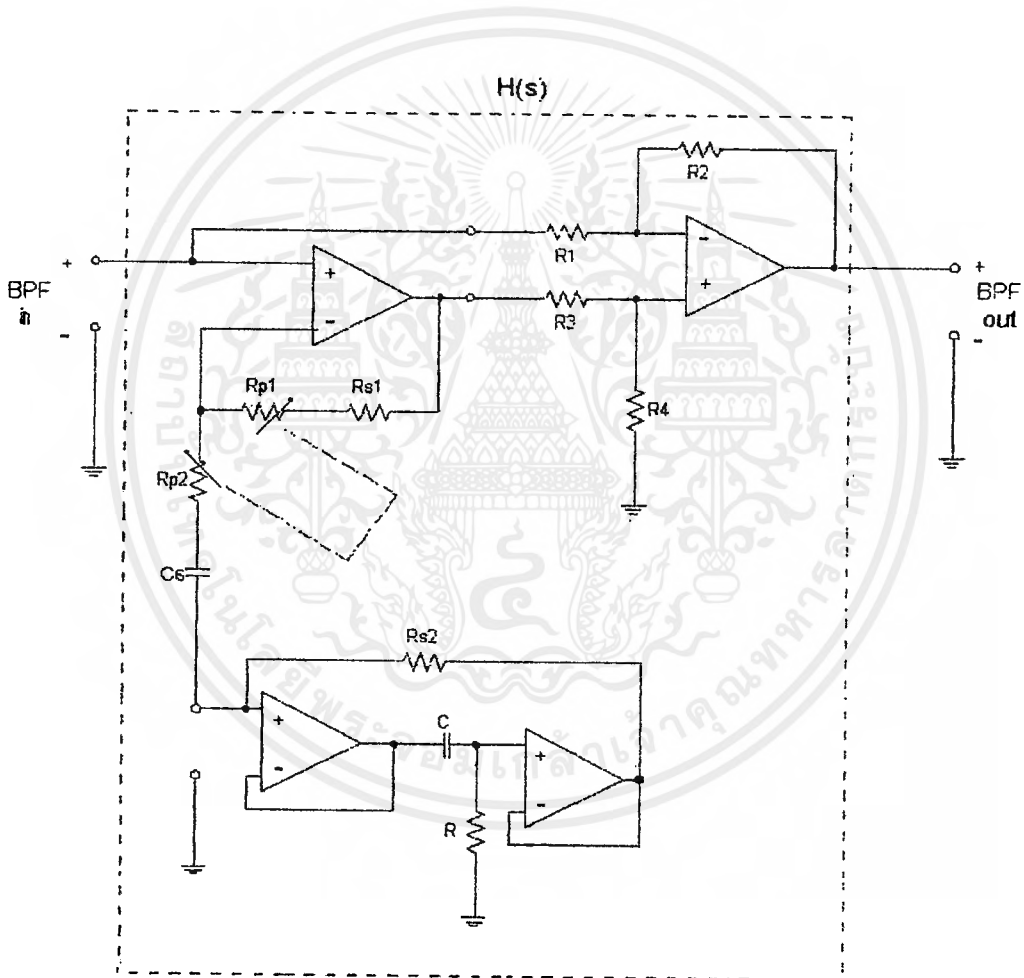
$$R_{p1} = R_{p2} = 10\text{K}\Omega (\text{แบบ B 2 ชั้น แขนงร่วม}), R_{s1} = R_{s2} = 200\Omega$$

Frequency (HZ)	Leq (H)	C (μF)	C _s (μF)
60	5.413	0.27	1.2
240	1.353	0.068	0.33
1K	0.325	0.015	0.082
4 K	0.081	0.0039	0.02
16 K	0.02	0.001	0.0047

ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรรูปที่ 3.4 ที่ f_p มีค่าต่างๆ

จากนั้นเราจะนำวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ที่ได้ไปต่อกับวงจร บูลท์-คัท ดังรูปที่ 3-5 ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) ซึ่งจะทำให้เป็นวงจรออกไดโอดกราฟฟิค อีควอไลเซอร์ที่มีความสามารถในการ บูลท์-คัท ที่ f_p ต่างๆได้ต่อไป ซึ่งเราจะอธิบายต่อไปในภายหลัง

3.4 การพิจารณาค่าความไวของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



รูปที่ 3-5 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่นำมาพิจารณา ค่าความไว

จากรูปจะได้สมการ $H(s)$ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s) = \frac{R_{p1} + R_{s1}}{R_{p2} + R_{s2}} \cdot \frac{s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}]}{s^2 + s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}$$

ซึ่ง

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{RR_{s2}CC_s}}$$

$$Q_p = \frac{1}{R_{p2} + R_{s2}} \sqrt{\frac{RR_{s2}C}{C_s}}$$

จะได้

$$S_{R_{p1}}^{\omega_p} = S_{R_{s1}}^{\omega_p} = S_{R_{p2}}^{\omega_p} = 0$$

$$S_R^{\omega_p} = S_{R_{s2}}^{\omega_p} = S_C^{\omega_p} = S_{C_s}^{\omega_p} = -\frac{1}{2}$$

$$S_R^{Q_p} = S_C^{Q_p} = \frac{1}{2}$$

$$S_{C_s}^{Q_p} = -\frac{1}{2}$$

$$S_{R_{p1}}^{Q_p} = S_{R_{s1}}^{Q_p} = 0$$

$$S_{R_{p2}}^{Q_p} = -\frac{R_{p2}}{R_{p2} + R_{s2}}$$

$$S_{R_{s2}}^{Q_p} = \frac{1}{2} - \frac{R_{s2}}{R_{p2} + R_{s2}}$$

พิจารณา ค่าความไวทางขนาด $S_{x_i}^{|H(j\omega)|}$ กับ ค่าความไวทางเฟส $S_{x_i}^{\phi(\omega)}$ เมื่อ x_i เป็นค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจร

จากสมการ $H(s)$:

$$H(s) = \frac{R_{p1} + R_{s1}}{R_{p2} + R_{s2}} \cdot \frac{s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}]}{s^2 + s[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}$$

$$= A(s) \cdot \frac{N(s)}{D(s)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$S_{R_{p1}}^{H(s)} = S_{R_{p1}}^{A(s)} = \frac{R_{p1}}{R_{p1} + R_{s1}}$$

$$S_{R_{s1}}^{H(s)} = S_{R_{s1}}^{A(s)} = \frac{R_{s1}}{R_{p1} + R_{s1}}$$

$$\begin{aligned} S_{R_{p2}}^{H(s)} &= S_{R_{p2}}^{A(s)} + S_{R_{p2}}^{N(s)} - S_{R_{p2}}^{D(s)} \\ &= -\frac{R_{p2}}{R_{p2} + R_{s2}} + \frac{R_{p2}}{R_{p2} + R_{s2}} \left[\frac{s}{RR_{s2}C} \cdot \frac{R_{p2}}{D(s)} \right] \\ &= -\frac{1}{RR_{s2}C} \cdot \left[\frac{sR_{p2}}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}} \right] \\ \therefore S_{R_{p2}}^{H(j\omega)} &= -\frac{R_{p2}}{RR_{s2}C} \cdot \left[\frac{j\omega}{\frac{1}{RR_{s2}CC_s} - \omega^2 + j\omega \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right]} \right] \\ &= -R_{p2}C_s \cdot \left[\frac{j\omega}{1 - \omega^2 RR_{s2}CC_s + j\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s} \right] \\ \therefore S_{R_{p2}}^{H(j\omega)} &= -R_{p2}C_s \cdot \left[\frac{\omega^2(R_{p2} + R_{s2})C_s + j\omega(1 - \omega^2 RR_{s2}CC_s)}{(1 - \omega^2 RR_{s2}CC_s)^2 + [\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s]^2} \right] \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$S_{R_{p2}}^{|H(j\omega)|} = \frac{-\omega^2 R_{p2} (R_{p2} + R_{s2}) C_s^2}{(1 - \omega^2 RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s)^2} \quad ; \text{ Real Part}$$

$$S_{R_{p2}}^{\phi(\omega)} = \frac{\omega R_{p2} C_s (\omega^2 RR_{s2}CC_s - 1)}{(1 - \omega^2 RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s)^2} \quad ; \text{ Imagine Part}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 S_{R_{s2}}^{H(s)} &= S_{R_{s2}}^{A(s)} + S_{R_{s2}}^{N(s)} - S_{R_{s2}}^{D(s)} \\
 &= -\frac{R_{s2}}{(R_{p2} + R_{s2})} + \left[\frac{R_{s2}}{R_{p2} + R_{s2}} - 1 \right] - \left[\left(\frac{-sR_{p2}}{RR_{s2}^2C} - \frac{1}{RR_{s2}^2CC_s} \right) \cdot \frac{R_{s2}}{D(s)} \right] \\
 &= -1 + \left[\frac{\left(\frac{sR_{p2}C_s + 1}{RR_{s2}^2CC_s} \right) \cdot \frac{R_{s2}}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}}{\left(\frac{sR_{p2}C_s + 1}{RR_{s2}^2CC_s} \right) \cdot \frac{R_{s2}}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C} \right] + \frac{1}{RR_{s2}CC_s}}} \right] \\
 \therefore S_{R_{s2}}^{H(s)} &= -1 + \left[\frac{sR_{p2}C_s + 1}{s^2RR_{s2}CC_s + s(R_{p2} + R_{s2})C_s + 1} \right] \\
 \therefore S_{R_{s2}}^{H(j\omega)} &= -1 + \left[\frac{(1 + j\omega R_{p2}C_s)}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) + j\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s} \right] \\
 &= -1 + \left[\frac{(1 + j\omega R_{p2}C_s) \cdot \left((1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) - j\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s \right)}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s)^2} \right]
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$S_{R_{s2}}^{|H(j\omega)|} = -1 + \left[\frac{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) + \omega^2R_{p2}(R_{p2} + R_{s2})C_s^2}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s)^2} \right] \quad ; \text{ Real Part}$$

$$S_{R_{s2}}^{\phi(j\omega)} = \frac{\omega C_s (R_{p2}(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) - (R_{p2} + R_{s2}))}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega(R_{p2} + R_{s2})C_s)^2} \quad ; \text{ Imagine Part}$$

$$\begin{aligned}
 S_R^{H(s)} &= S_R^{A(s)} + S_R^{N(s)} - S_R^{D(s)} \\
 &= S_R^{N(s)} - S_R^{D(s)} \\
 &= -1 - \left[-\frac{s(R_{p2} + R_{s2})}{R^2R_{s2}C} - \frac{1}{R^2R_{s2}CC_s} \right] \cdot \frac{R}{D(s)}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= -1 + \left[\frac{sC_s(R_{p2} + R_{s2}) + 1}{R R_{s2} C C_s} \right] \cdot \frac{1}{s^2 + s \left[\frac{R_{p2} + R_{s2}}{R R_{s2} C} \right] + \frac{1}{R R_{s2} C C_s}} \\
 &= -1 + \left[\frac{sC_s(R_{p2} + R_{s2}) + 1}{s^2(R R_{s2} C C_s) + sC_s(R_{p2} + R_{s2}) + 1} \right] \\
 S_R^{H(j\omega)} &= -1 + \left[\frac{1 + j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) + j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})} \right] \cdot \left[\frac{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})} \right] \\
 &= -1 + \left[\frac{[1 + j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})] \cdot [(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right] \\
 \therefore S_R^{H(j\omega)} &= -1 + \left[\frac{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) + [\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]^2 - j\omega^3 R R_{s2} C C_s^2 (R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right]
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 S_R^{H(j\omega)} &= -1 + \left[\frac{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) + [\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]^2}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right] \quad ; \text{Real Part} \\
 S_R^{\phi(j\omega)} &= \left[\frac{\omega^3 R R_{s2} C C_s^2 (R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right] \quad ; \text{Imagine Part}
 \end{aligned}$$

ในการทำงานเดียวกันกับ $S_R^{H(j\omega)}$ เราจะได้ $S_C^{H(j\omega)}$ ดังนี้

$$\therefore S_C^{H(j\omega)} = -1 + \left[\frac{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) - [\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]^2 - j\omega^3 R R_{s2} C C_s^2 (R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right]$$

$$S_C^{H9j\omega0} = -1 + \left[\frac{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s) + [\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]^2}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right] \quad ; \text{Real Part}$$

$$S_C^{\phi(j\omega)} = \left[\frac{\omega^3 R R_{s2} C C_s^2 (R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2 R R_{s2} C C_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \right] \quad ; \text{Imagine Part}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 S_{C_s}^{H(s)} &= S_{C_s}^{A(s)} + S_{C_s}^{N(s)} - S_{C_s}^{D(s)} \\
 &= -S_{C_s}^{D(s)} \\
 &= -\left[-\frac{1}{RR_{s2}CC_s^2} \right] \cdot \frac{C_s}{D(s)} \\
 &= \frac{1}{s^2RR_{s2}CC_s + s(R_{p2} + R_{s2})C_s + 1}
 \end{aligned}$$

$$S_{C_s}^{H(j\omega)} = \left[\frac{1}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) + j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})} \right] \cdot \left[\frac{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})} \right]$$

$$\therefore S_{C_s}^{H(j\omega)} = \left[\frac{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s) - j\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + [\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})]^2} \right]$$

ดังนั้น

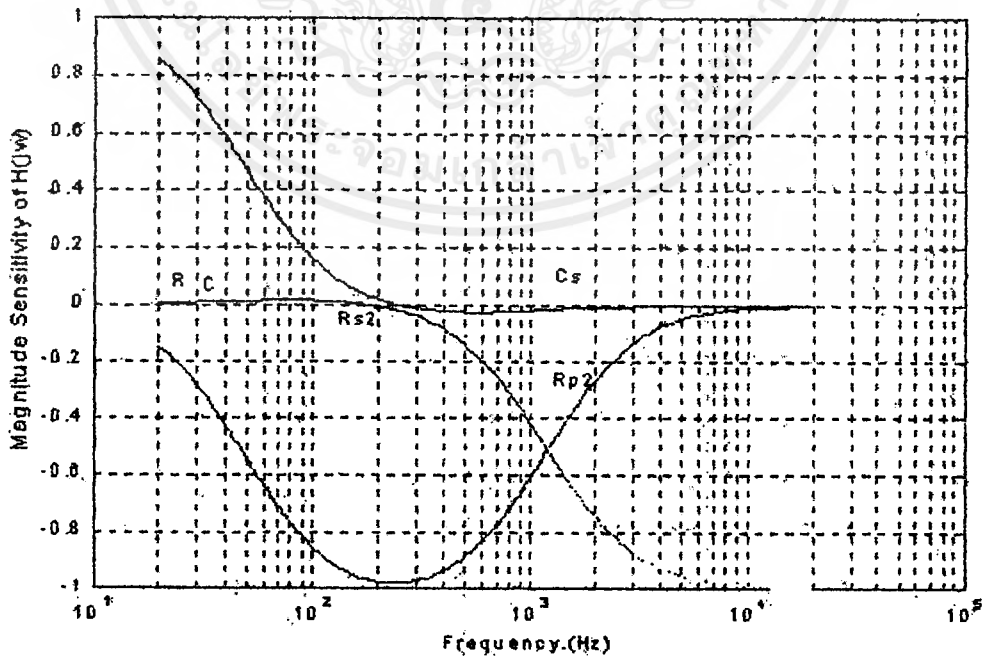
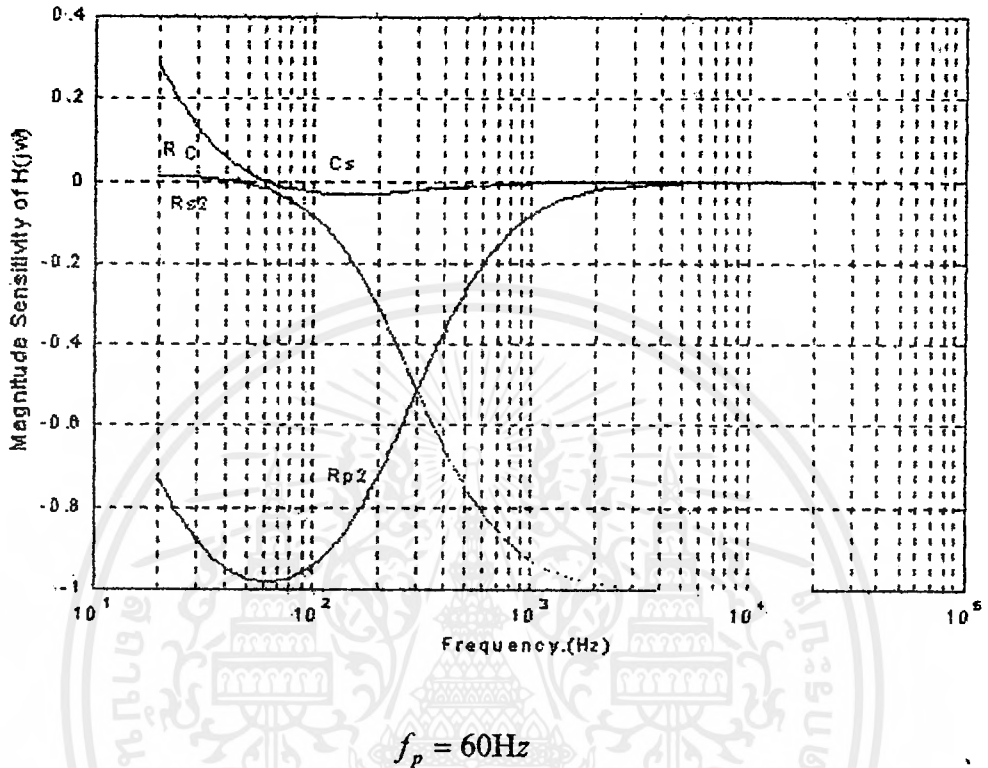
$$S_{C_s}^{|H(j\omega)|} = \frac{1 - \omega^2RR_{s2}CC_s}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \quad ; \text{ Real Part}$$

$$S_{C_s}^{\phi(j\omega)} = -\frac{\omega C_s(R_{p2} + R_{s2})}{(1 - \omega^2RR_{s2}CC_s)^2 + (\omega C_s(R_{p2} + R_{s2}))^2} \quad ; \text{ Imagine Part}$$

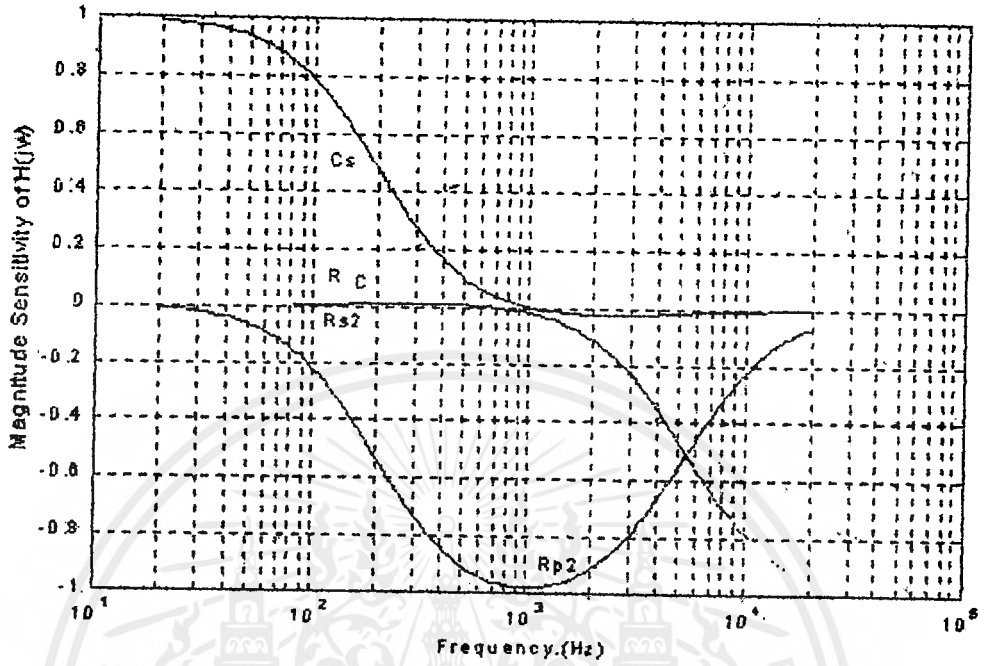
ซึ่งในตอนนี้อาจจะได้สมการ $S_{x_i}^{|H(j\omega)|}$ และ $S_{x_i}^{\phi(j\omega)}$ ขึ้นเนื่องมาจากการคลาดเคลื่อนของค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจรขึ้นเนื่องมาจากการที่เราใช้ค่าอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาด (ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากการที่เราคำนวณเล็กน้อย) การเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ(มักจะเกิดขึ้นเมื่อใช้งานกลางแจ้งในสภาพอากาศร้อนจัด) เป็นต้น และ x_i หมายถึง อุปกรณ์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อ แอมพลิจูด และ เฟส ของวงจร

จากนั้น เราจะนำค่าอุปกรณ์ต่างๆที่มีผลต่อ แอมพลิจูด และ เฟส ของวงจรมาแทนค่าในสมการ $S_{x_i}^{|H(j\omega)|}$ และ $S_{x_i}^{\phi(j\omega)}$ ที่ได้ทั้งหมด แล้วพลอตค่า ค่าความไว เทียบความถี่โดยใช้ MATLAB เราจะได้ค่า ค่าความไว ดังรูปกราฟต่อไปนี้

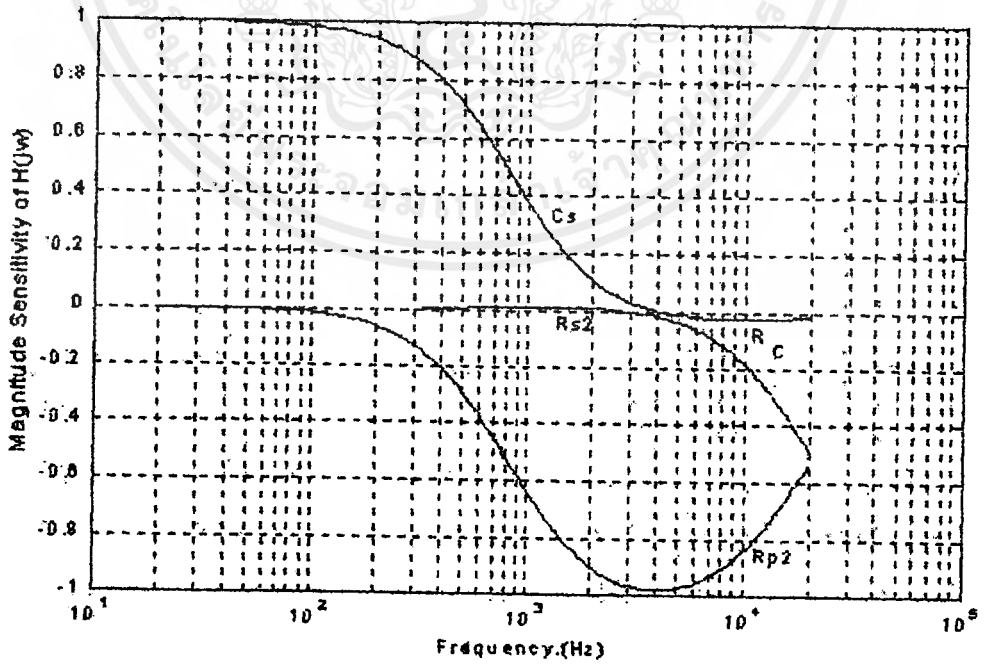
1. ค่าความไวทางขนาด (Magnitude Sensitivity)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

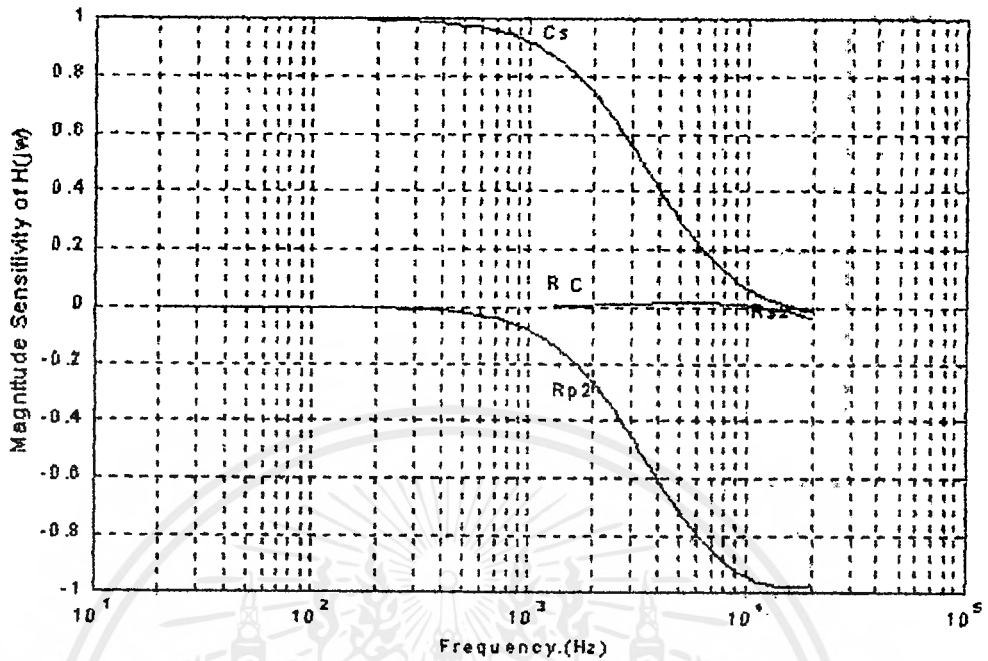


$$f_p = 1\text{KHz}$$

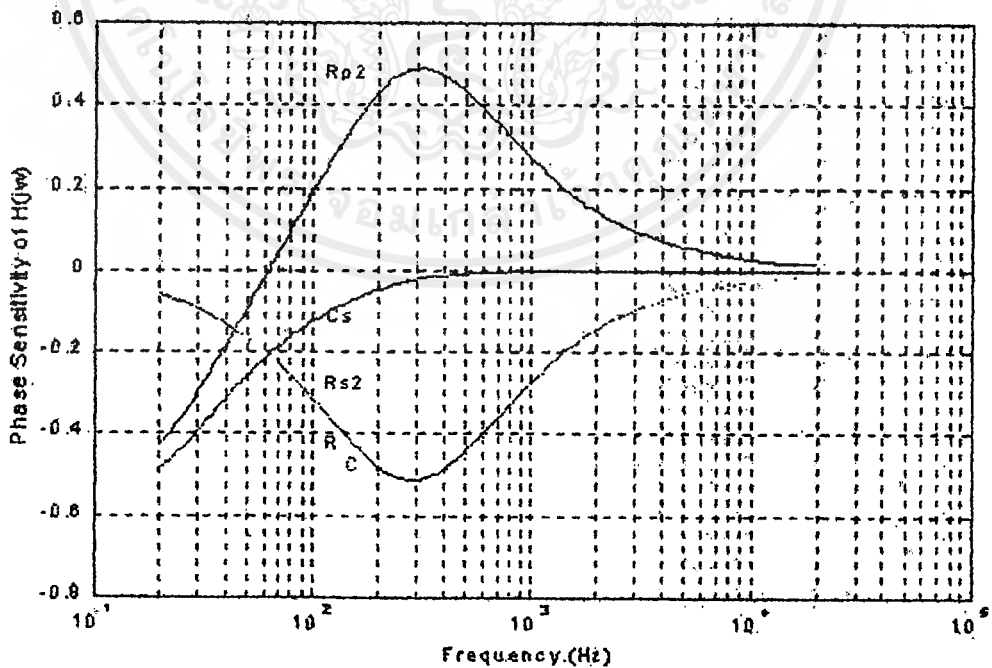


$$f_p = 4\text{KHz}$$

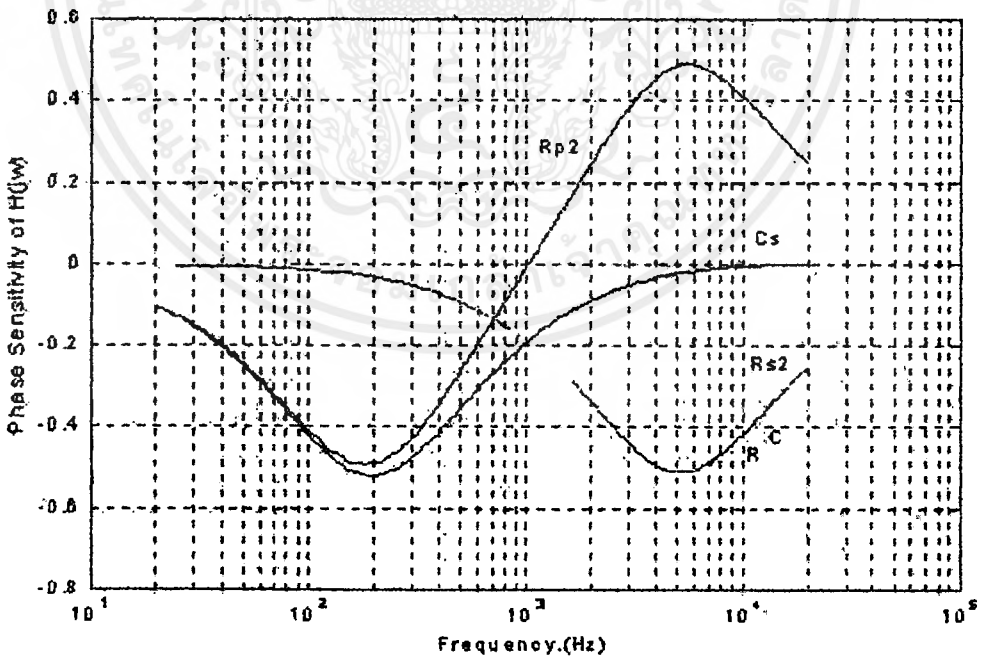
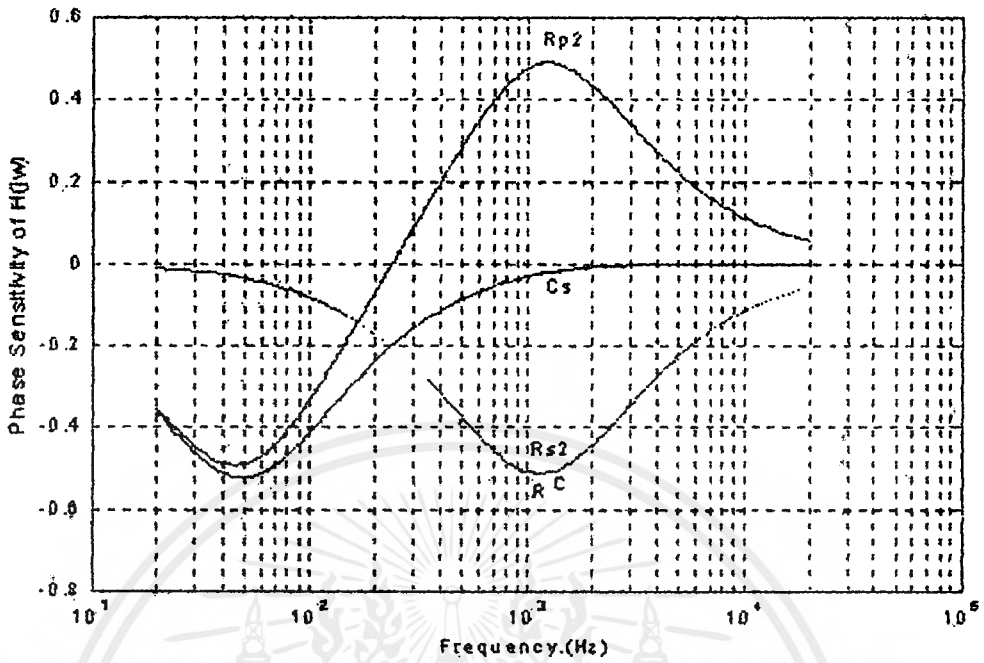
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



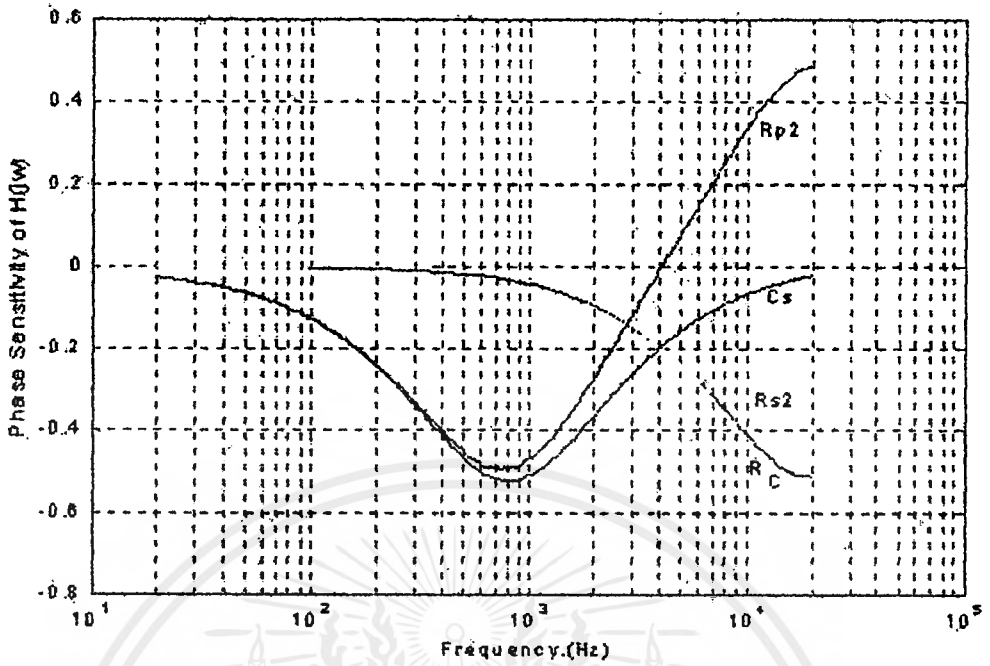
2. ค่าความไวทางเฟส (Phase Sensitivity)



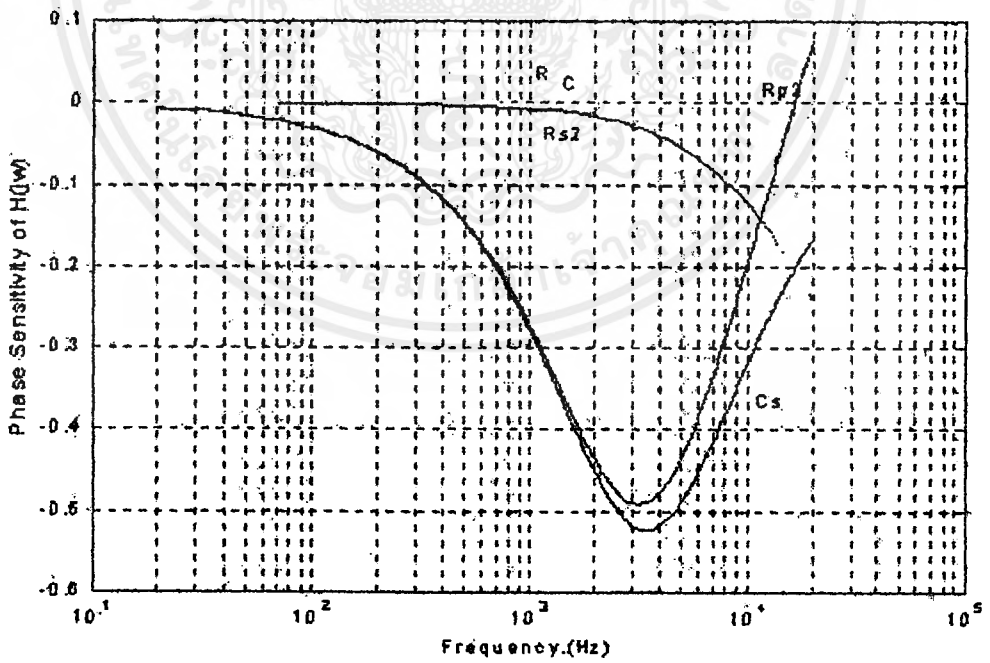
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$f_p = 4\text{KHz}$$



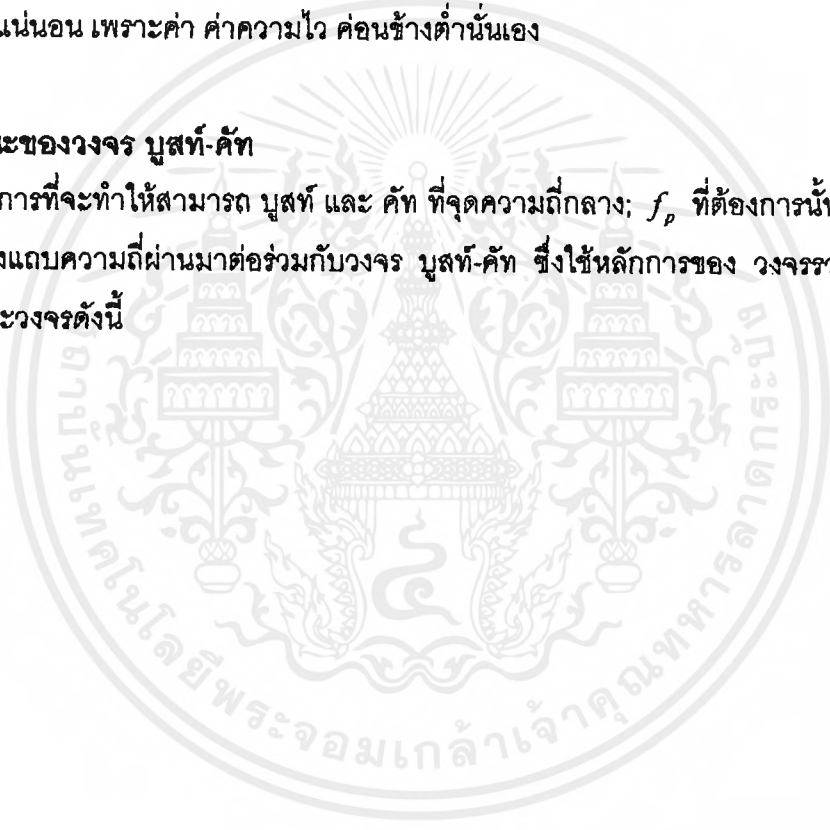
$$f_p = 16\text{KHz}$$

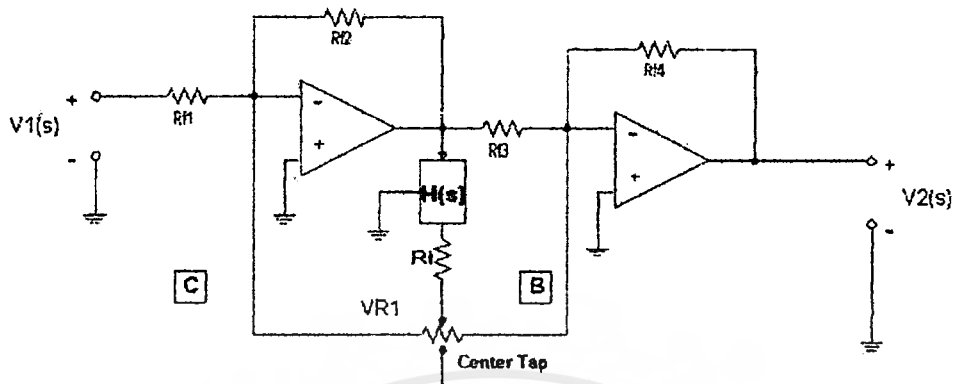
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟของค่าความไวทั้งหมด จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า ค่าความไวของอุปกรณ์แต่ละตัวที่มีผลกระทบต่อก แอมพลิจูด และเฟส ของวงจรมัน จะมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1 และไม่ว่าเราจะเริ่มต้นออกแบบด้วยค่า R_{p1} และ R_{p2} ด้วยค่าเท่าใด เมื่อคำนวณได้ค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจรแล้ว นำค่าอุปกรณ์ที่ได้มาแทนลงในสมการ $S_x^{H(j\omega)}$ และ $S_x^{*(j\omega)}$ เราจะได้กราฟของ ค่าความไว ที่ใกล้เคียงกับรูปเดิมมาก และมีค่าไม่เกิน 1 ซึ่งค่าที่ได้นี้เราสามารถยอมรับได้ เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์ต่างๆมีคุณภาพสูงกว่าเมื่อก่อนมาก ค่าผิดพลาดของอุปกรณ์จึงน้อยมากด้วยเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ในสมัยก่อน อีกทั้งยังมีราคาถูกลงด้วย ดังนั้นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านนี้ จึงสามารถทำงานได้อย่างคงเส้นคงวาแน่นอน เพราะค่า ค่าความไว ค่อนข้างต่ำนั่นเอง

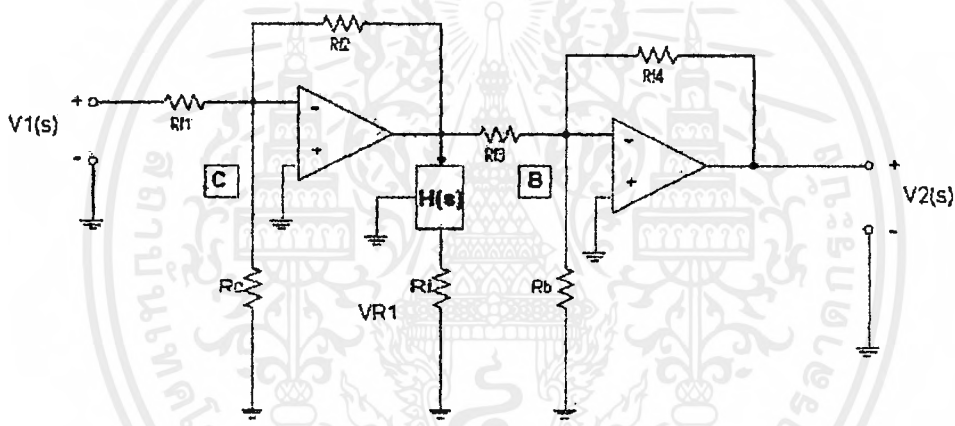
3.5 ลักษณะของวงจร บูลท์-คัท

การที่จะทำให้สามารถ บูลท์ และ คัท ที่จุดความถี่กลาง; f_p ที่ต้องการนั้น เราจะต้องนำวงจรกรองแถบความถี่ผ่านมาต่อร่วมกับวงจร บูลท์-คัท ซึ่งใช้หลักการของ วงจรรวมสัญญาณ โดยมีลักษณะวงจรดังนี้





(a)



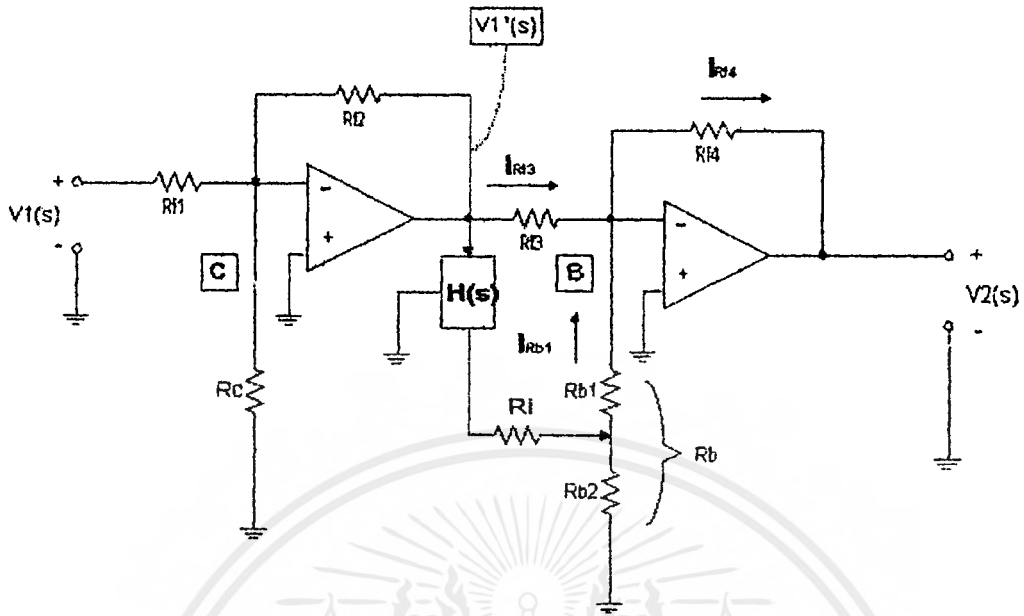
(b)

รูปที่3-6 วงจร บุสท์-คัท เมื่อต่อร่วมกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน
สังเกตวงจรใช้ VR แบบ มีแท็ปกลาง (รูปที่3-6a) และวงจรสมมูลย์
เมื่อไม่มีการ บุสท์ หรือคัท ใดๆ (รูปที่3-6b)

ซึ่งจากรูปเราจะพิจารณาวงจรใน 2 กรณีดังต่อไปนี้

1.เมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง B

เมื่อเราเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง B จะได้รูปวงจรสมมูลย์ดังนี้



รูปที่3-7 วงจรสมมูลเมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง B

จากรูปที่3-7 เราจะได้สมการ $V_2(s)$ คือ

$$\begin{aligned} V_2(s) &= -i_{R_{f4}} \cdot R_{f4} \\ &= -(i_{R_{f3}} + i_{R_{b1}}) \cdot R_{f4} \\ &= -\left(\frac{V_1'(s)}{R_{f3}} + \frac{V_1'(s)}{R_{b1}} \cdot \frac{(R_{b1} // R_{b2}) \cdot H(s)}{[R_l + (R_{b1} // R_{b2})]} \right) \cdot R_{f4} \\ \frac{V_2(s)}{-V_1'(s)} &= \left(\frac{R_{f4}}{R_{f3}} + \frac{R_{f4}}{R_{b1}} \cdot \frac{R_{b1} // R_{b2}}{[R_l + (R_{b1} // R_{b2})]} \cdot H(s) \right) \end{aligned}$$

เมื่อ $R_{f1} = R_{f2}, R_{f3} = R_{f4}$ และ $V_1'(s) = -V_1(s)$ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= \left(1 + \frac{R_{f4}}{R_{b1}} \cdot \frac{R_{b1} // R_{b2}}{[R_l + (R_{b1} // R_{b2})]} \cdot H(s) \right) \\ \therefore \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= \left(1 + \frac{R_{f4} \cdot R_{b2}}{[R_l(R_{b1} + R_{b2}) + R_{b1}R_{b2}]} \cdot H(s) \right) \quad \dots\dots\dots(3.16) \end{aligned}$$

จากสมการที่(3.16)ถ้าเราปรับ VR1ไปที่ตำแหน่ง B เต็มที่ นั่นคือ $R_{b1} = 0\Omega$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่(3.16) เราจะได้

$$\left. \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \right|_{R_{f4}=0} = 1 + H(s) \cdot \frac{R_{f4}}{R_f} \dots\dots\dots(3.17)$$

เมื่อ $H(s) = \frac{s\omega_b}{s^2 + s\omega_b + \omega_p^2}$;

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= 1 + \frac{R_{f4}}{R_f} \cdot \frac{s\omega_b}{s^2 + s\omega_b + \omega_p^2} \\ \therefore \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} &= 1 + \frac{R_{f4}}{R_f} \cdot \frac{j\omega\omega_b}{[(\omega_p^2 - \omega^2) + j\omega\omega_b]} \dots\dots\dots(3.18) \end{aligned}$$

จากสมการที่(3.18) ถ้า $\omega = \omega_p$ ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่เราออกแบบไว้ จะ

ได้

$$\left. \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \right|_{\omega=\omega_p} = 1 + \frac{R_{f4}}{R_f} \dots\dots\dots(3.19)$$

สมการที่(3.19) จะเป็นอัตราขยายที่สูงสุดของการมูสท์ ซึ่งเราต้องการอัตราขยาย

สูงสุดที่ +12dB ดังนั้นเราจะคำนวณหา $\frac{R_{f4}}{R_f}$ ได้โดย

$$12dB = 20 \log\left(1 + \frac{R_{f4}}{R_f}\right)$$

$$\therefore \frac{R_{f4}}{R_f} = 10^{(12/20)} \cong 3$$

ดังนั้น เราเลือกค่า R_{f4} ให้ที่ค่ามากกว่า R_f ประมาณ 3เท่า จึงจะทำให้อัตราขยายของการมูสท์สูงสุดที่ +12dB

จากสมการที่(3.18) ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} = 1 + \frac{R_{f4}}{R_i} \cdot \frac{j\omega\omega_b}{[(\omega_p^2 - \omega^2) + j\omega\omega_b]}$$

$$\frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{(\omega_p^2 - \omega^2)R_i + j\omega\omega_b(R_{f4} + R_i)}{[(\omega_p^2 - \omega^2)R_i + j\omega\omega_b R_i]} \dots\dots\dots(3.20)$$

จากสมการที่(3.20) เราจะได้สมการของ แอมพลิจูด และเฟส เมื่อ บูลท์ สูงสุดคือ

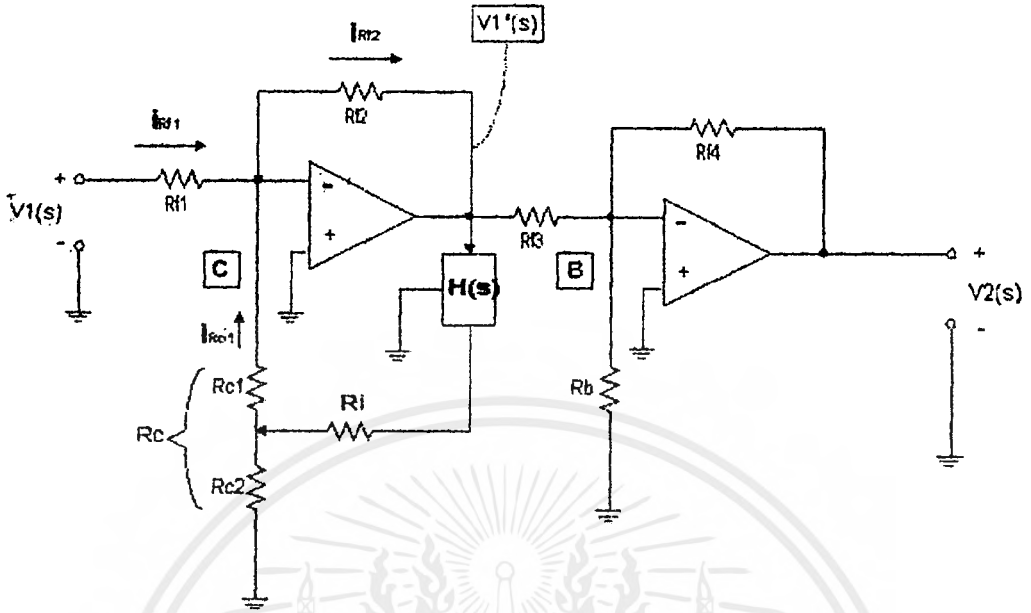
$$\left| \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{[(\omega_p^2 - \omega^2)R_i]^2 + (\omega\omega_b)^2(R_{f4} + R_i)^2} + [\omega\omega_b R_{f4} R_i (\omega_p^2 - \omega^2)]}{[(\omega_p^2 - \omega^2)R_i]^2 + [\omega\omega_b R_i]^2} \dots\dots\dots(3.21)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\omega\omega_b(R_{f4} + R_i)}{(\omega_p^2 - \omega^2)R_i} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{\omega\omega_b}{\omega_p^2 - \omega^2} \right] \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{RR_{s2}CC_s}} ; \omega_b = \frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}$$

2. เมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง C

เมื่อเราเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง C จะได้รูปวงจรสมมูลย์ ดังนี้



รูปที่ 3-8 วงจรตมมุลย์เมื่อเลื่อน VR1 มาที่ตำแหน่ง C

จากรูปที่ 3.8 เราจะได้

$$\begin{aligned} V_1'(s) &= -i_{R_{f2}} \cdot R_{f2} \\ &= -(i_{R_{f1}} + i_{R_{c1}}) \cdot R_{f2} \\ &= -\left(\frac{V_1(s)}{R_{f1}} + \frac{V_1'(s)}{R_{c1}} \cdot \frac{(R_{c1} // R_{c2}) \cdot H(s)}{[R_f + (R_{c1} // R_{c2})]} \right) \cdot R_{f2} \end{aligned}$$

$$V_1'(s) \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{c1}} \cdot \frac{R_{c1} // R_{c2}}{[R_f + (R_{c1} // R_{c2})]} \cdot H(s) \right) = -\frac{V_1(s) \cdot R_{f2}}{R_{f1}}$$

เมื่อ $R_{f1} = R_{f2}$, $R_{f3} = R_{f4}$ และ $-V_1'(s) = V_2(s)$ เราจะได้

$$-V_2(s) \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_{c1}} \cdot \frac{R_{c1} // R_{c2}}{[R_f + (R_{c1} // R_{c2})]} \cdot H(s) \right) = -V_1(s)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_{c1}} \cdot \frac{(R_{c1} // R_{c2}) \cdot H(s)}{R_f + (R_{c1} // R_{c2})}} \\ \therefore \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{(R_{f2}R_{c2}) \cdot H(s)}{R_f(R_{c1} + R_{c2}) + R_{c1}R_{c2}}} \end{aligned} \dots\dots\dots(3.23)$$

จากสมการที่(3.23) ถ้าเราปรับ VR1 ไปที่ตำแหน่ง C เต็มที่ นั่นคือ $R_{c1} = 0\Omega$ ดังนั้นสมการที่(3.23) จะได้

$$\left. \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \right|_{R_{c1}=0} = \frac{1}{1 + \frac{R_{f2} \cdot H(s)}{R_f}} \dots\dots\dots(3.24)$$

แทนค่า $H(s) = \frac{s\omega_b}{s^2 + s\omega_b + \omega_p^2}$ ในสมการที่(3.24) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_2(s)}{V_1(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_f} \cdot \frac{s\omega_b}{s^2 + s\omega_b + \omega_p^2}} \\ \therefore \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} &= \frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_f} \cdot \frac{j\omega\omega_b}{(\omega_p^2 - \omega^2) + j\omega\omega_b}} \end{aligned} \dots\dots\dots(3.25)$$

จากสมการที่ (3.25) ถ้า $\omega = \omega_p$ เราจะได้:

$$\left. \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \right|_{\omega=\omega_p} = \frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_f}} \dots\dots\dots(3.26)$$

สมการที่(3.26) จะเป็นอัตราขยายสูงสุดของการ คัท ซึ่งเราต้องการอัตราการ คัท สูงสุดที่ -12dB เราจึงต้องคำนวณหาค่า $\frac{R_{f2}}{R_1}$ ได้โดย

$$-12dB = 20 \log \left[\frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_1}} \right]$$

$$-12dB = -20 \log \left(1 + \frac{R_{f2}}{R_1} \right)$$

$$\therefore \frac{R_{f2}}{R_1} \cong 3$$

ดังนั้น เราจึงเลือกค่า R_{f2} มากกว่า R_1 ประมาณ 3เท่า เช่นกัน จึงจะทำให้การ คัท สูงสุดที่ -12dB

จากสมการที่(3.25) ;

$$\frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{R_{f2}}{R_1} \cdot \frac{j\omega\omega_b}{(\omega_p^2 - \omega^2) + j\omega\omega_b}}$$

$$\frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{1}{\frac{(\omega_p^2 - \omega^2)R_1 + j\omega\omega_b(R_{f2} + R_1)}{(\omega_p^2 - \omega^2)R_1 + j\omega\omega_b R_1}} \dots\dots\dots(3.27)$$

จากสมการที่(3.27) จะได้สมการของ แอมพลิจูด และ เฟส เมื่อ คัท สูงสุด คือ

$$\left| \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \right| = \frac{[(\omega_p^2 - \omega^2)R_1]^2 + (\omega\omega_b R_1)^2}{\sqrt{\{[(\omega_p^2 - \omega^2)R_1]^2 + (\omega\omega_b)^2(R_{f2} + R_1)R_1\}^2 + [\omega\omega_b R_{f2} R_1(\omega_p^2 - \omega^2)]^2}}$$

\dots\dots\dots(3.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi(j\omega) = \tan^{-1}\left[\frac{\omega\omega_b}{\omega_p^2 - \omega^2}\right] - \tan^{-1}\left[\frac{\omega\omega_b(R_{f2} + R_f)}{(\omega_p^2 - \omega^2)R_f}\right] \dots\dots\dots(3.29)$$

เมื่อ $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{RR_{s2}CC_s}}$; $\omega_b = \frac{R_{p2} + R_{s2}}{RR_{s2}C}$

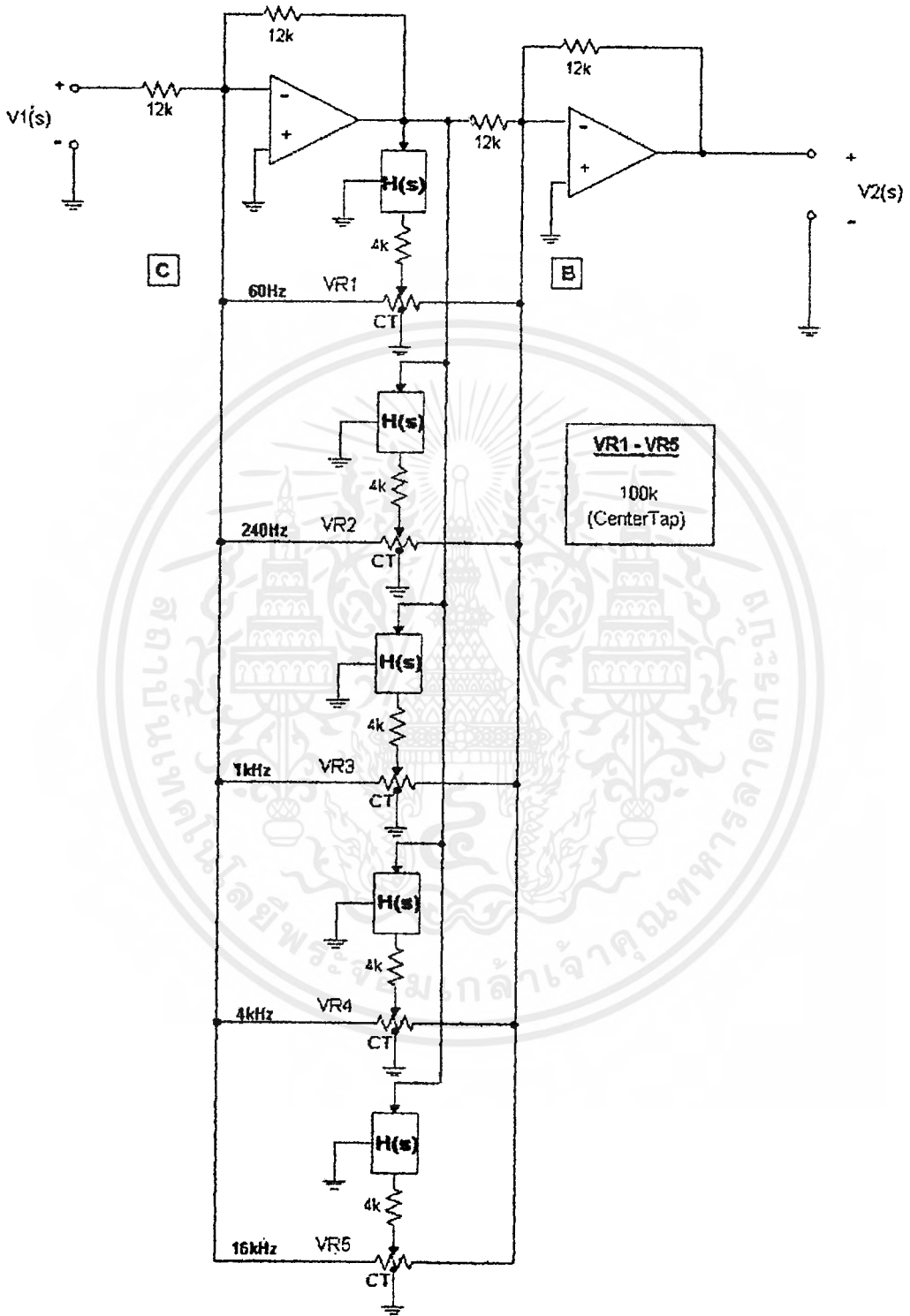
จากสมการที่ผ่านมาทั้งหมดทำให้เราทราบว่าต้องกำหนดเงื่อนไขของวงจร บูลท์-คัท ดังต่อไปนี้ จึงจะทำให้สามารถ บูลท์-คัท ได้ $\pm 12dB$

เงื่อนไข

1. ใช้ค่า $R_{f1} = R_{f2} = R_{f3} = R_{f4}$
2. R_{f1}, R_{f2}, R_{f3} และ R_{f4} จะต้องมีค่ามากกว่า R_f อยู่ประมาณ 3 เท่า
3. VR1 ใช้ค่าเท่าใดก็ได้ แต่ต้องเป็นแบบมีแท่งกลาง เท่านั้น
4. ถ้าต้องการอัตราการ บูลท์ หรือ คัท แตกต่างจากนี้ ก็ให้คำนวณอัตราส่วน $\left(1 + \frac{R_{f4}}{R_f}\right)$ กับ $\left(1 + \frac{R_{f2}}{R_f}\right)$ ใหม่ ให้ได้อัตราการ บูลท์-คัท ตามที่ต้องการ

ในที่นี้เราจะใช้ค่า $R_{f1} = R_{f2} = R_{f3} = R_{f4} = 12K\Omega$
 $R_f = 4K\Omega$, ใช้ VR1 แบบมีแท่งกลาง ค่า $100K\Omega$

และจะได้ลักษณะของวงจрдังรูปที่ 3-9 จากนั้นนำสมการ (3.21) , (3.22) , (3.28) , (3.29) มาทดลองพล็อตโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยนำค่าของอุปกรณ์ในตารางที่ 3.1 แทนในสมการดังกล่าว ซึ่งจะได้ผลดังนี้

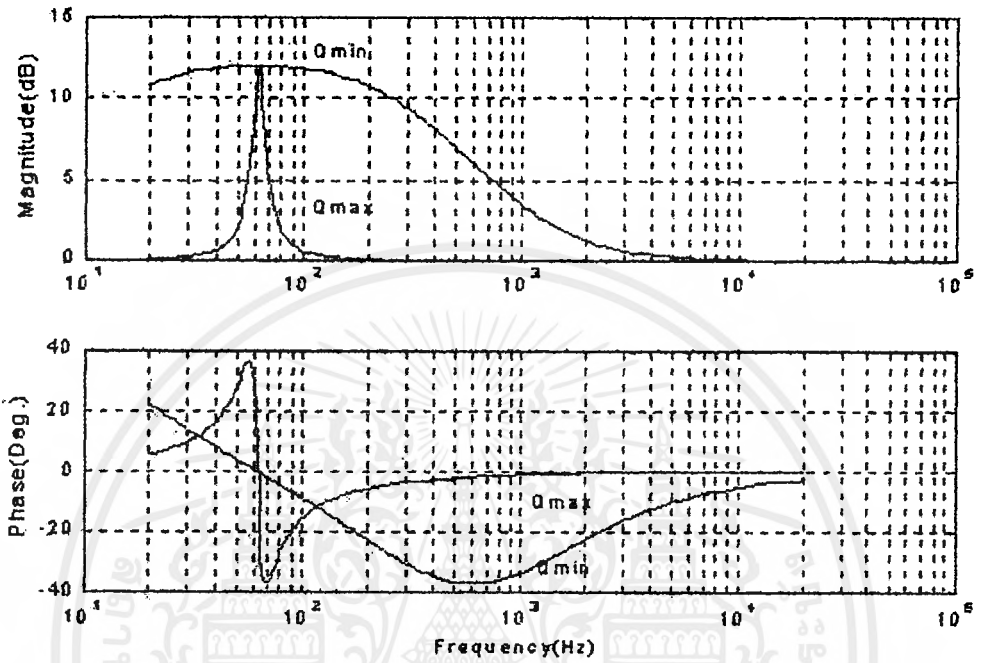


รูปที่ 3-9 ลักษณะวงจร มุสท์-คัท เมื่อต่อร่วมกับวงจรของแถบความถี่ผ่านทั้งหมด (VR1-VR5 = 100KΩ มีแท็ปกลาง)

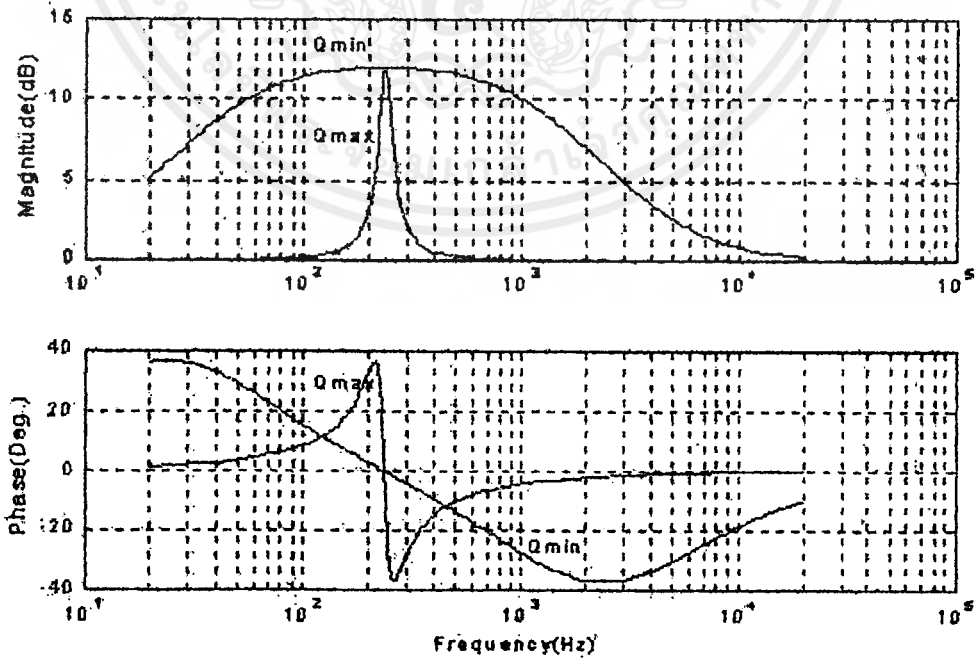
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB

1. ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสเมื่อบุสต์ที่สูงสุด

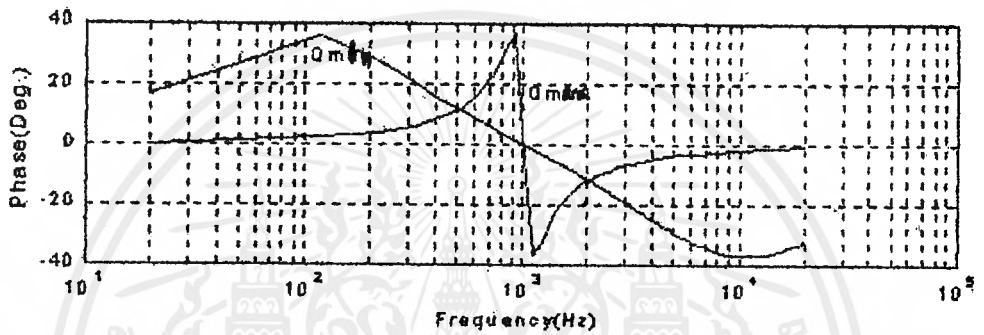
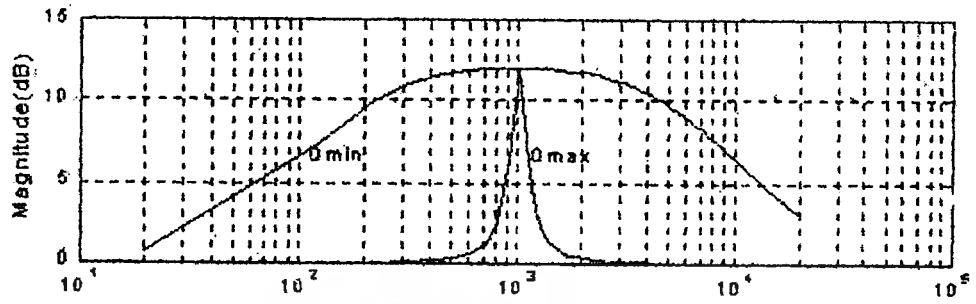


$$f_p = 60\text{Hz}$$

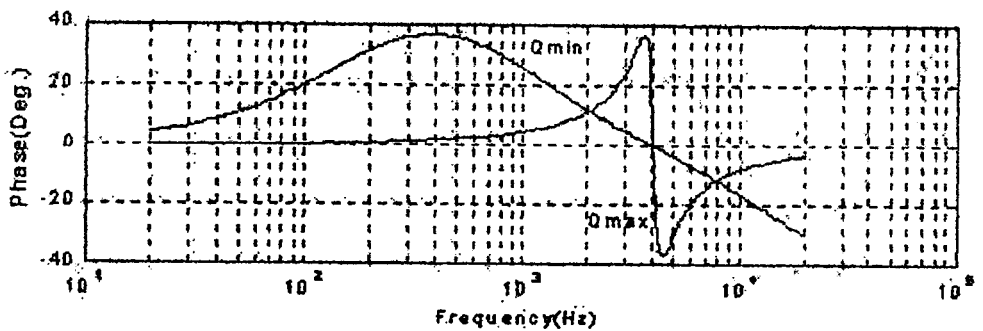
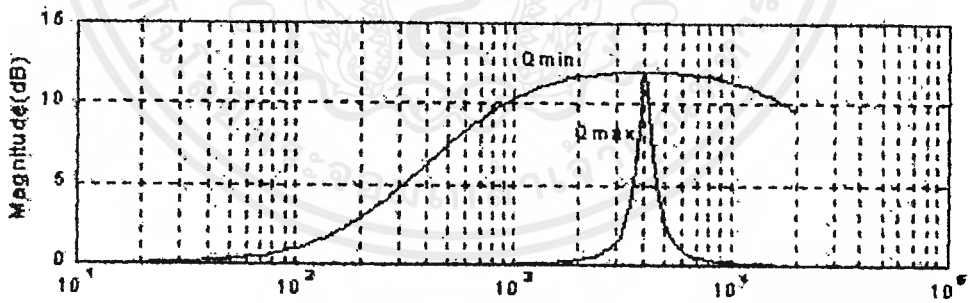


$$f_p = 240\text{Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

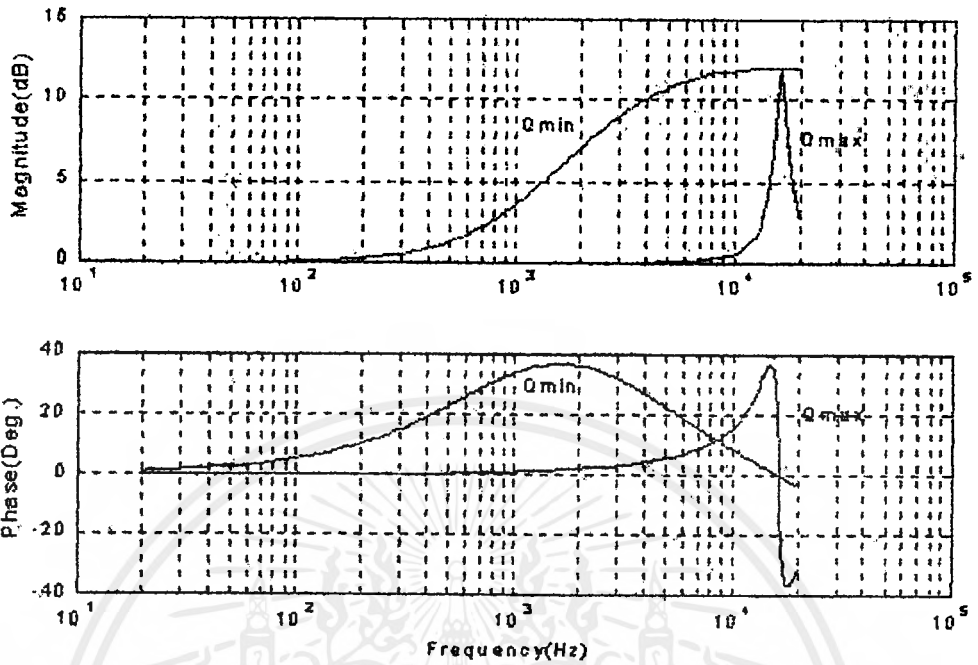


$$f_p = 1\text{KHz}$$

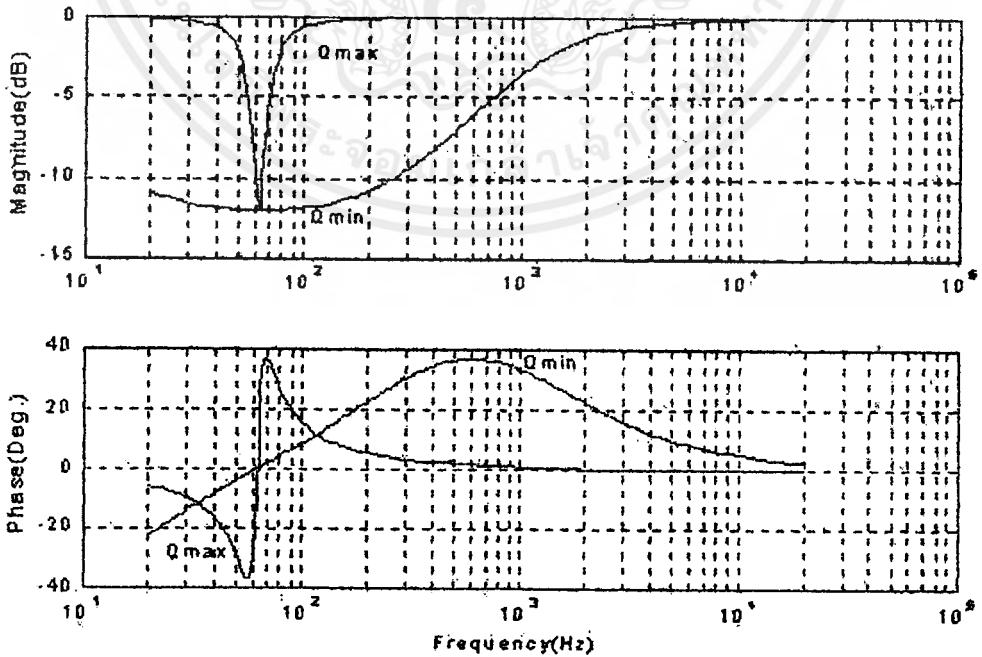


$$f_p = 4\text{KHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

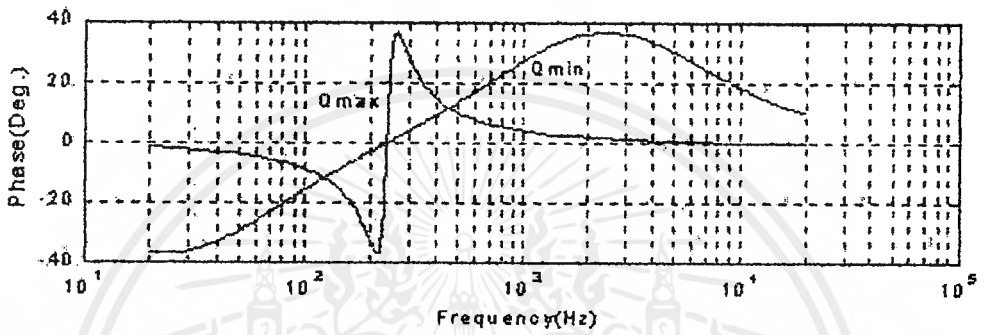
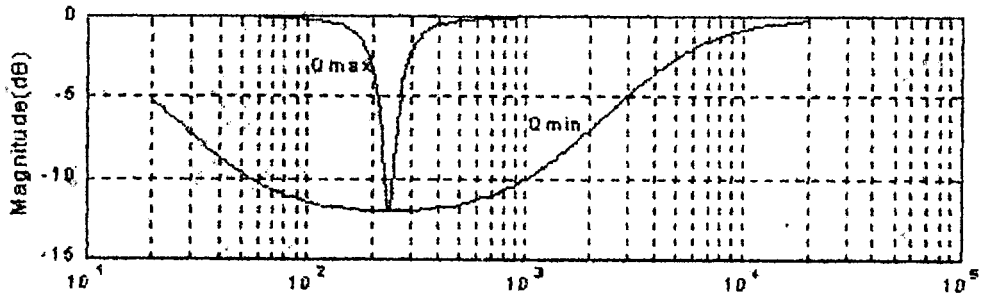


2. ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสเมื่อคัทสูงสุด

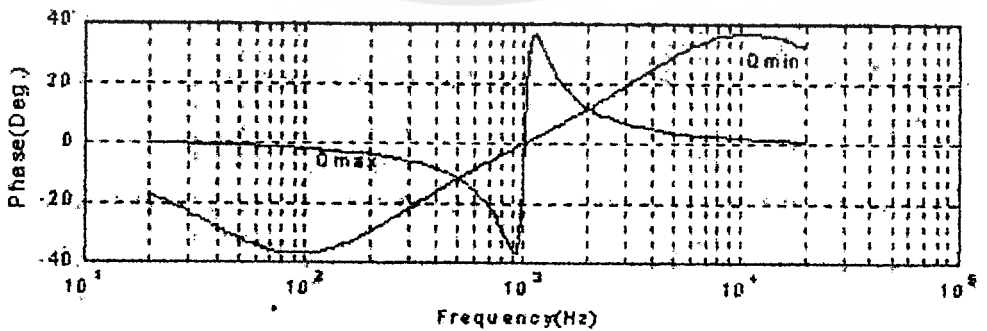
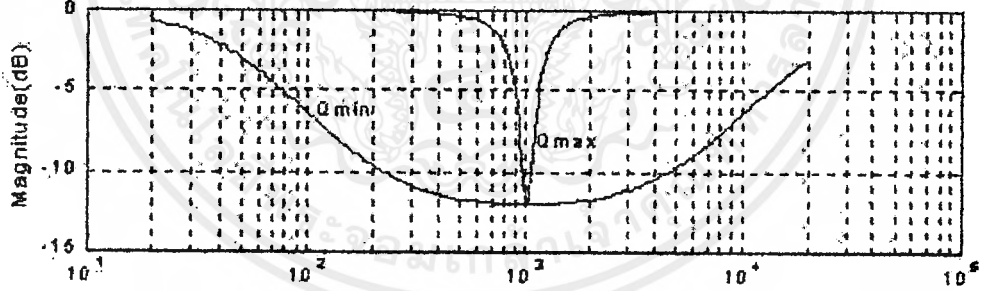


$f_p = 60\text{Hz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

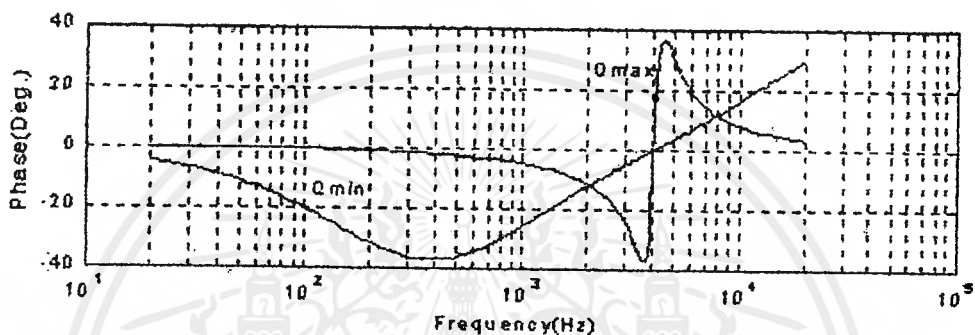
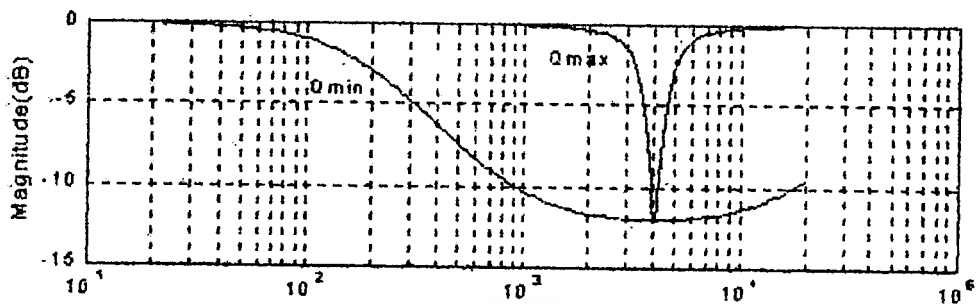


$$f_p = 240\text{Hz}$$

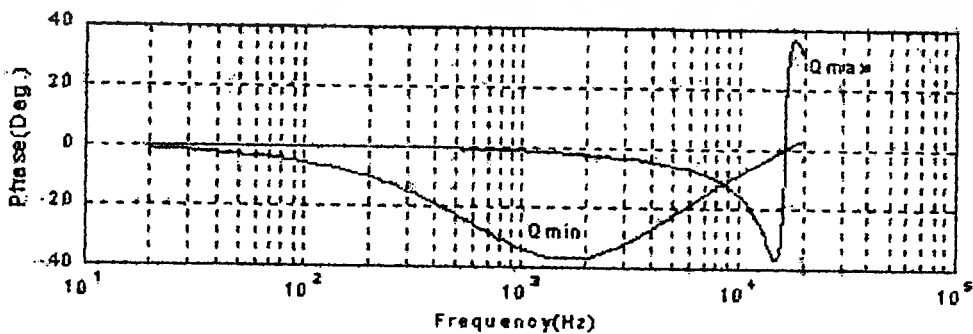
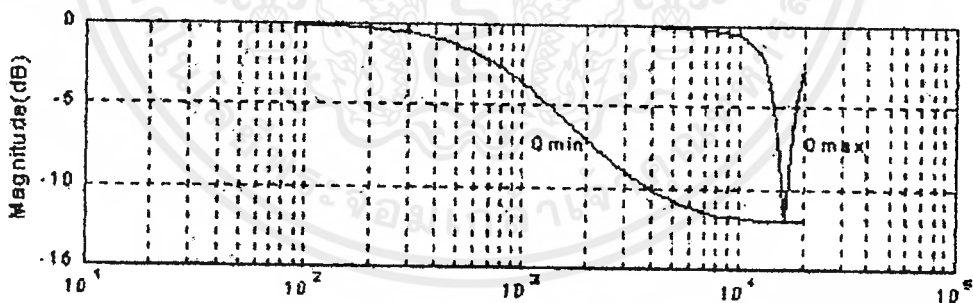


$$f_p = 1\text{KHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$f_p = 4\text{KHz}$$



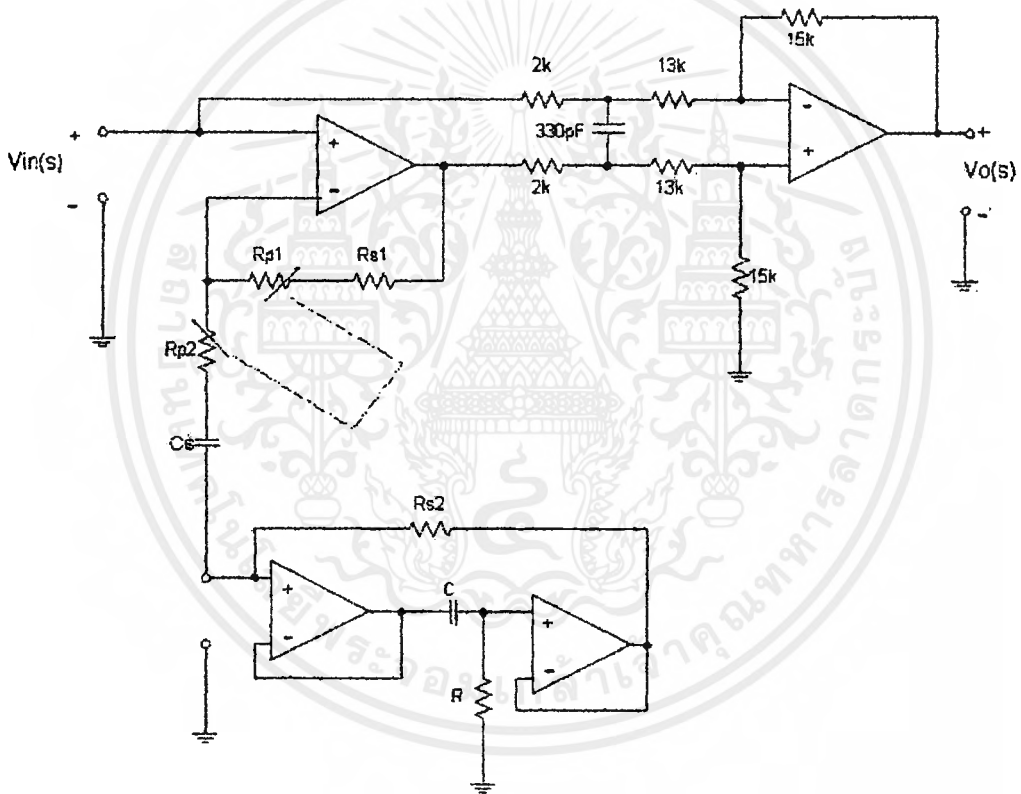
$$f_p = 16\text{KHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

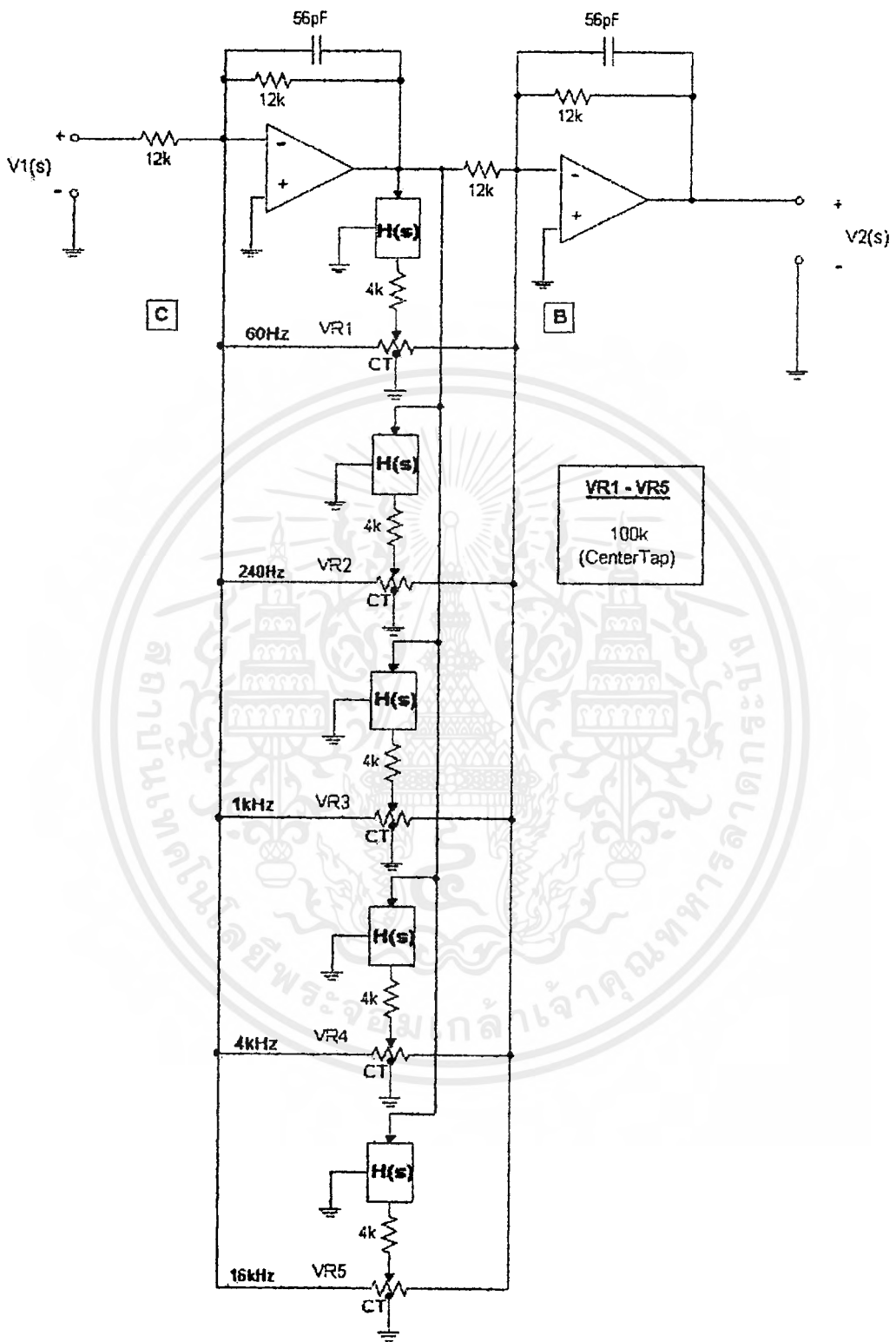
การทดลองและผลทดสอบ

เนื่องจากโครงงานนี้ใช้ IC Op-Amp ที่มีแบนด์วิธกว้างมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อมิให้วงจรของเราทำงานที่ความถี่สูงๆโดยไม่จำเป็น จึงควรใช้ตัวเก็บประจุ(Capacitor) คำน้อยๆ (ประมาณ 56 pF) ต่อคร่อมที่ตัวต้านทาน(Resistor) R_{f2} และ R_{f4} (ในวงจร บูสท์-คัท) และใช้ค่า 330pF ในวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ดังรูป



รูปที่ 4-1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

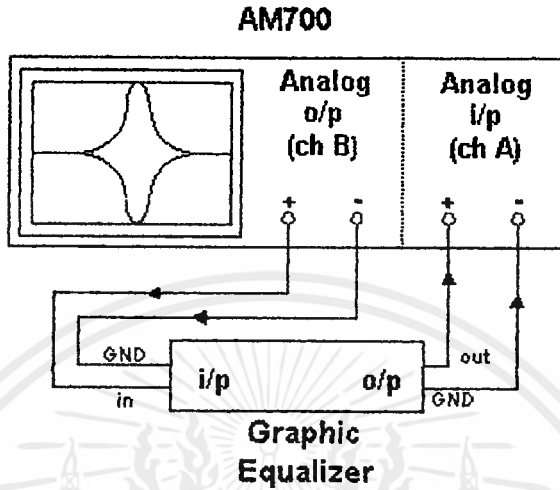


รูปที่ 4-2 วงจร มัลติ-คัท ที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

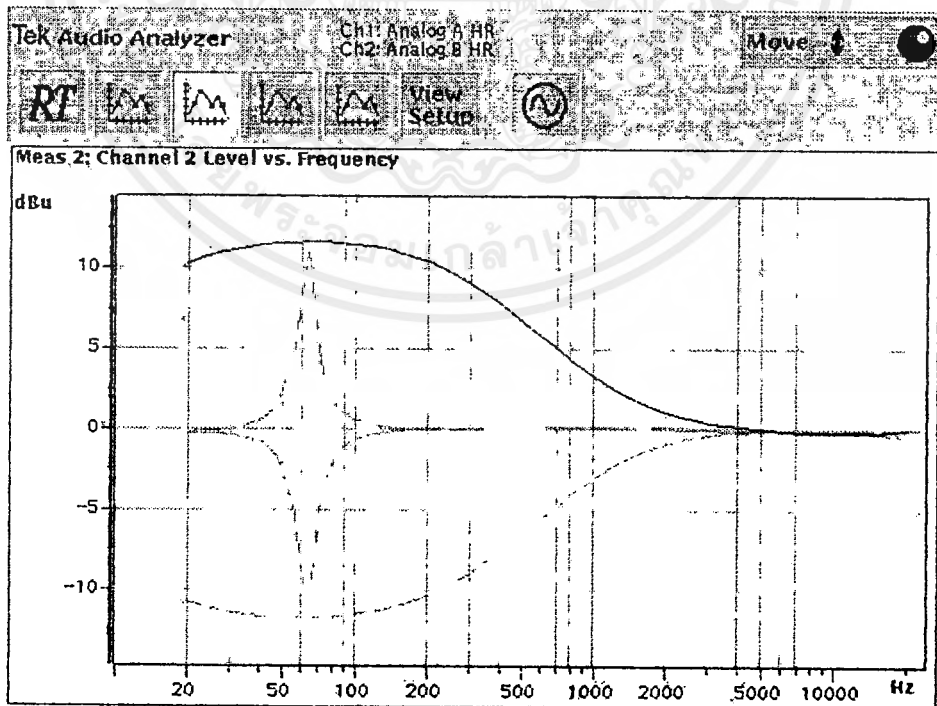
4.1 การทดลองเพื่อวัดผลตอบสนองทางขนาด

ในการทดลองนี้เราจะใช้วงจรทดสอบดัง บล็อกไดอะแกรม ดังนี้



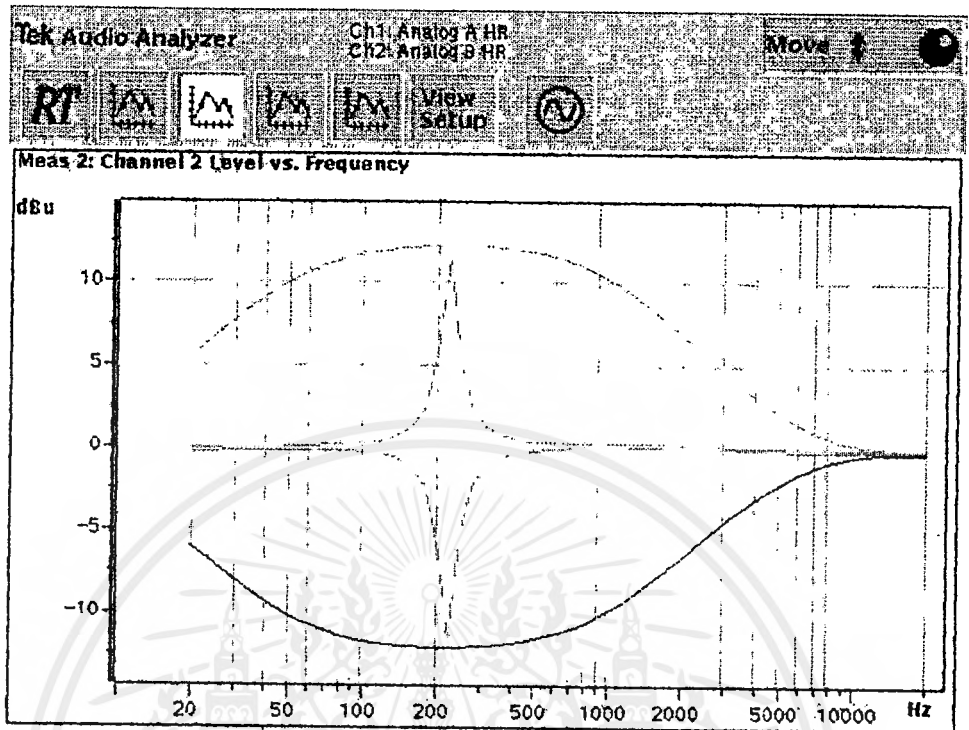
รูปที่ 4-3 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการทดลองผลตอบสนองทางขนาด

และจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

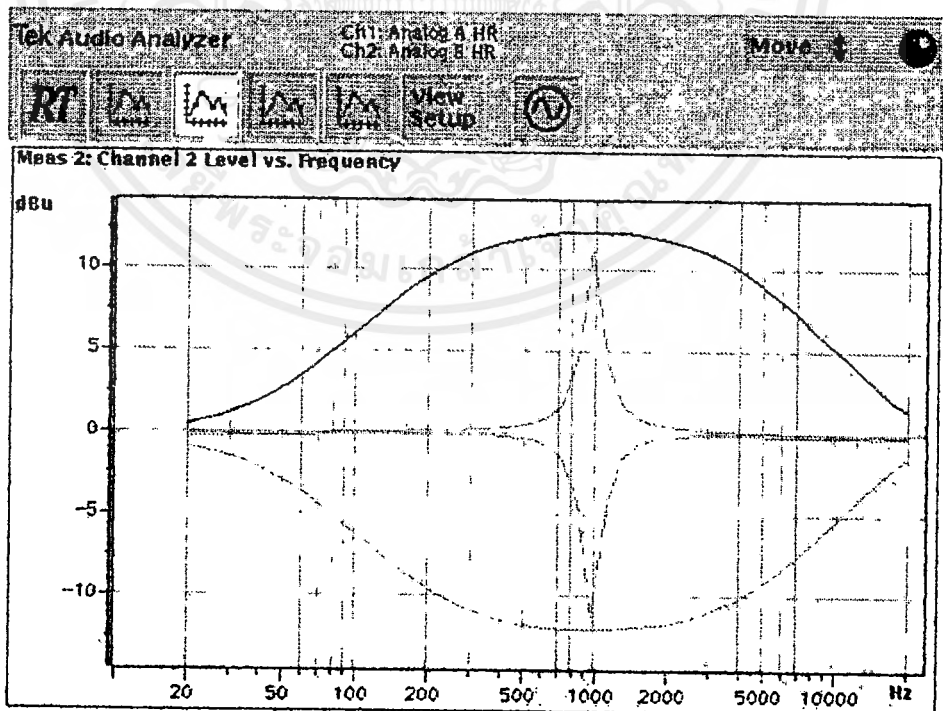


ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บุสท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 60\text{Hz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

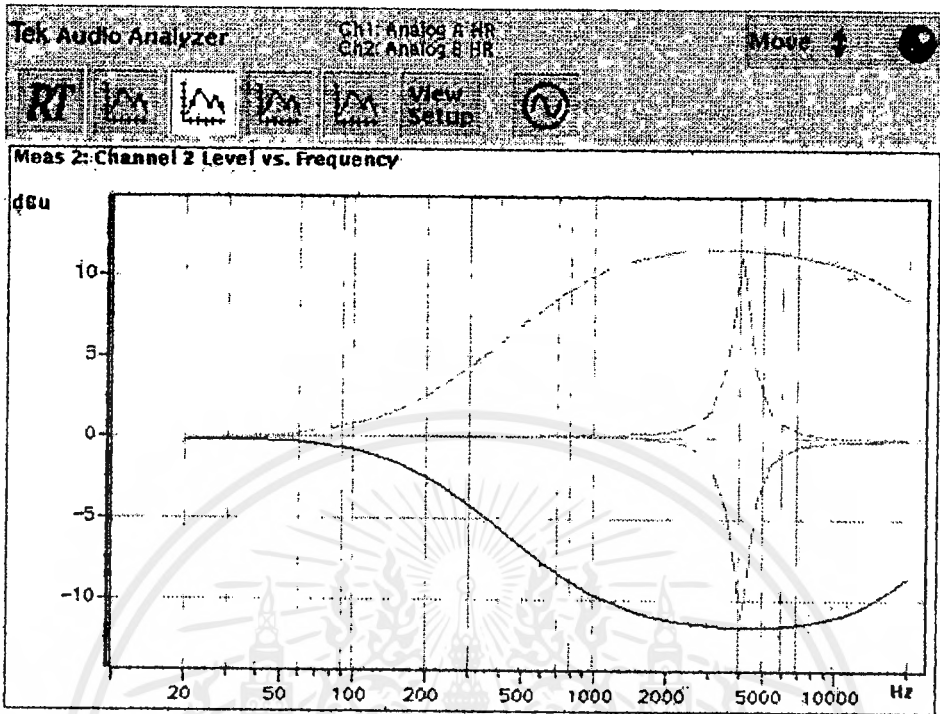


ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บุสท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 240\text{Hz}$)

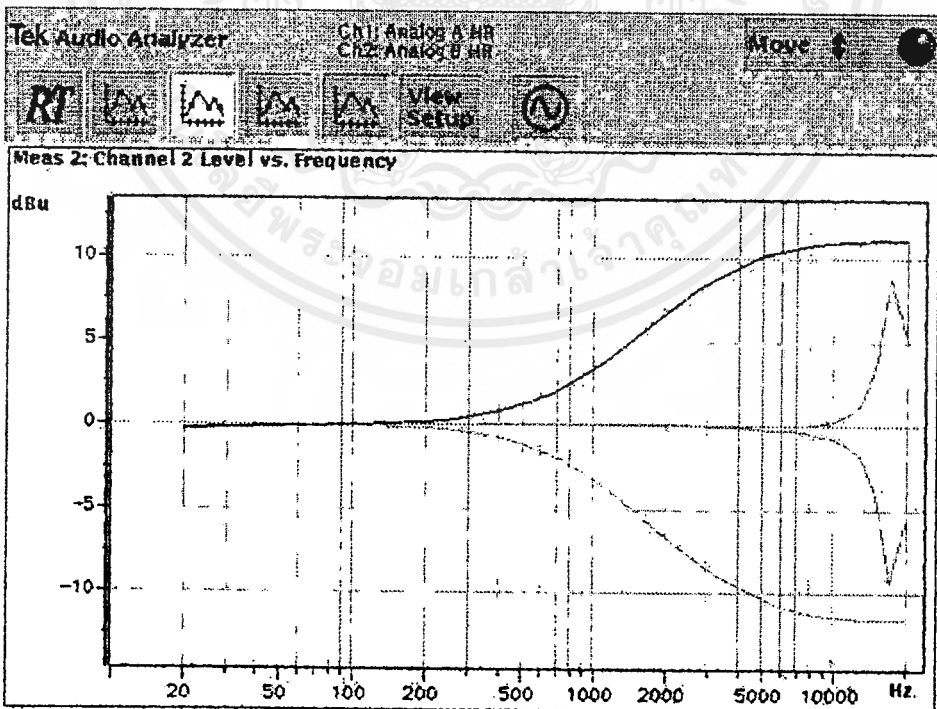


ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บุสท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 1\text{KHz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 4\text{KHz}$)



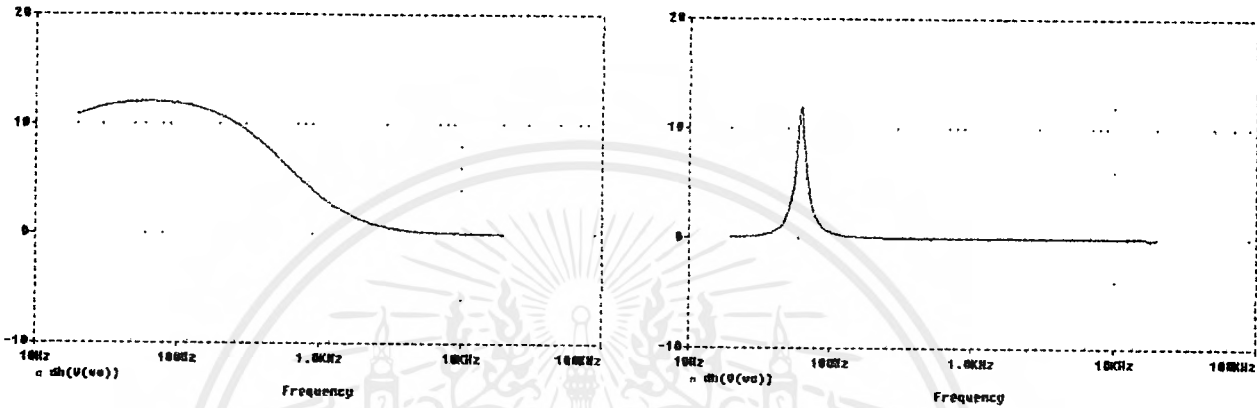
ผลตอบสนองทางขนาดเมื่อ บูลท์ และ คัท สูงสุด ($f_p = 16\text{KHz}$)

หมายเหตุ ทุกรูป พล็อตที่ความละเอียด 62 จุดในช่วงความถี่ 20Hz- 20kHz

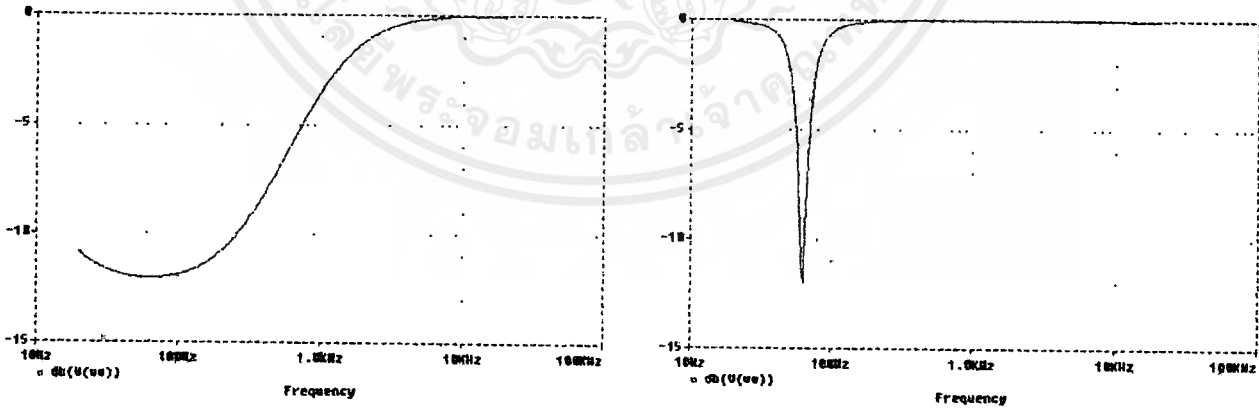
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSpice สำหรับผลตอบสนองทางขนาด

ที่ $f_p = 60\text{Hz}$;

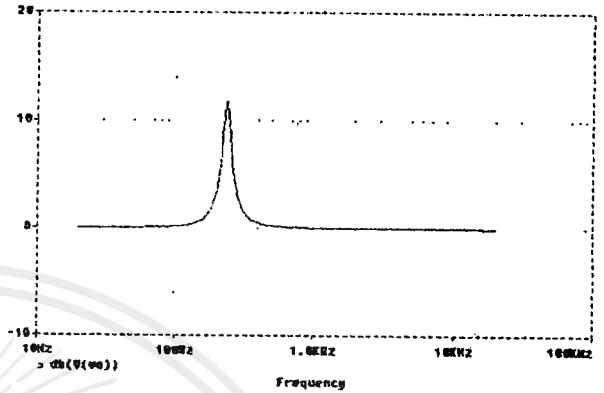
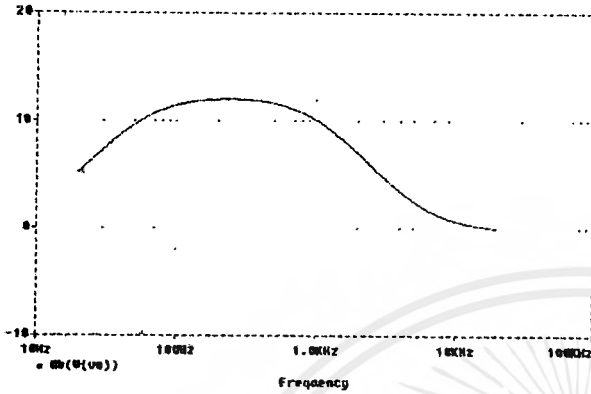


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บุสท์ สูงสุด

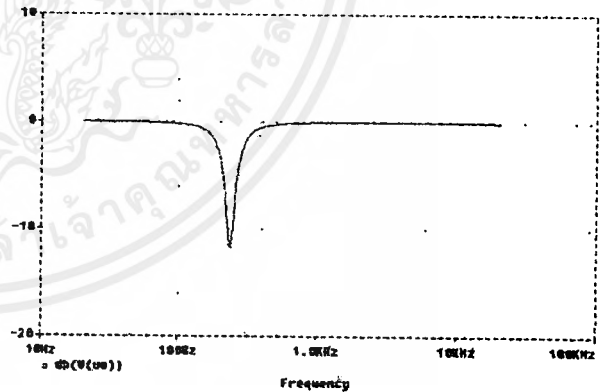
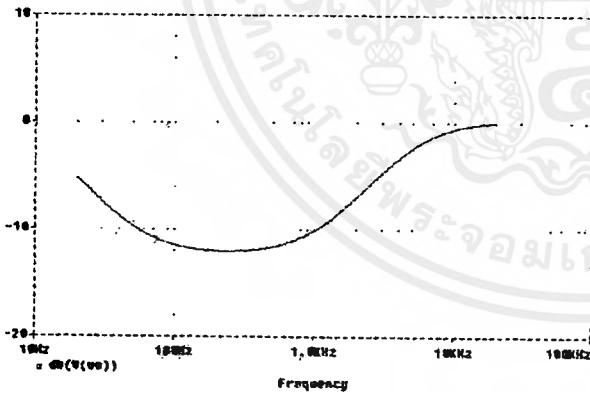


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 240\text{Hz}$;

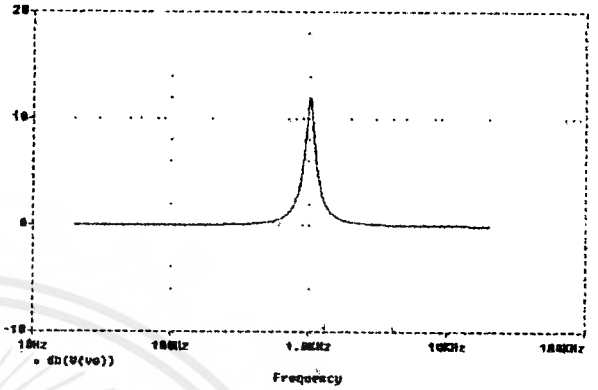
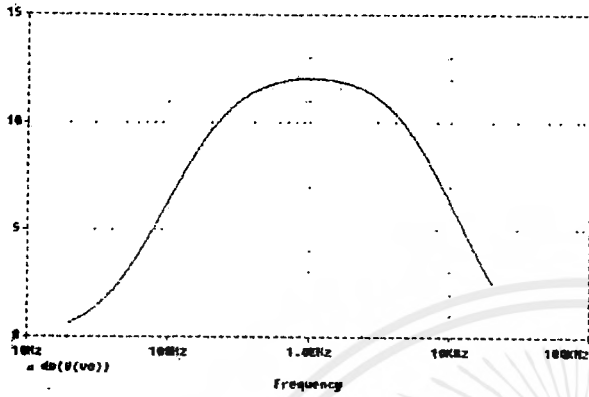


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

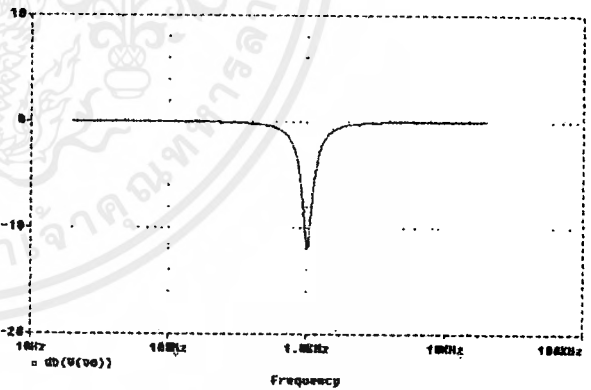
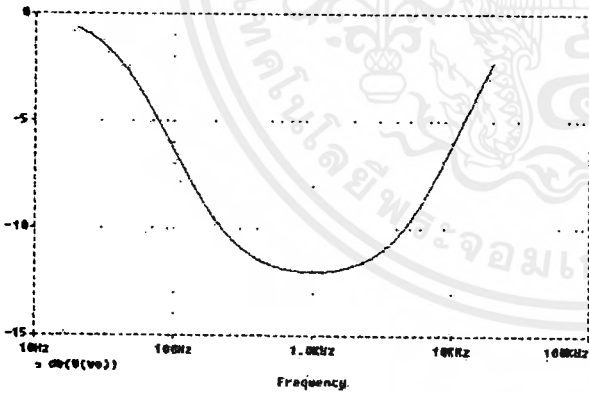


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 1\text{KHz}$:

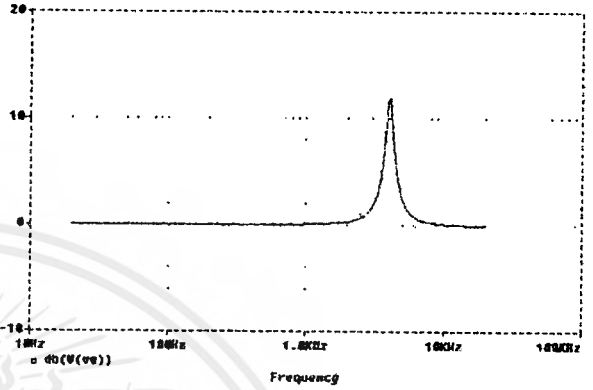
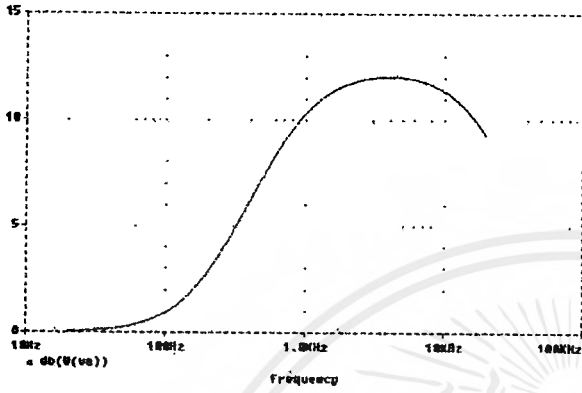


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บุสต์ สูงสุด

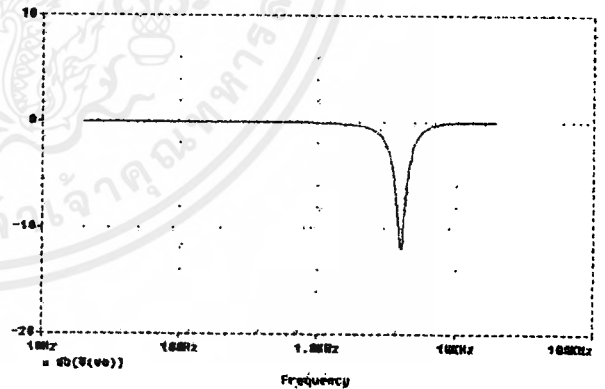
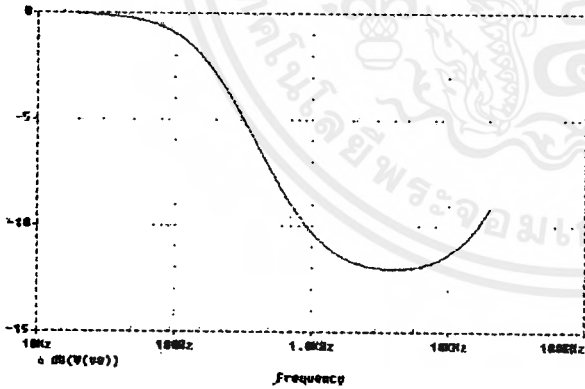


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 4\text{KHz}$;

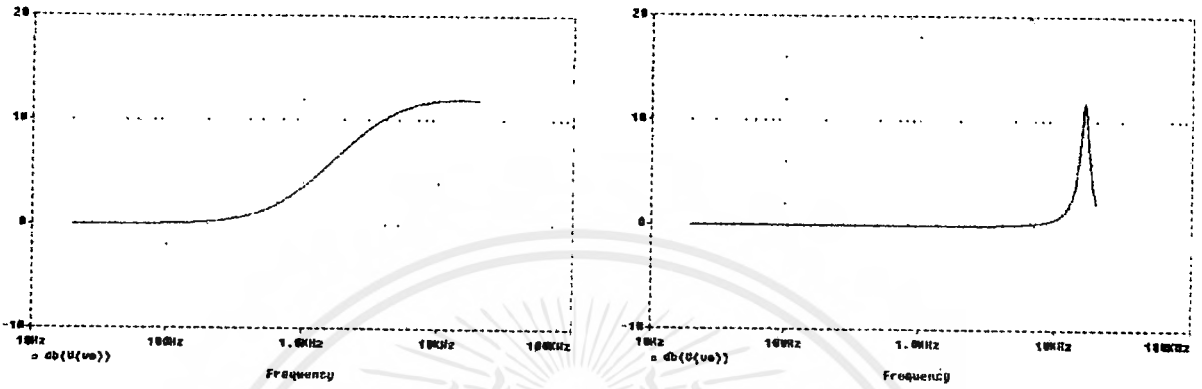


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บุทธ์ สูงสุด

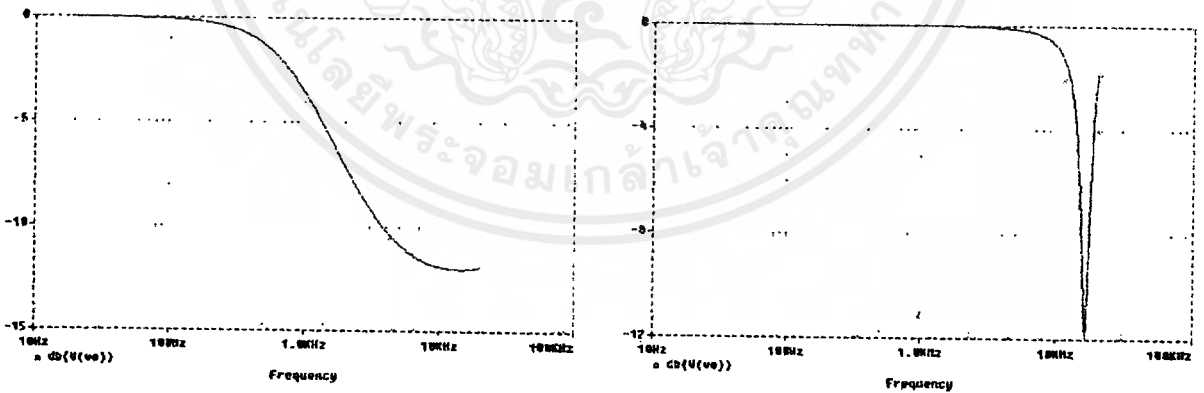


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 16\text{KHz}$;



แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

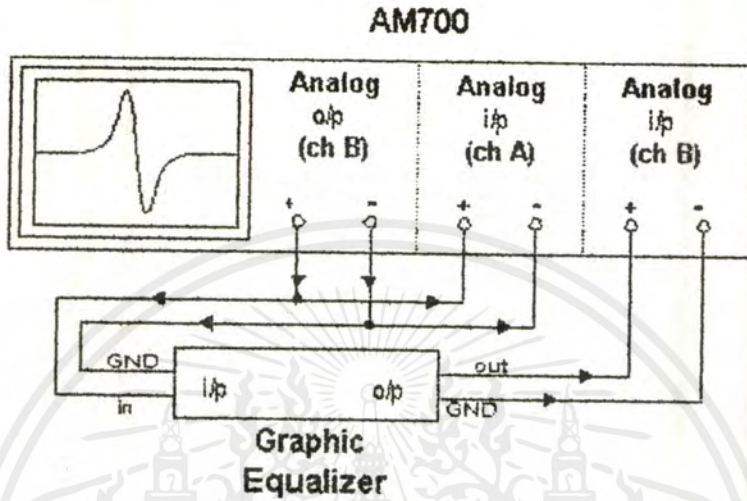


แสดงผลตอบสนองทางขนาด เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

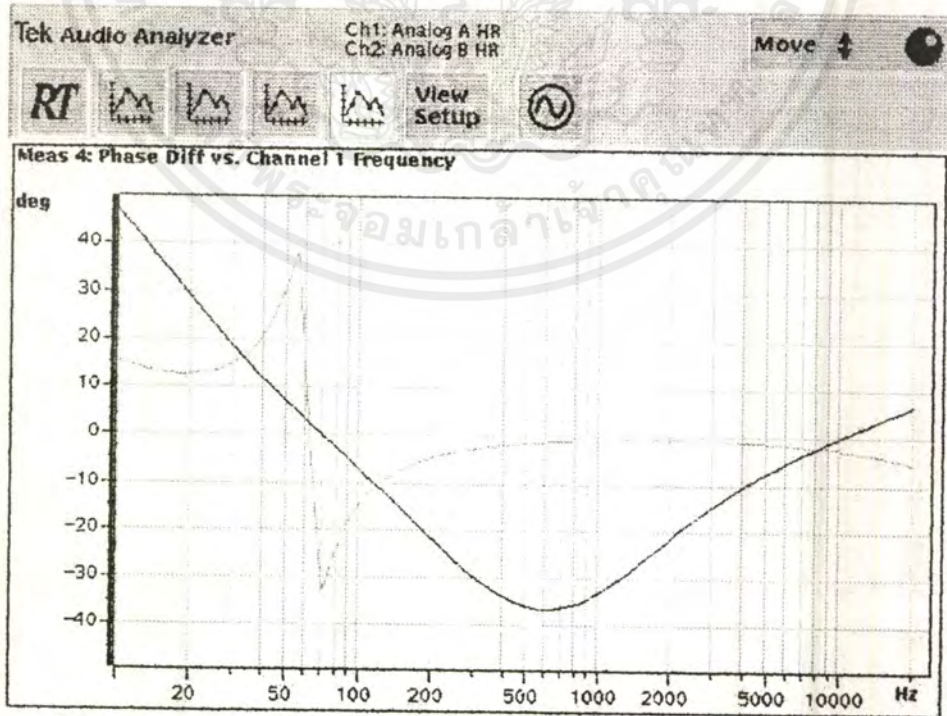
4.2 การทดลองเพื่อวัดผลตอบสนองทางเฟส

ในการทดลองนี้เราจะใช้วงจรทดสอบดัง บล็อกไดอะแกรม ดังนี้



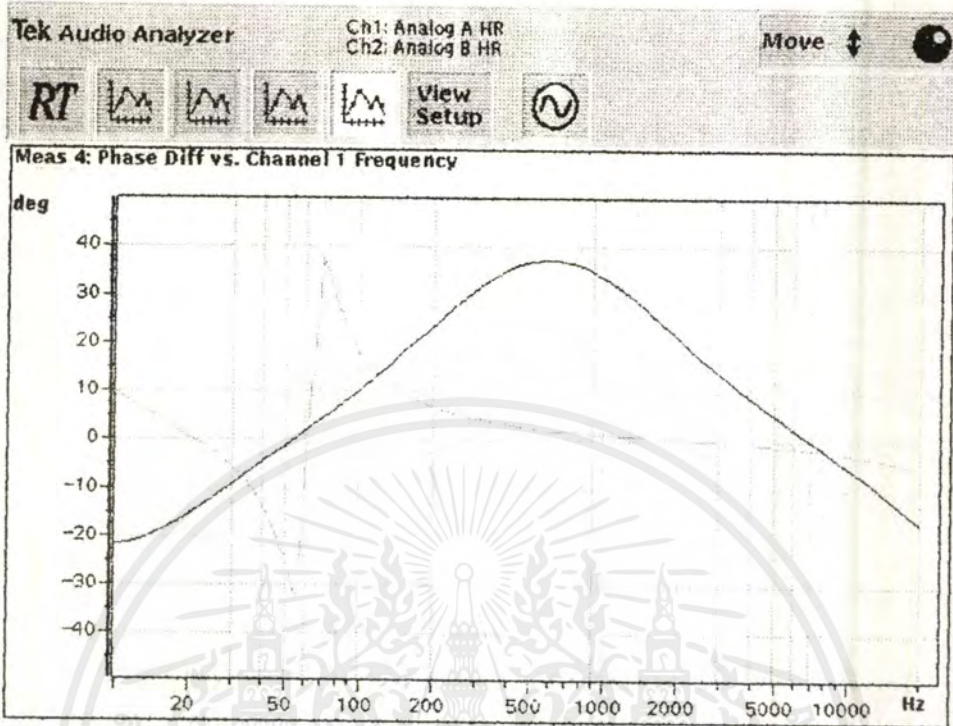
รูปที่ 4-4 บล็อกไดอะแกรม ที่ใช้ในการทดลองผลตอบสนองทางเฟส

และเราจะได้ผลการทดสอบดังนี้

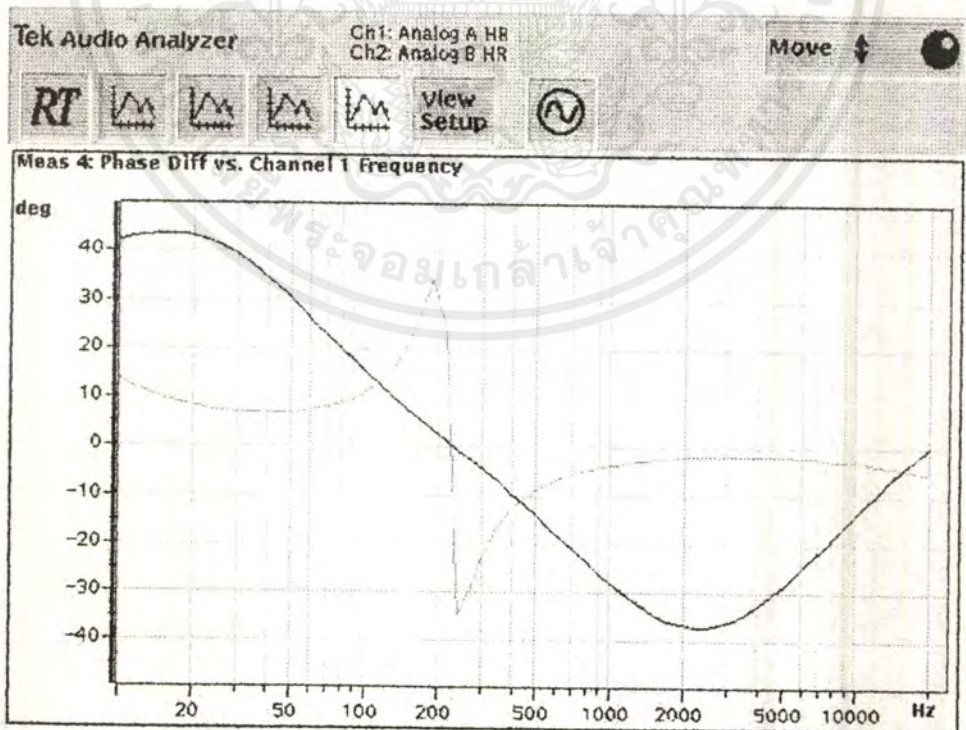


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บุกที่ สูงสุด ($f_p = 60\text{Hz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

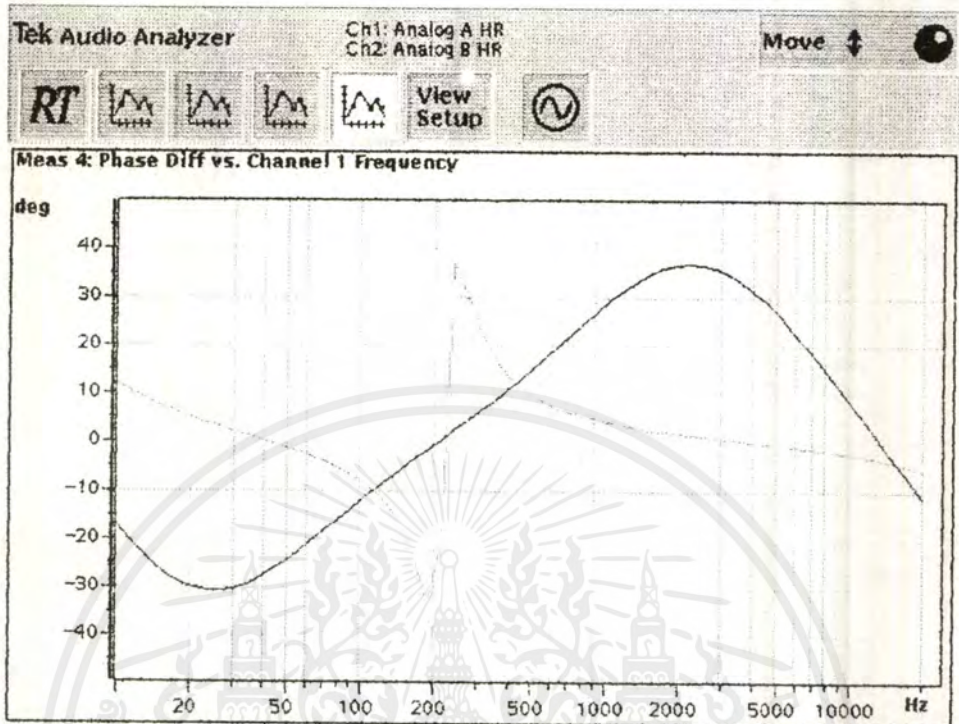


ผลตอบรับของทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 60\text{Hz}$)

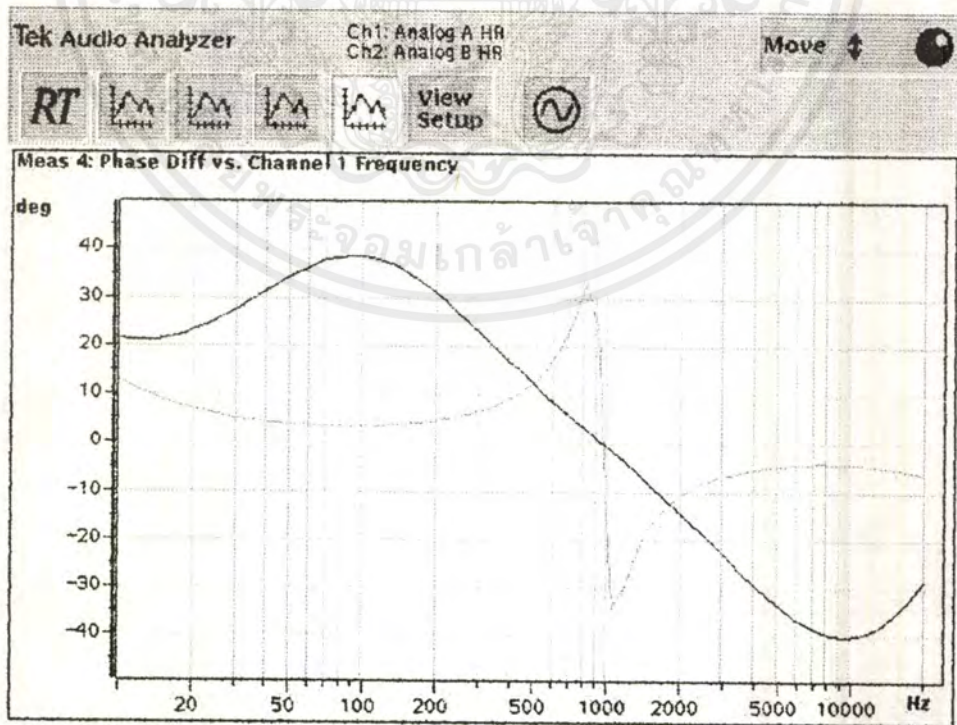


ผลตอบรับของทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 240\text{Hz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

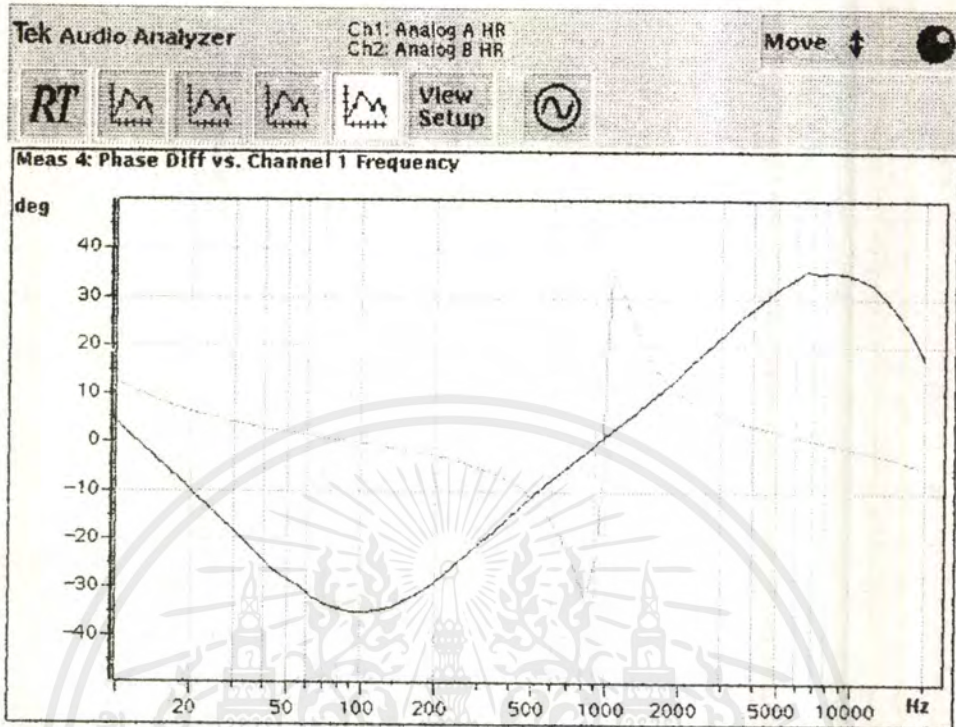


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 240\text{Hz}$)

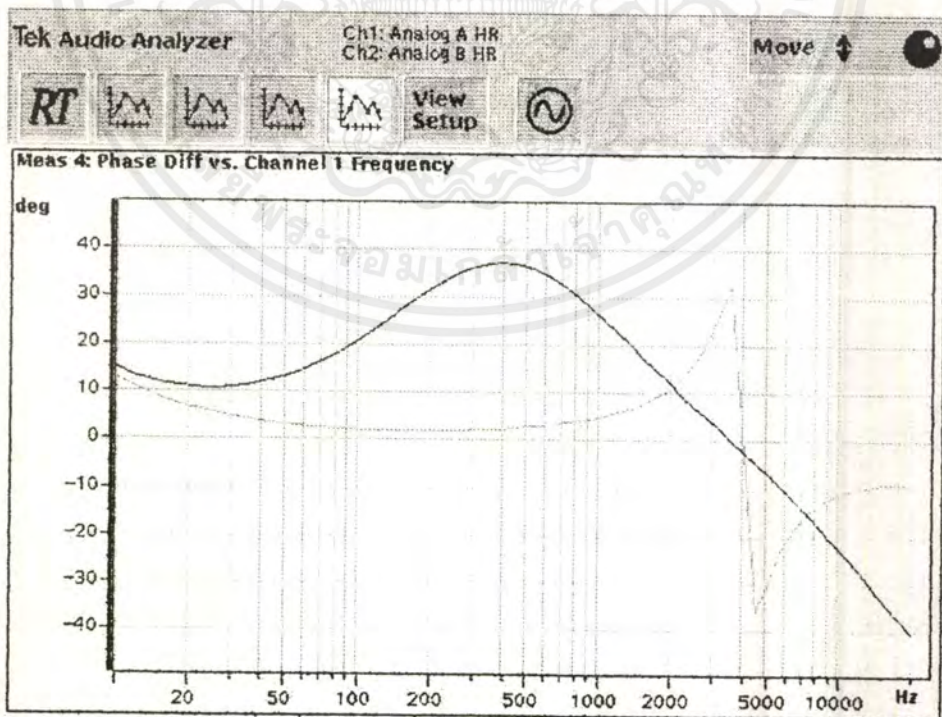


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 1\text{KHz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

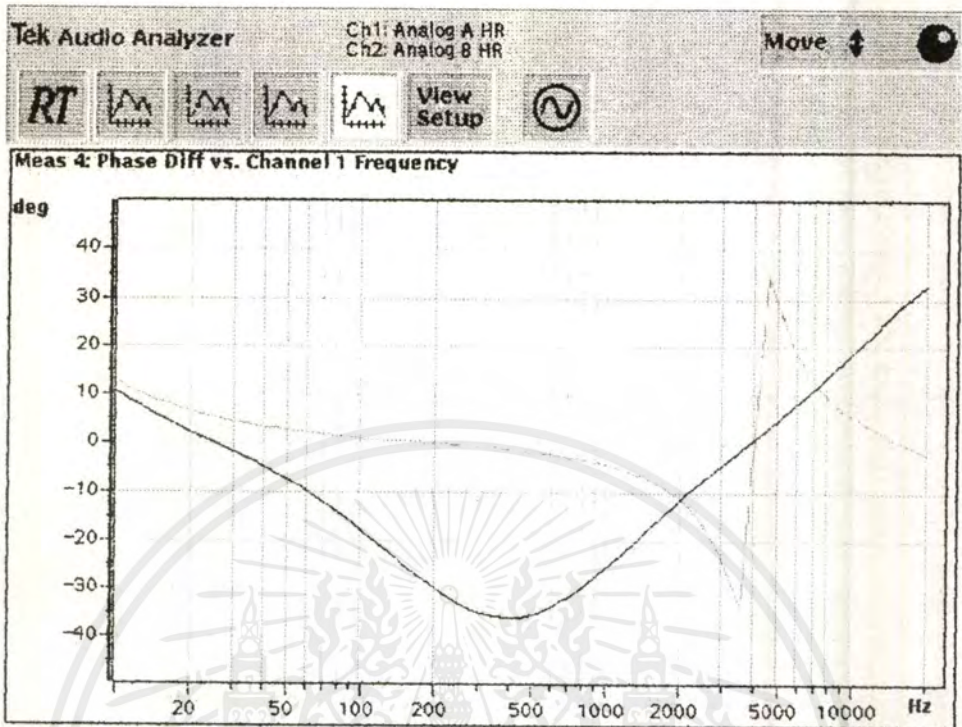


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 1\text{KHz}$)

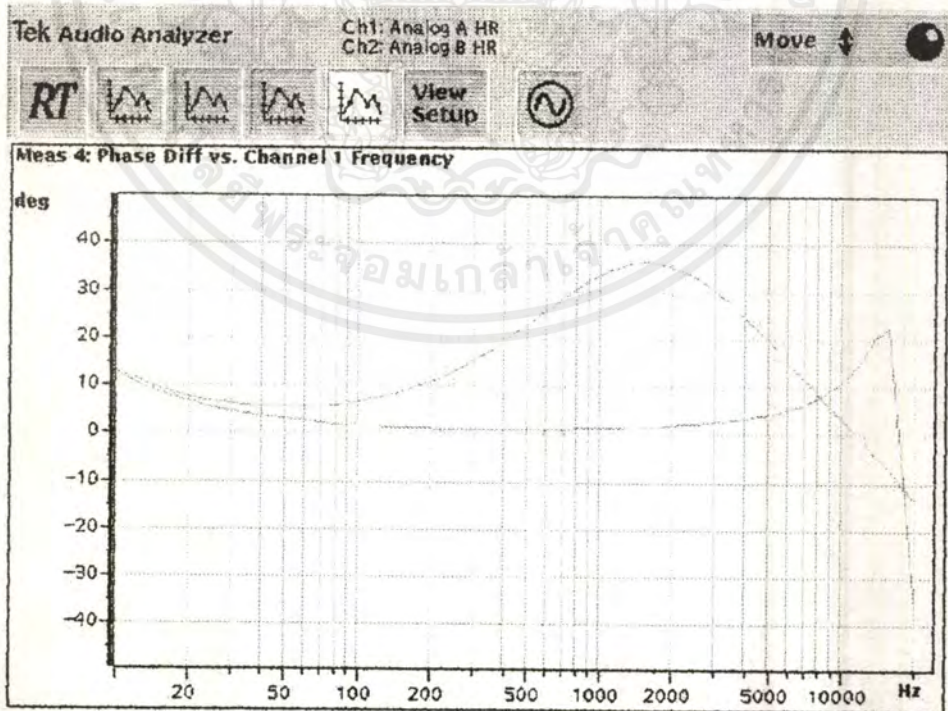


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บูลท์ สูงสุด ($f_p = 4\text{KHz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

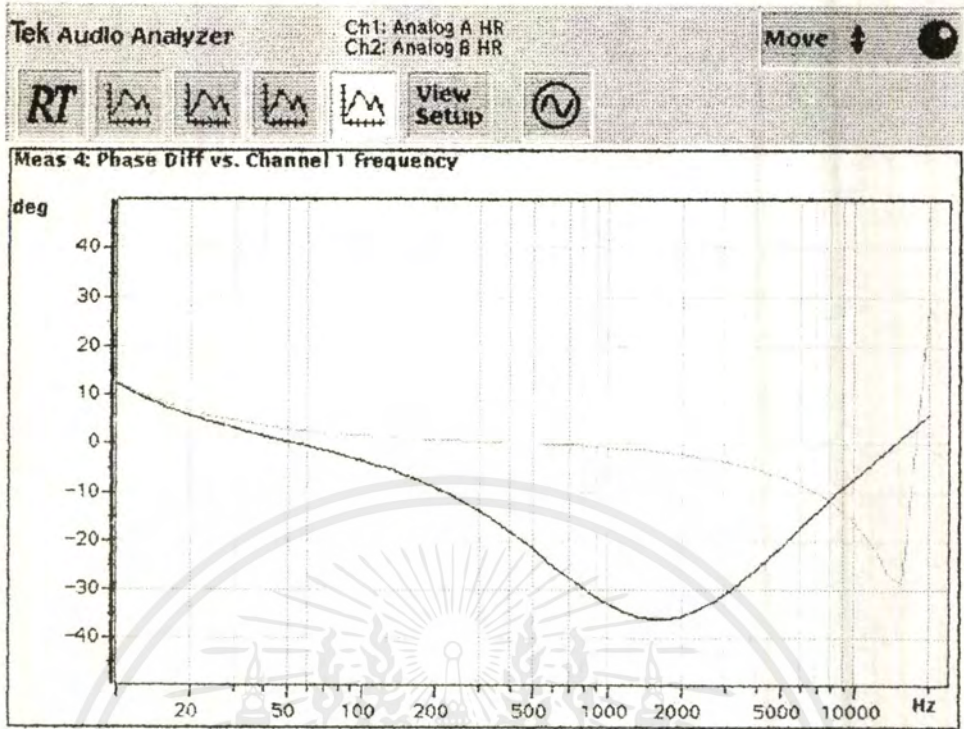


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 4\text{KHz}$)



ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ บุสท์ สูงสุด ($f_p = 16\text{KHz}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

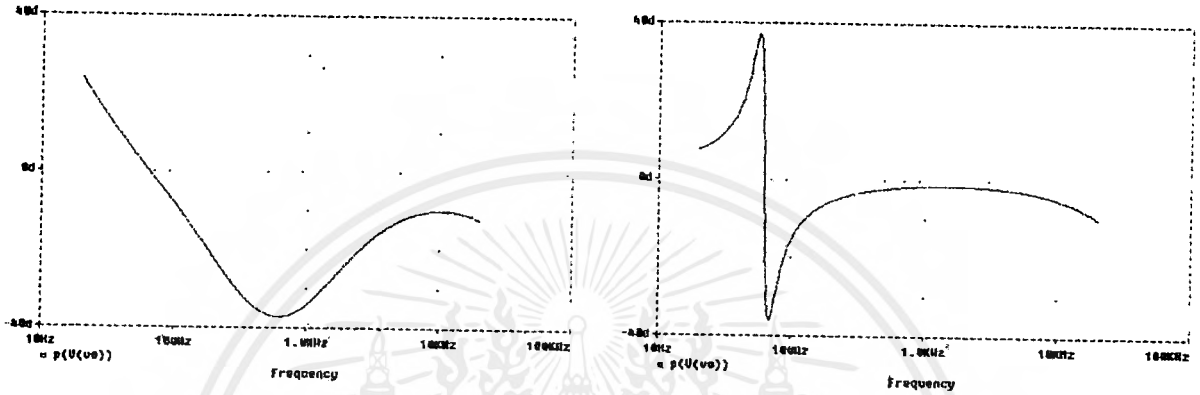


ผลตอบสนองทางเฟสเมื่อ คัท สูงสุด ($f_p = 16\text{KHz}$)

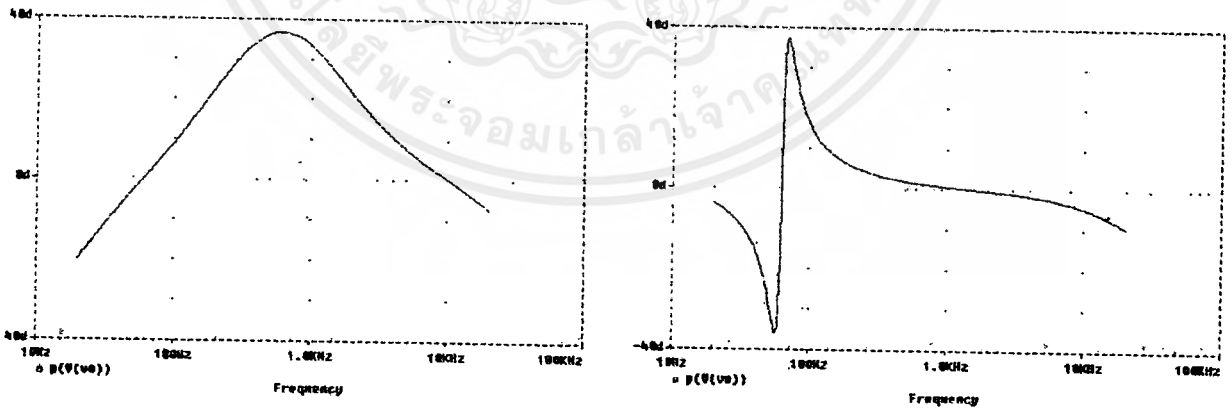
หมายเหตุ: ทุกรูป พล็อตที่ความละเอียด 62 จุดในช่วงความถี่ 20Hz- 20kHz

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSpice สำหรับผลตอบสนองทางเฟส

ที่ $f_p = 60\text{Hz}$;

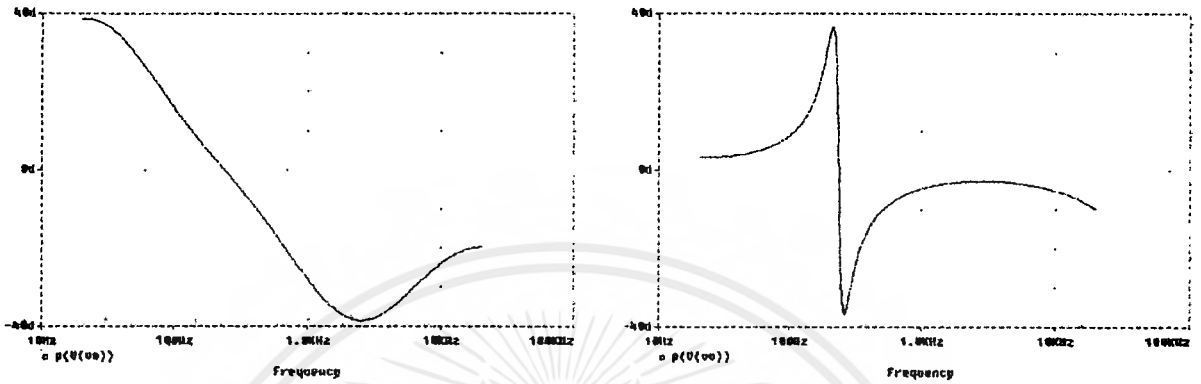


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

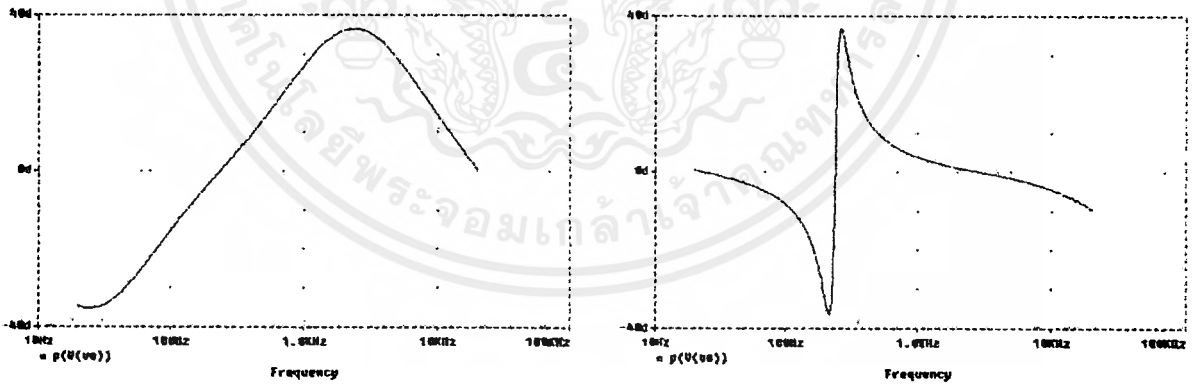


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 240\text{Hz}$;

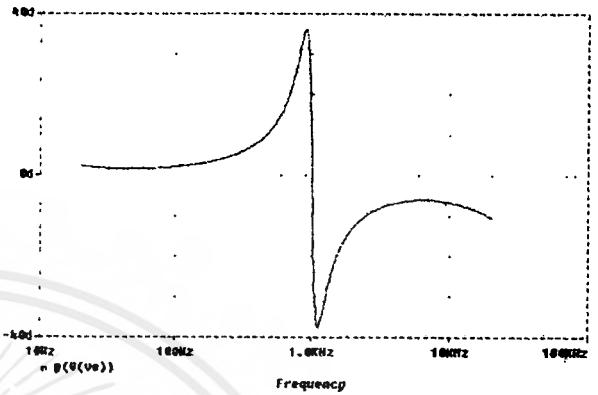
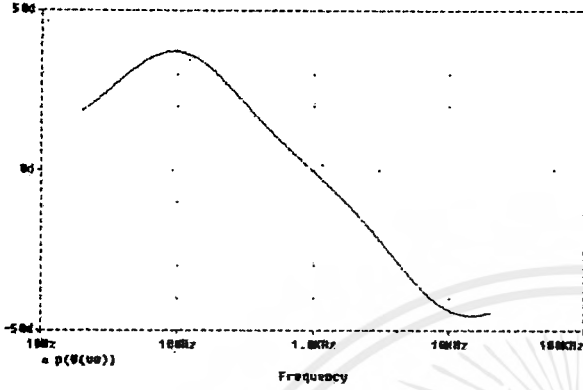


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

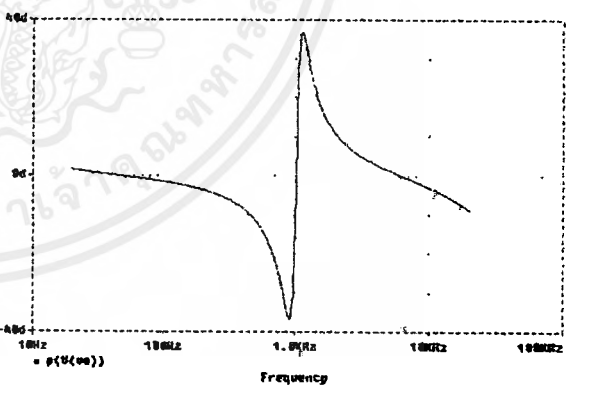
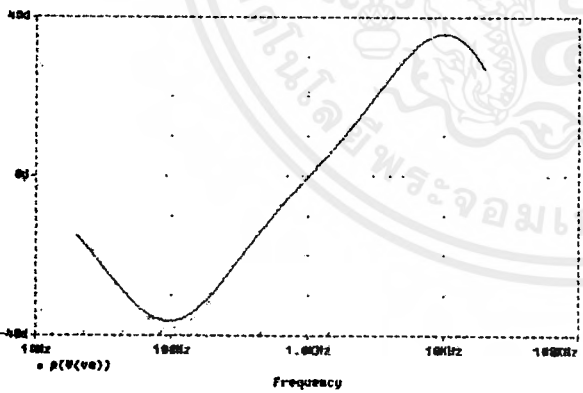


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 1\text{KHz}$;

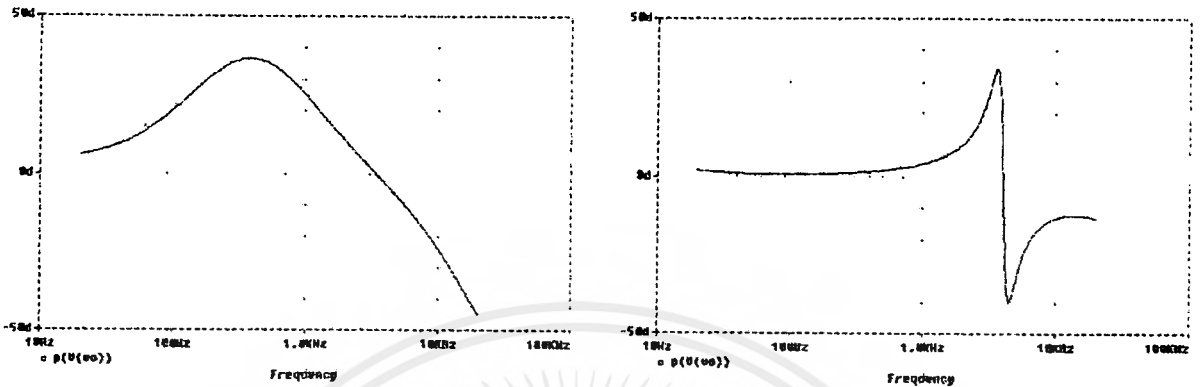


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

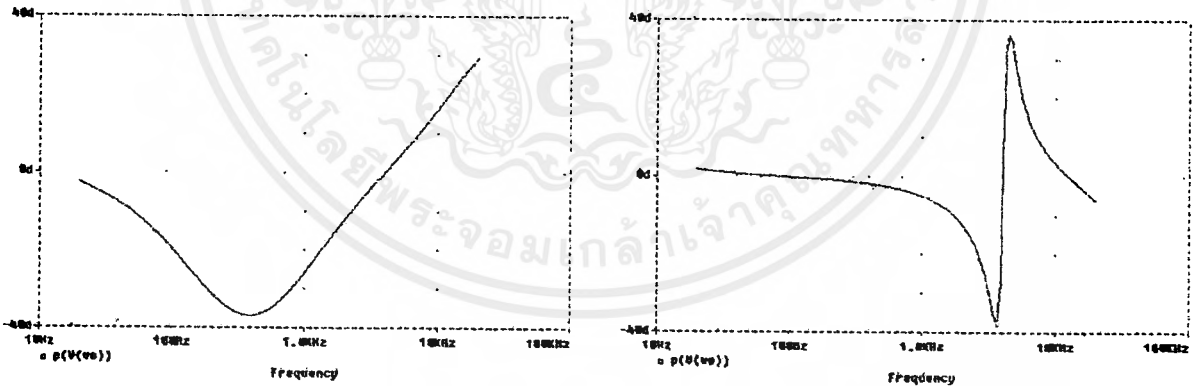


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 4\text{KHz}$;

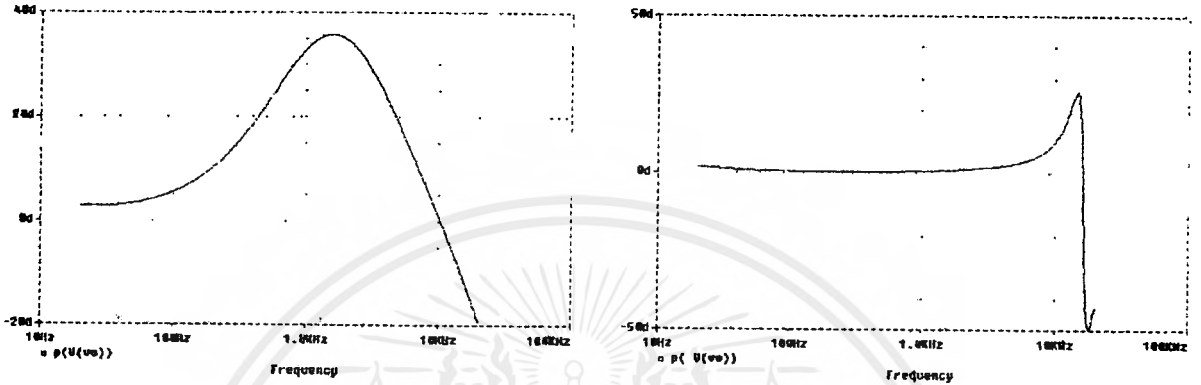


แสดงผลตอบสนองของทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

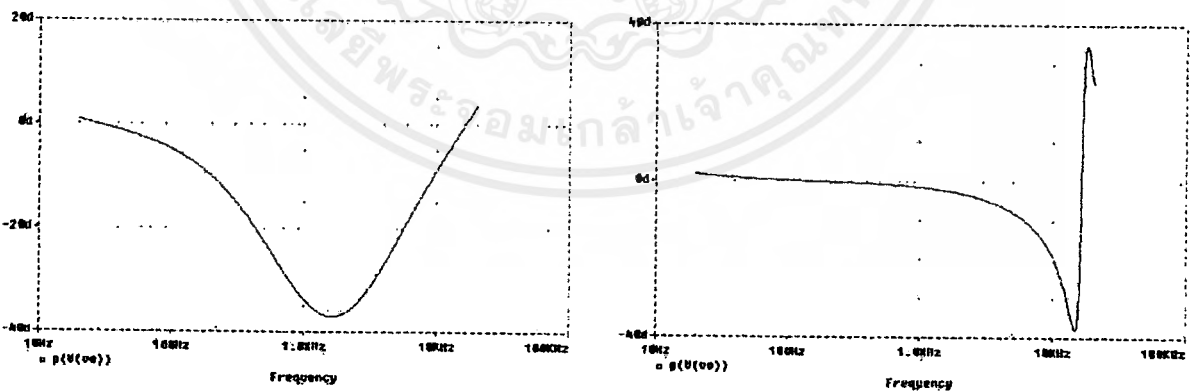


แสดงผลตอบสนองของทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

ที่ $f_p = 16\text{KHz}$;



แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง บูลท์ สูงสุด

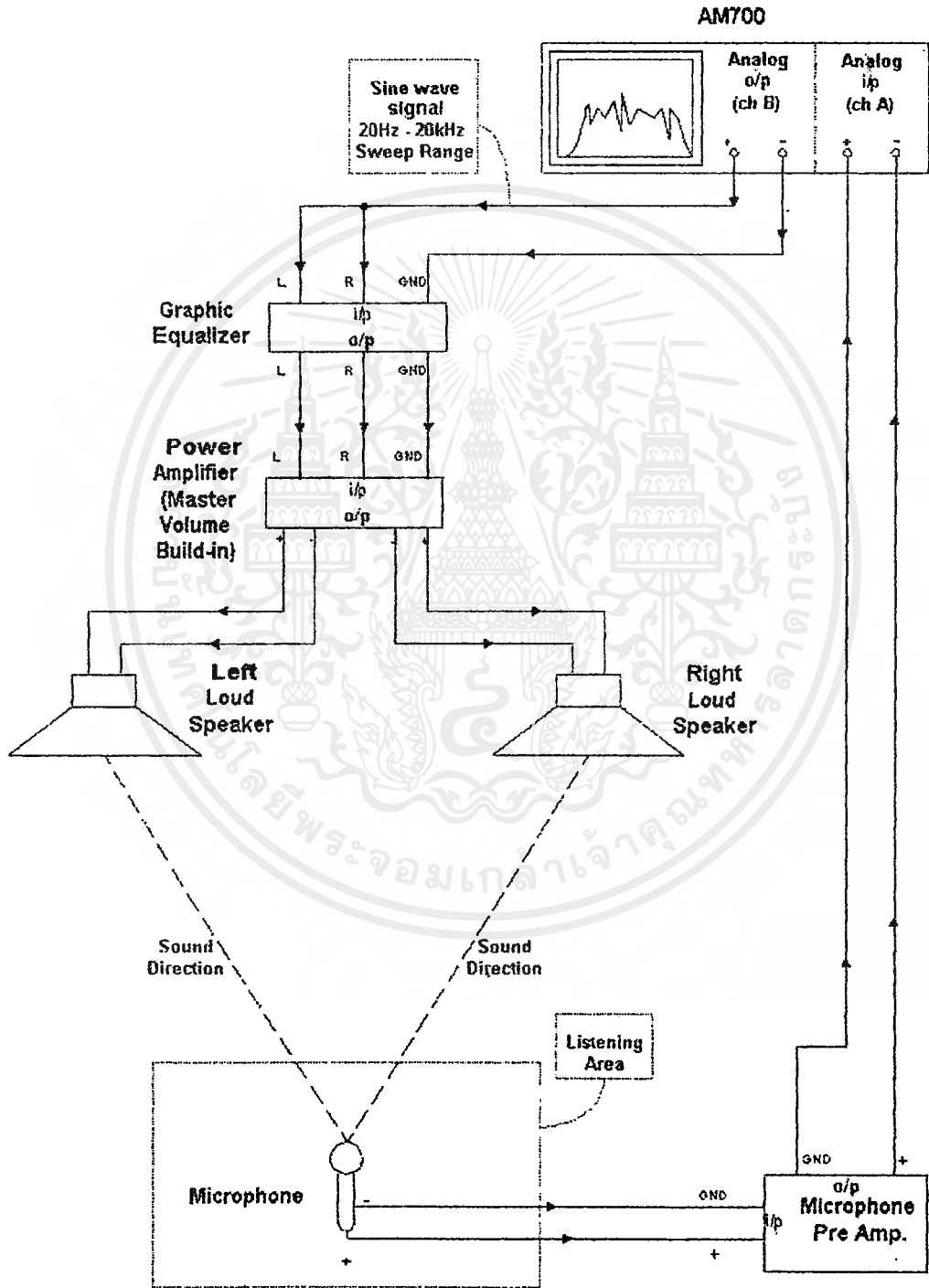


แสดงผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ Q มีค่าต่ำสุด(ซ้าย) และสูงสุด (ขวา)
ที่ตำแหน่ง คัท สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบเพื่อปรับแต่งสภาพอคูสติก(Acoustic)ของห้องฟัง

ในการทดสอบเพื่อปรับแต่งสภาพอคูสติก(Acoustic)ของห้องฟังนั้น เราได้ใช้ห้อง E12-1204 เป็นสถานที่ที่ใช้ทดสอบ และเราจะใช้ระบบการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4-5 ระบบที่ใช้ในการทดสอบเพื่อปรับแต่งสภาพอคูสติก(Acoustic)ของห้องฟัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

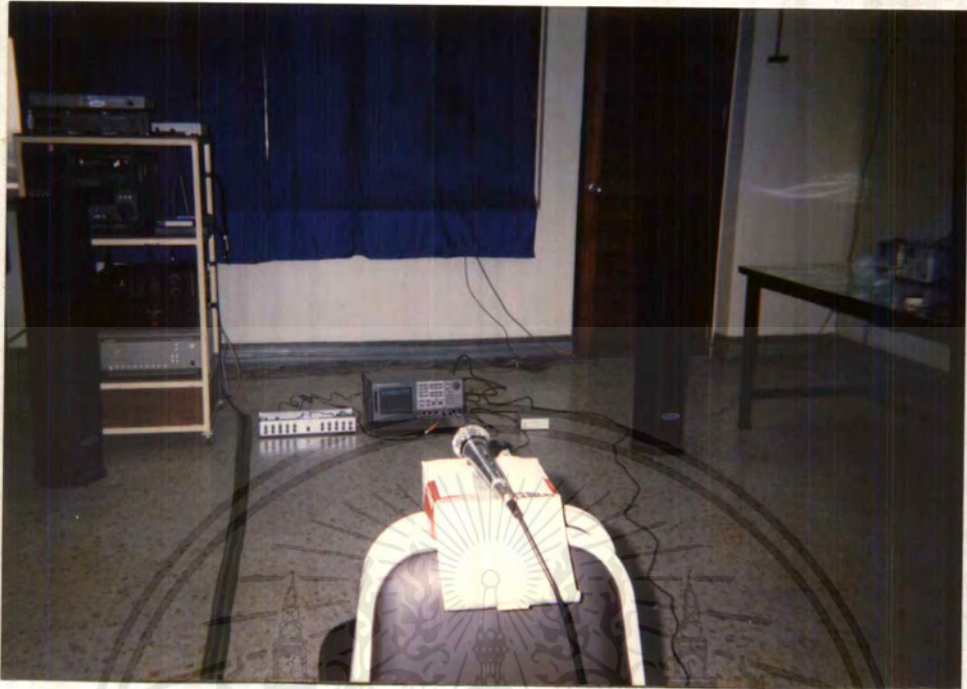
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ไมโครโฟน	NPE รุ่น PRO-12
ลำโพง	Sony รุ่น SS-GT88
เครื่องขยายเสียง	ICE
ออสซิลออสโคป	Tektronix รุ่น AM700

ในการทดสอบนี้ เราจะตั้งความถี่ที่ต้องการจะวัดในเครื่องออสซิลออสโคป ดังนี้ คือ ตั้งความละเอียดที่ 31 จุด และจะ sweep ค่าความถี่ที่ตั้งไว้ข้างต้น จาก 20Hz ถึง 20KHz โดยใช้ ไมโครโฟน วางไว้ที่ตำแหน่งนั่งฟัง เพื่อวัดค่า ผลตอบสนองของทางขนาด ณ จุดนั่งฟัง (ยังไม่ ต้อง บูลท์ หรือคัทใดๆที่ กราฟฟิค ออสซิลออสโคป)

เมื่อเครื่อง ออสซิลออสโคป ทำการSweep เสร็จแล้ว เราจะได้ ผลตอบสนองของทาง ขนาด ที่จุดนั่งฟัง ก่อนการปรับสภาพทางอคูสติก(Acoustic) เมื่อเราทราบลักษณะของ ผลตอบสนองของทางขนาด ที่ได้แล้ว เราก็สามารถปรับแต่งที่ กราฟฟิค ออสซิลออสโคป เพื่อให้ได้ ผลตอบสนองของทางขนาด ที่เรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ซึ่งการปรับแต่งนั้นก่อนอื่นเราจะปรับค่า Q ของทุกๆแบนด์ให้มีค่าสูงสุดเสียก่อน (เพื่อให้แบนด์วิธแคบที่สุด ทำให้ผลกระทบต่อกันระหว่างแบนด์ข้างเคียงมีน้อยที่สุด) แล้วพิจารณา กราฟที่พล็อตได้ ณ จุดความถี่กลางของแต่ละแบนด์ แล้วปรับการบูลท์-คัท และทำการพล็อตใหม่ จนได้ผลตอบสนอง ณ จุดความถี่กลางของแต่ละแบนด์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด จากนั้นจึง พิจารณาผลตอบสนองที่ระหว่าง ความถี่กลางของแต่ละแบนด์ แล้วทำการปรับค่าQ จนกว่าผลตอบสนองของทางขนาดโดยรวมมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด นั่นคือ ผลตอบสนองของทางขนาดโดยรวมมีความราบเรียบ (Flat) มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้นั่นเอง ในการทดสอบครั้งนี้เราจะได้ผลการทดสอบ ดังนี้



รูปแสดง ลักษณะสถานที่และระบบที่ใช้ทดสอบ สังกัดไมโครโฟนวาง ณ จุดตำแหน่งนั่งฟัง

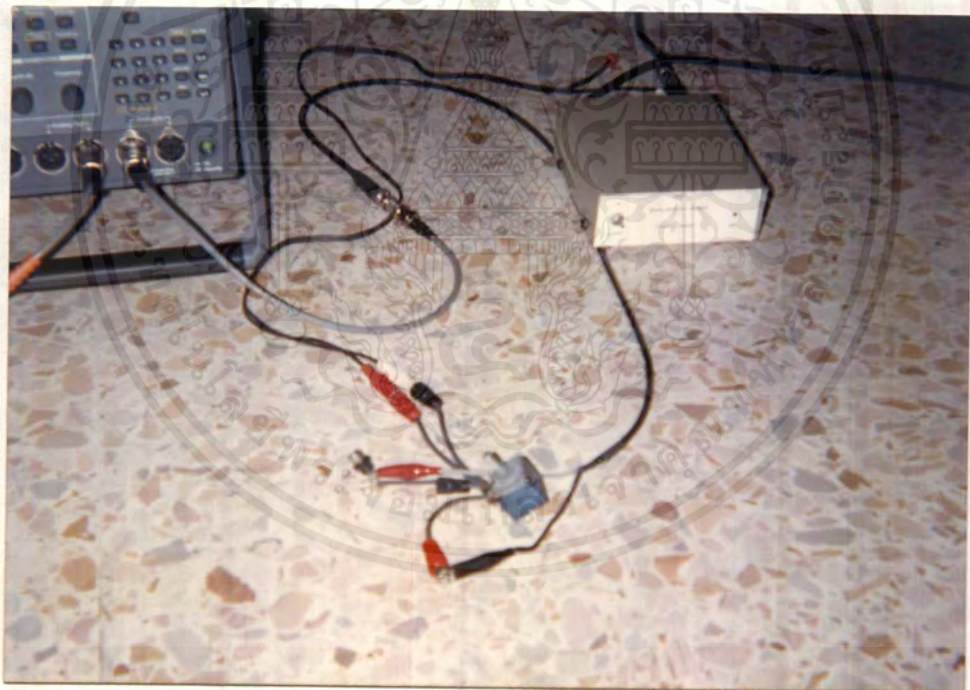


รูปแสดง เครื่องขยายเสียงที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

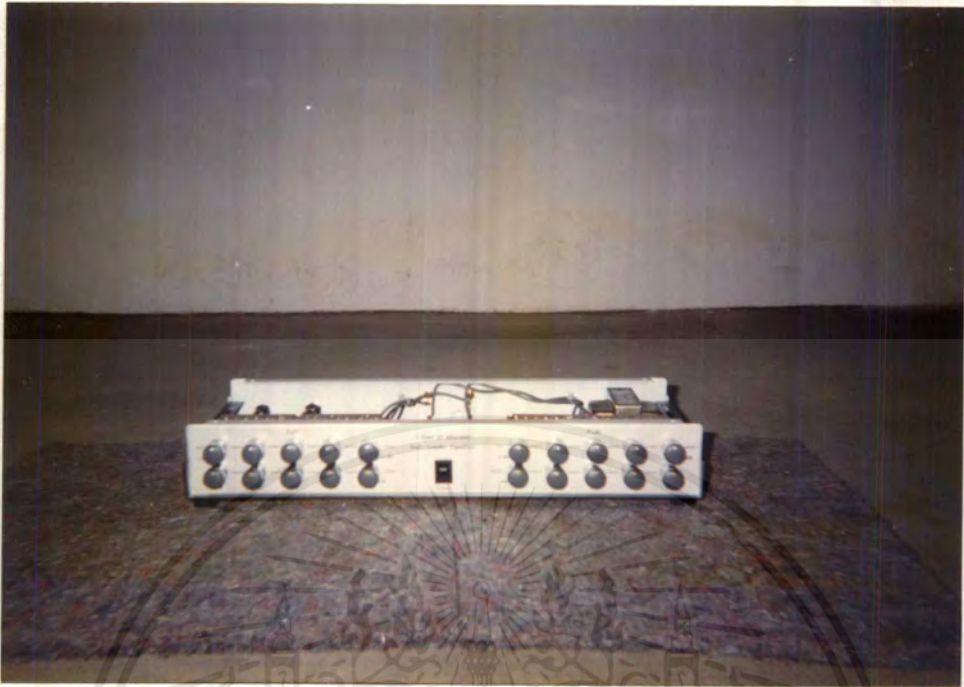


รูปแสดง เครื่องออดิโอ อานาไลเซอร์ที่ใช้

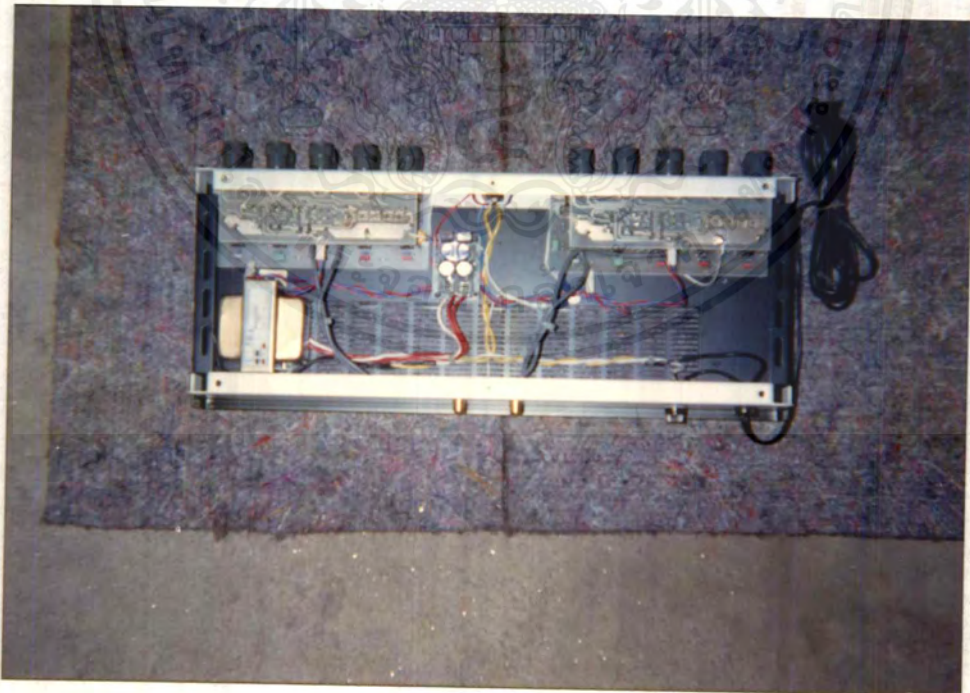


รูปแสดง การต่อ PreMic เข้าเครื่องออดิโออานาไลเซอร์

จากไมโครโฟนผ่านเข้ายัง PreMic (ขวาสุด) จาก PreMic ผ่าน โฟเทนิโซมิเตอร์ (กลาง) เพื่อลดความแรงของสัญญาณก่อนเข้าเครื่อง ออดิโอ อานาไลเซอร์(ซ้าย) และสัญญาณ Sinewave จะถูกส่งออกจากเครื่อง ออดิโอ อานาไลเซอร์(สายสีส้มด้านซ้ายสุด) เพื่อเข้าสู่วงจรรูปฟิสิกส์ควอดไลเซอร์ และผ่านไปยังเครื่องขยายเสียง ไปสู่ลำโพงต่อไป



รูปแสดง ด้านหน้าของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์

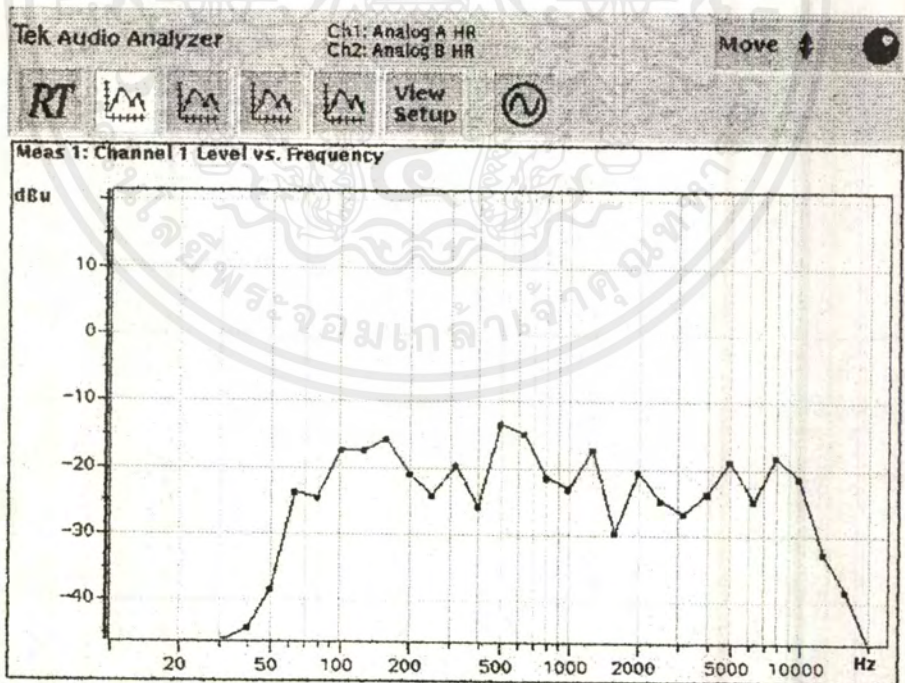


รูปแสดง ด้านบนของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

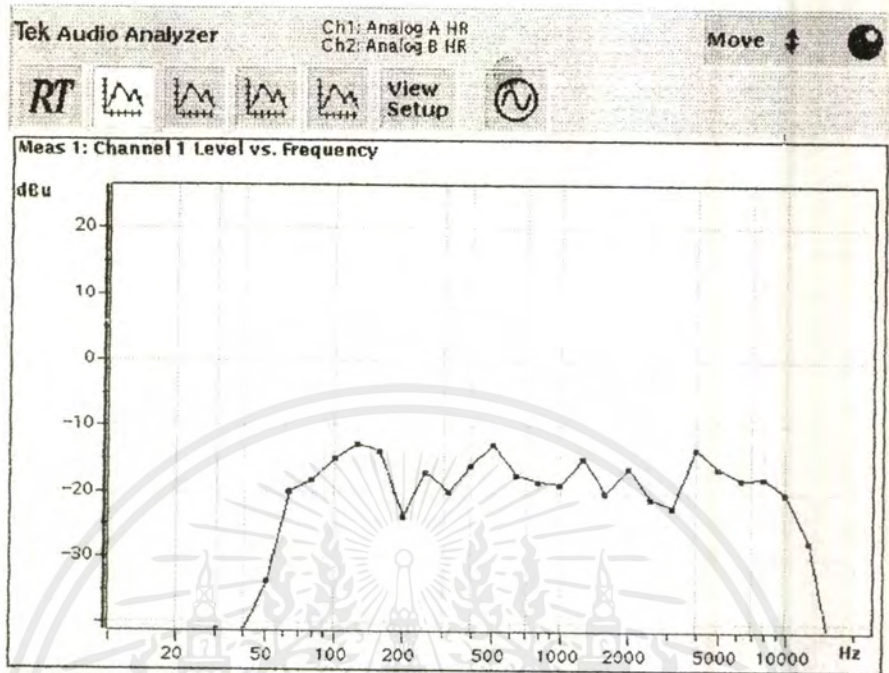


รูปแสดง ด้านหลังของออดิโอ กราฟฟิค อีควอไลเซอร์



รูปแสดง ผลตอบสนองของทางขนาดที่ได้ก่อนการปรับแต่งสภาพพอดูสติค(ไม่มีกรปรับแต่งใดๆที่อีควอไลเซอร์)

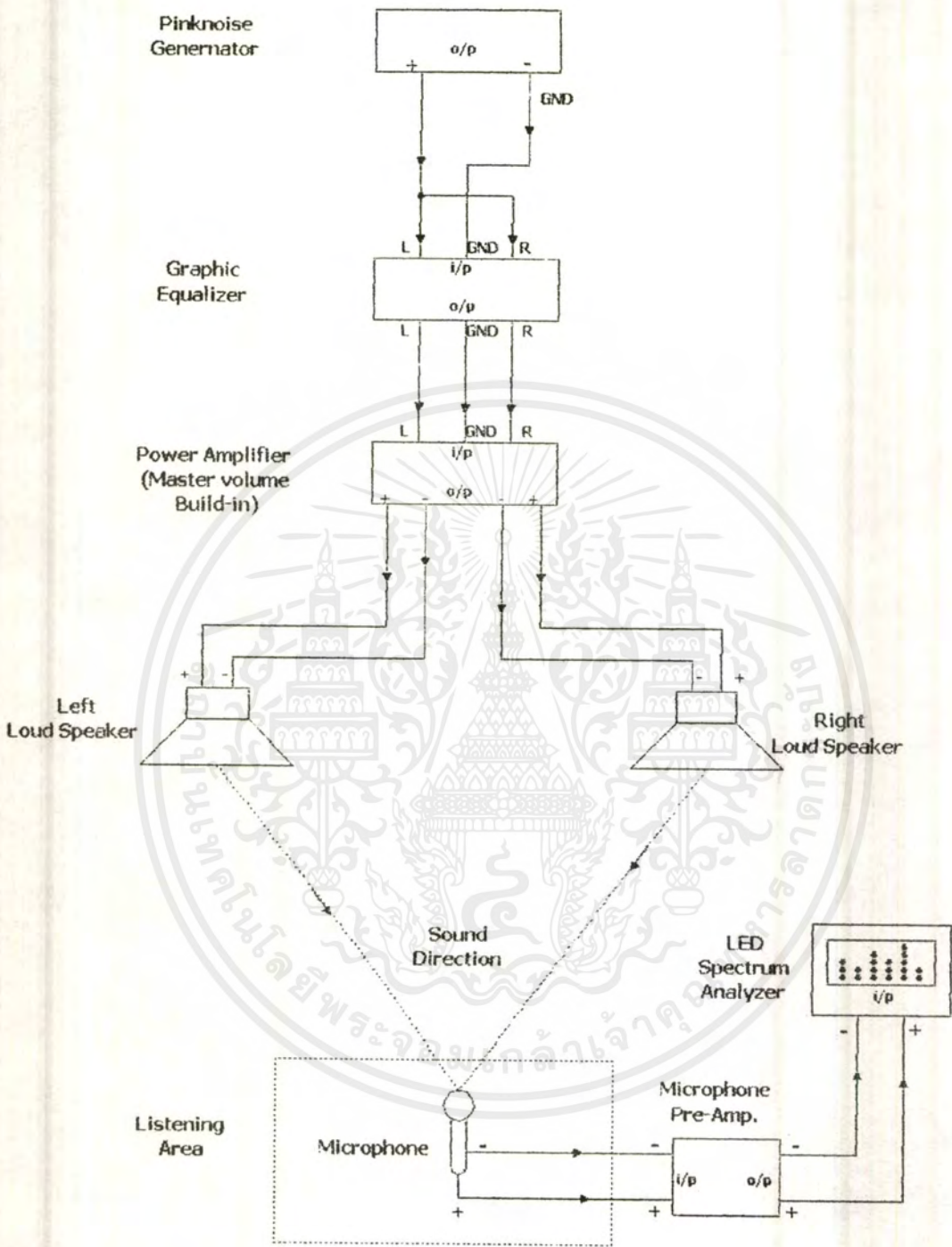
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดง ผลตอบสนองทางขนาดที่ได้หลังการปรับแต่งสภาพอะคูสติก(หลังจากการปรับแต่งที่อีควอไลเซอร์)

จากผลที่ได้จะเห็นว่า ผลตอบสนองทางขนาด ณ ตำแหน่งรับฟังภายหลังการปรับแต่ง จะมีความราบเรียบ (Flat) มากกว่าก่อนปรับแต่ง อย่างไรก็ตามวิธีการแบบนี้จะมีความยุ่งยากในการปรับแต่งมาก เนื่องจากการปรับและบันทึกค่าครั้งต่อครั้ง ซึ่งจะใช้เวลาอย่างมาก เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้จะมีน้ำหนักมาก รวมทั้งมีขนาดใหญ่ และมีราคาสูงมากอีกด้วย

ดังนั้น เพื่อให้การปรับแต่งสภาพทางอะคูสติกมีความง่ายขึ้น และใช้เครื่องมือที่มีราคาถูกลงมาก เราจึงได้ทดลองโดยใช้ระบบทดสอบอีกระบบหนึ่งดังต่อไปนี้



รูปที่4_6 ระบบที่ใช้ทดสอบสภาพอะคูสติคที่ง่ายต่อการปรับแต่งมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูประบบดังกล่าว จะใช้สัญญาณทดสอบเป็นสัญญาณ พิงค์นอยส์ (Pinknoise) เนื่องจากว่า คุณสมบัติของสัญญาณ พิงค์นอยส์ ก็คือ เป็นสัญญาณที่มีพลังงานเท่ากันตลอดต่อ 1 ช่วงออกเตฟ (Equal energy per octave) ดังนั้น ทุกๆความถี่ในตลอดช่วงย่านความถี่เสียงก็จะมีขนาดของสัญญาณเสมอเท่ากันตลอด (Flat Response) ดังนั้น เราจะนำสัญญาณชนิดนี้มาใช้ป้อนเข้าสู่ระบบ และส่วนแสดงผล เราจะใช้เป็นลักษณะของ สเปกตรัม อนุโลเซอร์ (Spectrum Analyzer) แบบชนิดที่แสดงผลด้วย LED ขนาด 10x10 มีความถี่กลางคือ 32Hz , 62Hz , 125Hz , 250Hz , 500Hz , 1kHz , 2kHz , 4kHz , 8kHz และ 16kHz และใช้ไมโครโฟน กับ Pre-Amp. ที่มีคุณภาพดี วางไว้บริเวณตำแหน่งรับฟังเช่นเดิม จากนั้นก็ปรับความดังของเครื่องขยายเสียงไว้ที่ตำแหน่งซึ่งมีความดังตามที่อยู่ฟังต้องการ ซึ่งตอนนี้เราก็จะเห็นลักษณะของ สเปกตรัม ที่แสดงผลออกมาทาง LED หลังจากนั้นเราก็ปรับแต่งที่ Graphic Equalizer จนกว่าจะได้ผลตอบสนองทางขนาดที่แสดงผลใน สเปกตรัม อนุโลเซอร์ มีความราบเรียบมากที่สุด วิธีนี้จะมีความง่ายขึ้นและใช้เวลาปรับตั่งน้อยกว่าวิธีแรกมาก ซึ่งจากการทดลองปรับตั่งและบันทึกค่า เราจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



ลักษณะของสเปกตรัม ก่อนปรับแต่งสภาพทางอะคูสติก (ใช้ Pink Noise เป็นสัญญาณทดสอบ)



ลักษณะของสเปกตรัม หลังปรับแต่งสภาพทางอะคูสติก (ใช้ Pink Noise เป็นสัญญาณทดสอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

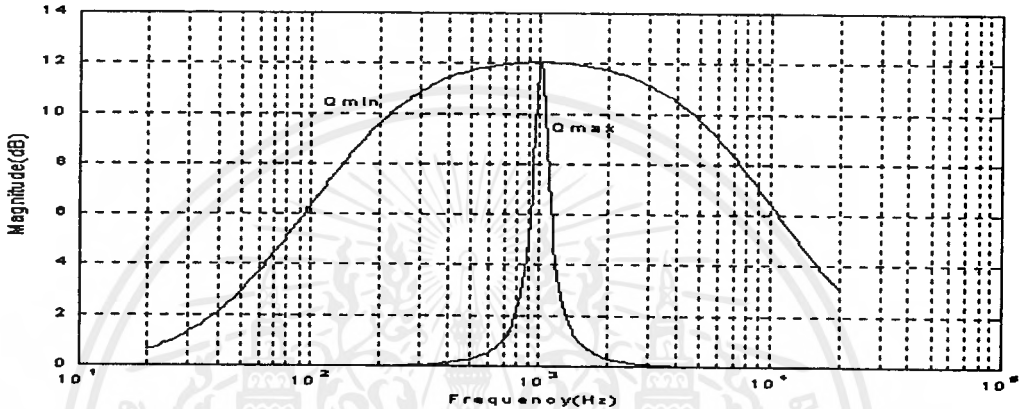
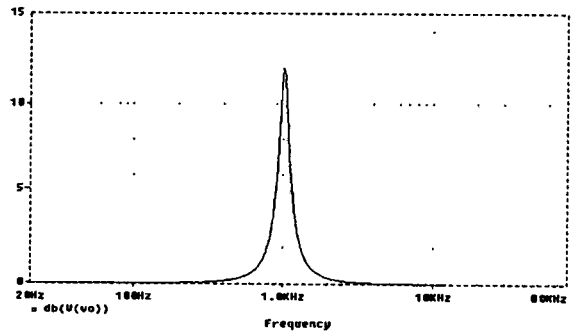
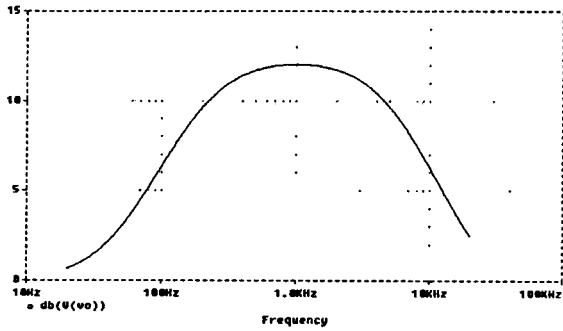
บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

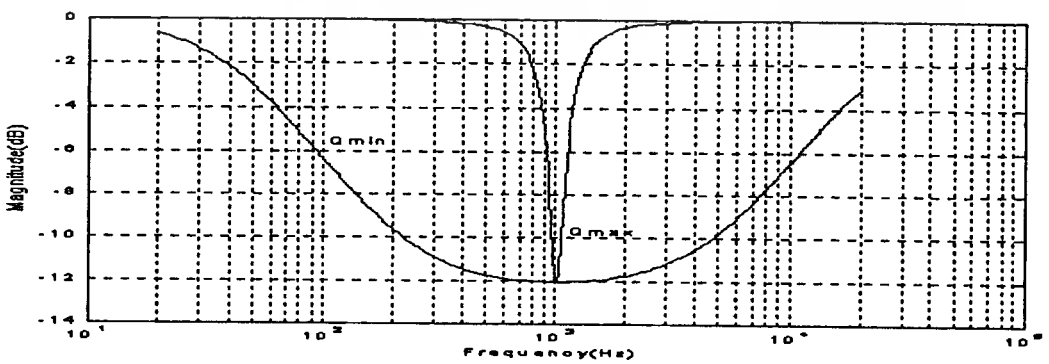
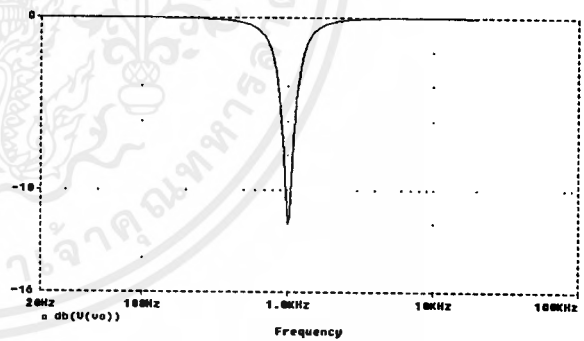
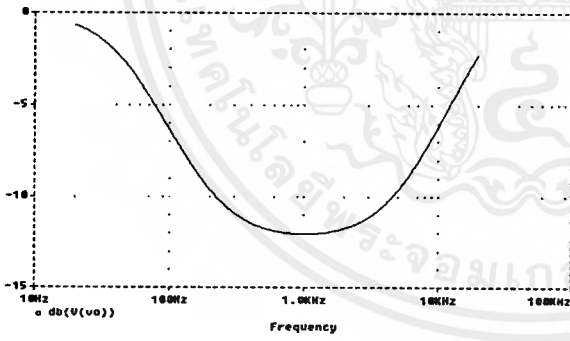
จากการทดลองทั้งหมด เราจะแยกสรุปผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

5.1 การทดลองวัดค่าผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองทางเฟส

จากรูปของผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นว่ามีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับการใช้โปรแกรม MATLAB ในการพล็อตรูปภาพจากสมการในบทที่ 3 และกับโปรแกรม PSpice ในบทที่ 4 แต่จะเห็นว่าเมื่อเราปรับค่า Q มีค่าสูงสุดนั้น ณ จุด ความถี่กลาง จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมมากและมีความสูงของยอดแหลมลดลงจากกราฟของการปรับ Q ต่ำสุดเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดความละเอียดในการพล็อตของเครื่องทดสอบ (AM 700) ยังไม่ละเอียดพอ จึงทำให้การพล็อตจุดของเครื่องมือทดสอบข้ามจุดบางจุดไปเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำให้ยอดแหลมของ กราฟ อยู่ต่ำกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย(ข้อเท็จจริงนี้ พิสูจน์ได้จากการเปลี่ยนจำนวนจุดพล็อตในเครื่อง AM 700 จะทำให้ลักษณะของยอดของกราฟเปลี่ยนแปลงไปทันที) และ ผลตอบสนองทางเฟส นั้น จะมีลักษณะของกราฟ เบี่ยงเบนไปจากการคำนวณเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากวงจร RC คัปปลิ่ง ด้านอินพุตและด้านเอาท์พุต กับตัวเก็บประจุที่นำมาต่อชดเชยนั่นเอง แต่ผลโดยรวมก็นับว่าใกล้เคียงกับการคำนวณพอสมควร ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างที่ชัดเจนของผลตอบสนองทางขนาด และ เฟส โดยการใช้โปรแกรม PSpice(จากวงจรใช้งานจริง) กับโปรแกรม MATLAB (จากการคำนวณทางทฤษฎี) ที่ความถี่ $f_p = 1\text{KHz}$ มาเปรียบเทียบกันเพื่อแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน

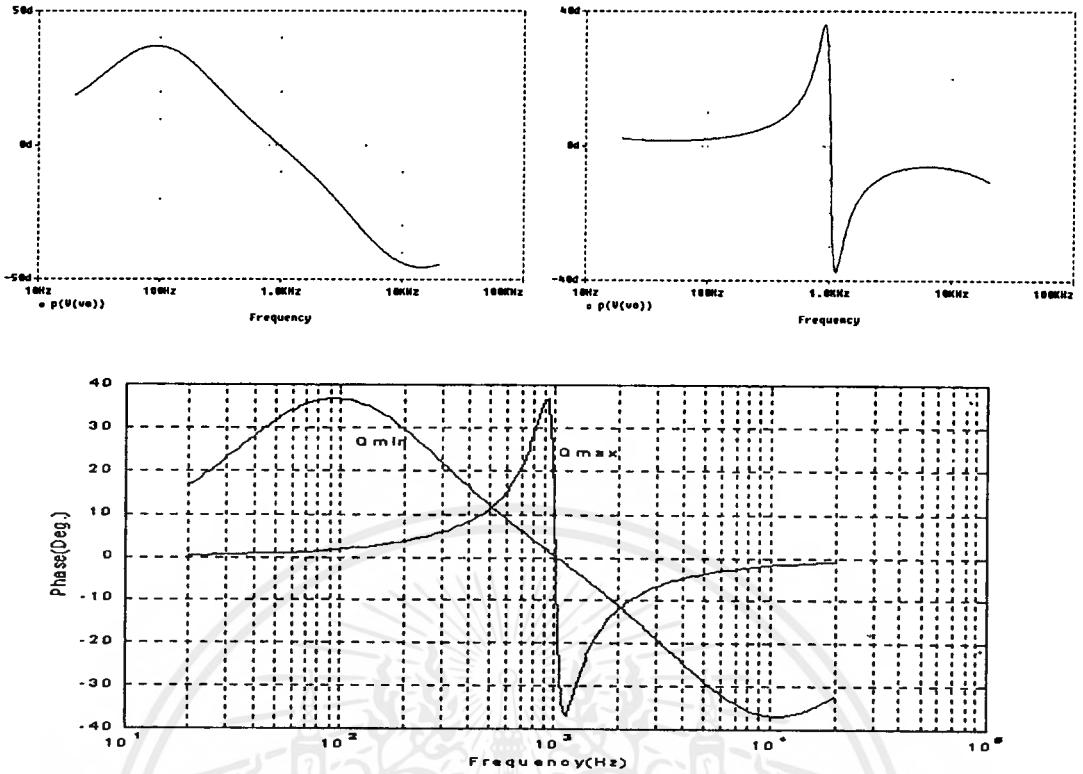


รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่างโปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ บูลท์ สูงสุด

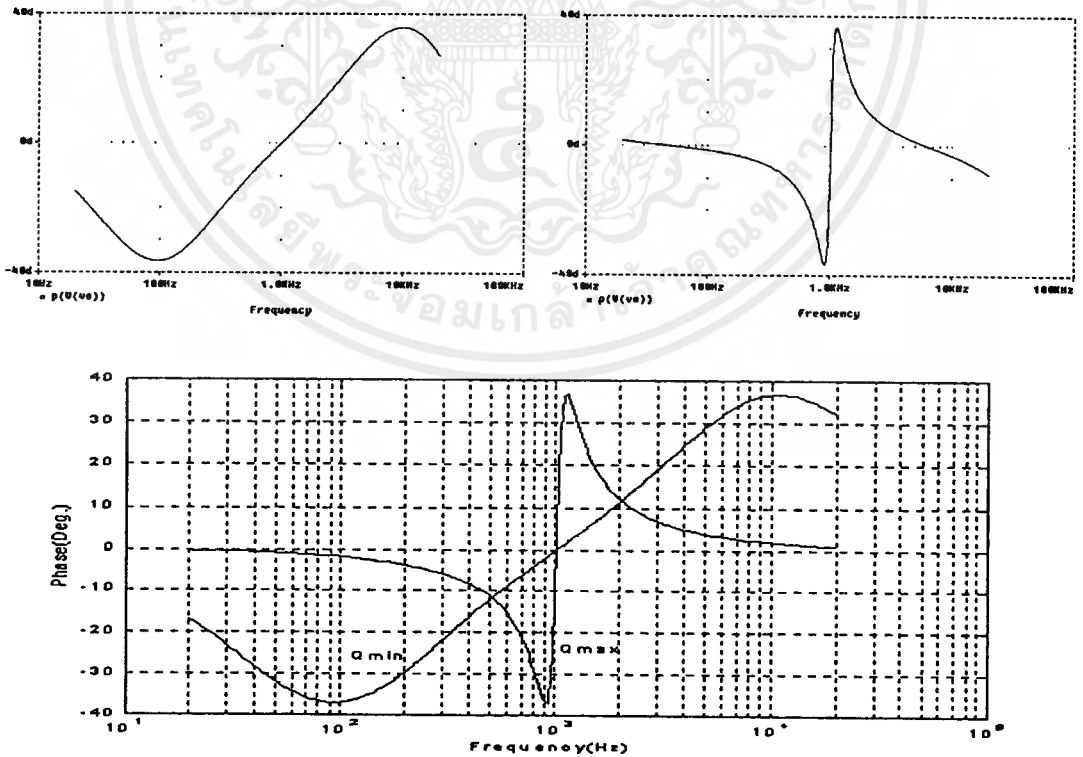


รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่างโปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ คัท สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่างโปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ บูลท์ สูงสุด



รูปแสดง การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสที่ $f_p = 1\text{KHz}$ ระหว่างโปรแกรม PSpice (ด้านบน) กับ MATLAB (ด้านล่าง) เมื่อ คัท สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองในการปรับแต่งสภาพทางอคูสติกของห้องฟัง

5.2.1 โดยใช้เครื่อง ออติโอ อนาไลเซอร์ (วิธีแรก)

จากรูปภาพ ของผลตอบสนองทางขนาดของตำแหน่งนั่งฟังก่อนการปรับแต่งและ หลังการปรับแต่งสภาพทางอคูสติก จะเห็นได้ว่าจะไม่ราบเรียบเท่าที่ควรทั้งนี้เนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยังมีผลตอบสนองทางความถี่ไม่ดีพอ เช่น ไมโครโฟน ที่ใช้เป็นต้น (สังเกตได้จาก กราฟผลตอบสนองทางขนาดที่ได้ ลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ช่วงความถี่ต่ำกว่า 100 Hz และช่วงความถี่สูงกว่า 10 KHz) และสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น เสียงรบกวนไฟ , เสียงแอร์ , เสียงพัดลมระบายความร้อนของเครื่องขยายเสียง ฯลฯ จึงทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่ราบเรียบเท่าที่ควร การทดลองในส่วนนี้จะใช้เวลาในการทดสอบนานพอสมควร อันเนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมข้างต้น อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ก็ทำให้ทราบถึงกรรมวิธีในการปรับสภาพอคูสติกของห้องฟังได้เป็นอย่างดี

5.2.2 โดยใช้ LED สเปคตรัม อนาไลเซอร์ (วิธีที่สอง)

จากรูปสเปคตรัมที่ได้ในผลการทดสอบหลังการปรับแต่ง เมื่อเทียบกับก่อนการปรับแต่ง จะเห็นว่า หลังการปรับแต่งจะมีผลตอบสนองทางขนาดที่ราบเรียบกว่าเดิมมาก อีกทั้งยังง่ายต่อการปรับแต่งด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจาก การแสดงผลด้วย LED นั้น เป็นลักษณะของ Real Time ดังนั้น เราจึงสามารถเห็นผลของการปรับแต่งในแต่ละครั้งได้ทันที จึงง่ายและใช้เวลาน้อยมาก ซึ่งในทางปฏิบัติจริงนั้น ควรจะใช้วิธีนี้เป็นวิธีหลัก เนื่องจากข้อดีหลายๆข้อดังที่กล่าวมานั้นเอง

5.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการ

ในการพัฒนาต่อไป ควรจะทำให้วงจรมีความสามารถเลื่อนความถี่กลาง (Center Frequency Adjustable) ได้ในแต่ละแบนด์ ด้วยการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะในส่วน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ขึ้นใหม่ที่ประกอบไปด้วย ค่าอินดักแตนซ์ และ ค่าคาปาซิแตนซ์ ให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้โดยไม่มีผลกระทบต่อค่า Q และ แอมพลิจูด ก็จะทำให้การชดเชยผลตอบสนองทางขนาด สามารถกระทำได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้นไปอีก

บรรณานุกรม

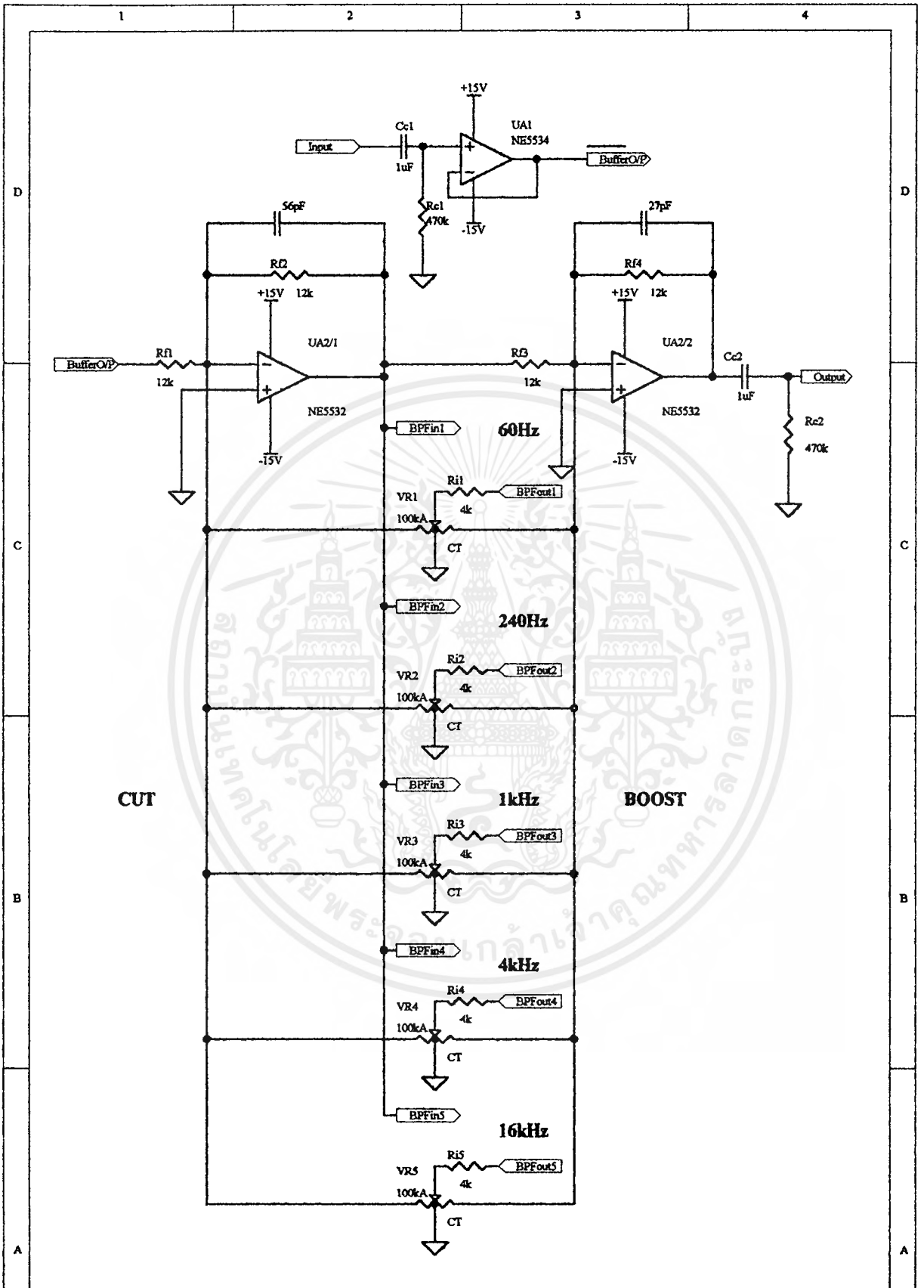
1. Sundaram Natarajan, Theory and Design Linear Active Network, New York: McGRAW-HILL, Inc, c1989.
2. Rolf Schaumann, Mohammed S. Ghausi, Kenneth R. Laker, Design of Analog filter, Passive, Active RC and Switched Capacitor, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.
3. Glen M. Ballou, Editor, Handbook for Sound Engineers, Second Edition, Howard W. Sams & Co., Inc., 1991.
4. L. Serrano and A. Carlosena, GB-R impedances: new approach to impedance simulation, IEE, Electronics Letters, Vol. 31, No. 9, 1995, pp. 689-690
5. Seiichi Noguchi, Tomio Suzuki, Hiroo Wakabayashi, A Manufacture of Q-Variable Graphic Equalizer Using Solid State Inductor., CAS80-34, pp. 17-24
6. Travis L.R. Mooney, Analysis and Design of a 10-Band Graphic Equalizer, ISRN#0-7803-2636-9, pp. 766-771
7. Audio handbook / technical editor Dennis Bohn; Santa Clara, CA; National Semiconductor Corp, C1976
8. กฤษดา วิศวีรานนท์, “เทคนิคการต่อวงจรเครื่องขยายเสียง”, บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2532

เว็บไซต์ที่ใช้อ้างอิง

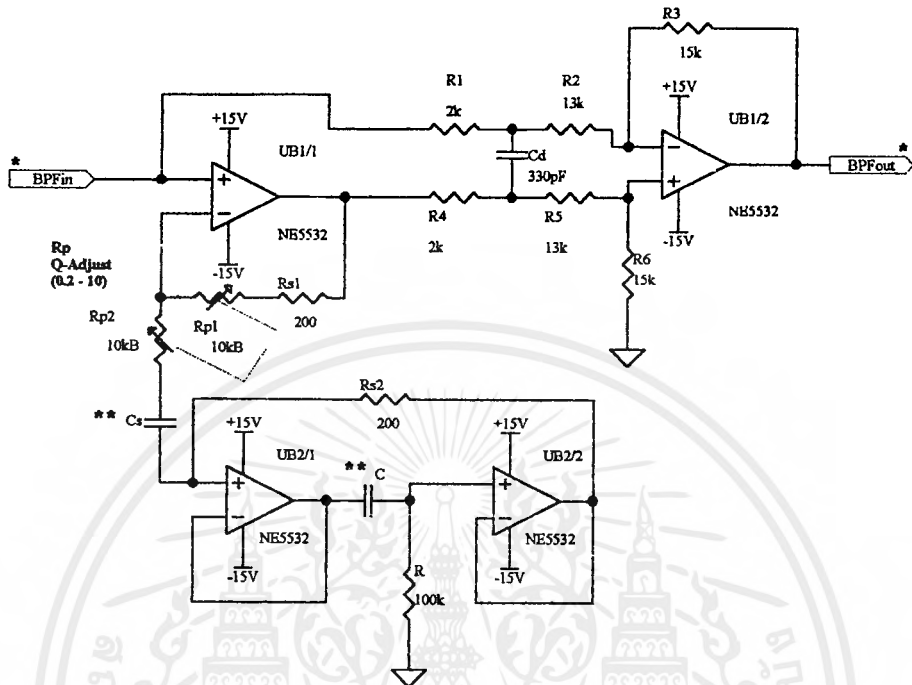
1. <http://www.ti.com/sc/docs/psheets/abstract/apps/sloa020.htm> ; Compensation technique of voltage-feedback op amps.
2. <http://www.ti.com/sc/docs/products/analog/ne5534a.htm> ; NE5534A Data Sheet.
3. <http://www.ti.com/sc/docs/products/analog/ne5532a.htm> ; NE5532A Data Sheet.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title			Boost&Cut Section.		
Size	Number	Revision			
A4	1_1				
Date:	5-Apr-2000	Sheet of			
File:	C:\PFW\SCH\BOOST1.SCH	Drawn By:			



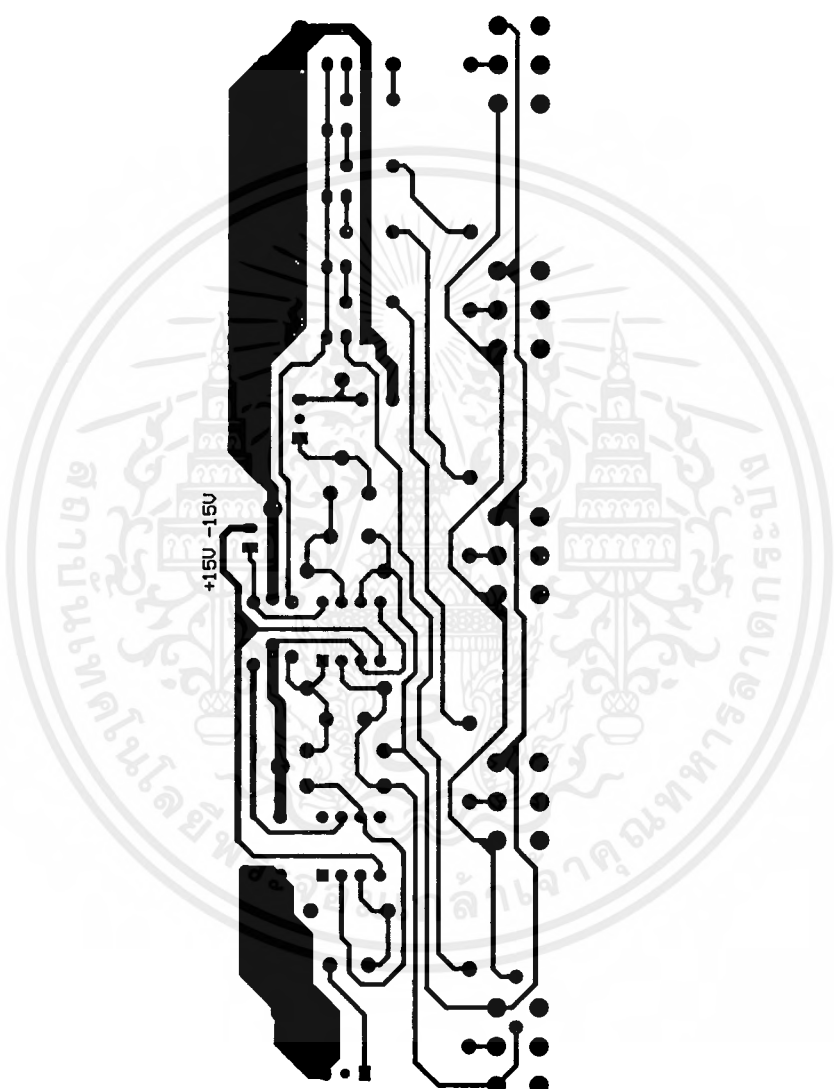
Note

- BPFIn = BPFIn1 to BPFIn5
- BPFOut = BPFOut1 to BPFOut5

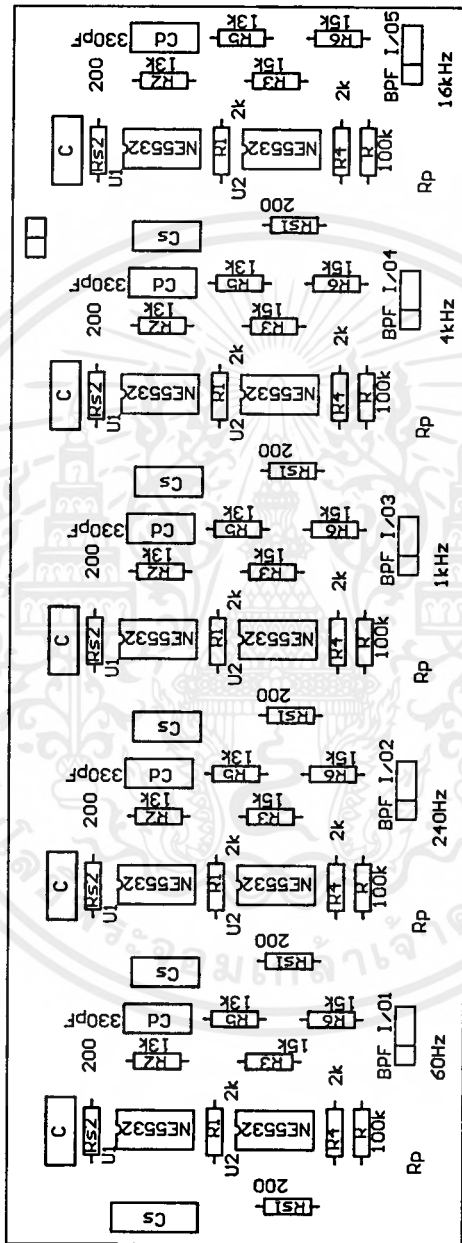
**

Freq.	C	Cs
60Hz	0.27u	1.2u
240Hz	0.068u	0.33u
1kHz	0.015u	0.082u
4kHz	0.0039u	0.02u
16kHz	0.001u	0.0047u

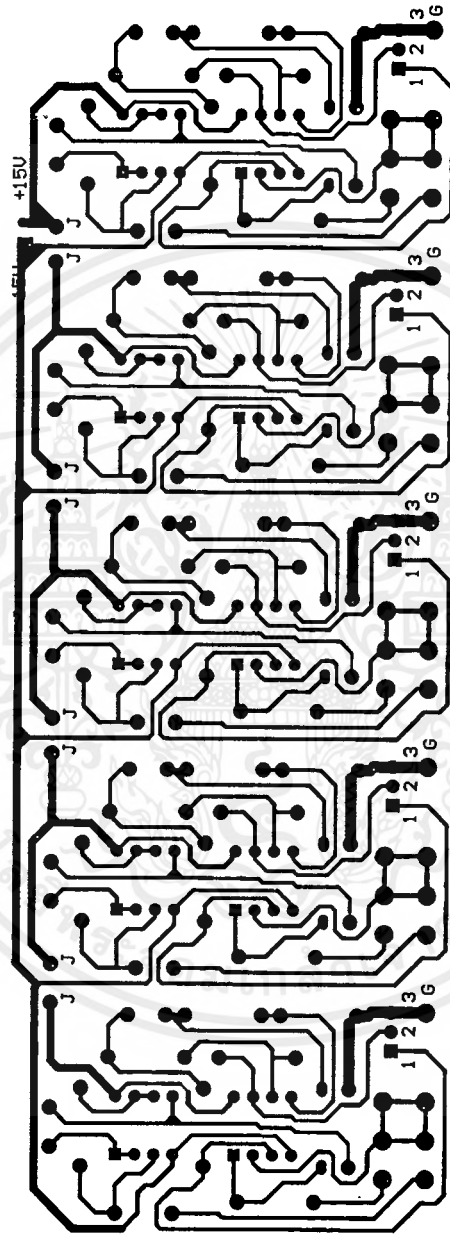
Title		
BPF Section		
Size	Number	Revision
A4	1_3	
Date:	5-Apr-2000	Sheet of
File:	C:\ENGINEER\PFWSCH\BPF.SCH	Drawn By:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมประกอบ Phase sensitivity ของ Simulated Inductor แบบที่ 2 (แบบที่ 2)

```
%*****  
% Phase sensitivity for simulated inductor type 2 *  
%*****  
  
f=0:10:20e3;  
w=2*pi.*f;  
G=1/10e3;    %Using 10k Ohms for all resistor  
C=0.001e-6;  %Using 0.001uF for all capacitor  
SG1=-1;  
SG2=(w*C*G)/(G^2+(w*C).^2);  
SG5=-(w*C*G)/(G^2+(w*C).^2);  
SC3=(w*C*G)/(G^2+(w*C).^2);  
SC4=-(w*C*G)/(G^2+(w*C).^2);  
semilogx(f,SG1,f,SG2,f,SG5,f,SC3,f,SC4)  
gtext('G1');  
gtext('G2');  
gtext('G5');  
gtext('C3');  
gtext('C4');  
xlabel('Freq.(Hz)');  
ylabel('Phase Sensitivity of Zin(s)');  
grid;
```

โปรแกรมประกอบ Magnitude Sensitivity (บทที่ 3)

```
%***** Magnitude Sensitivity of H(jw) at fp=60Hz*****  
f=[20:1:20e3];  
w=2*pi.*f;  
C=0.27e-6;  
Cs=1.2e-6;  
R=100e3;  
Rs2=200;  
Rp2=10e3;  
sen_rp2=(-Cs^2*Rp2*(Rs2+Rp2).*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_rs2=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs^2*Rp2*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+  
(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_r=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*  
(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_c=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*  
(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_cs=(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);  
gtext('Rp2');  
gtext('Rs2');  
gtext('R');  
gtext('C');  
gtext('Cs');  
xlabel('Frequency.(Hz)');  
ylabel('Magnitude Sensitivity of H(jw)');  
grid;
```

```

%***** Magnitude Sensitivity of H(jw) at fp=240Hz*****
f=[20:1:20e3];
w=2*pi.*f;
C=0.068e-6;
Cs=0.33e-6;
R=100e3;
Rs2=200;
Rp2=10e3;
sen_rp2=-(Cs^2*Rp2*(Rs2+Rp2).*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_rs2=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs^2*Rp2*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+
(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_r=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*
(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_c=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*
(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_cs=(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);
gtext('Rp2');
gtext('Rs2');
gtext('R');
gtext('C');
gtext('Cs');
xlabel('Frequency.(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity of H(jw)');
grid;

```

%***** Magnitude Sensitivity of H(jw) at fp=1kHz*****

f=[20:1:20e3];

w=2*pi.*f;

C=0.015e-6;

Cs=0.082e-6;

R=100e3;

Rs2=200;

Rp2=10e3;

sen_rp2=-(Cs^2*Rp2*(Rs2+Rp2).*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_rs2=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs^2*Rp2*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_r=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_c=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_cs=(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);

gtéxt('Rp2');

gtext('Rs2');

gtext('R');

gtext('C');

gtext('Cs');

xlabel('Frequency.(Hz)');

ylabel('Magnitude Sensitivity of H(jw)');

grid;

```

%***** Magnitude Sensitivity of H(jw) at fp=4kHz*****
f=[20:1:20e3];
w=2*pi.*f;
C=0.0039e-6;
Cs=0.02e-6;
R=100e3;
Rs2=200;
Rp2=10e3;
sen_rp2=-(Cs^2*Rp2*(Rs2+Rp2).*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_rs2=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs^2*Rp2*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+
(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_r=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*
(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_c=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*
(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_cs=(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);
gtext('Rp2');
gtext('Rs2');
gtext('R');
gtext('C');
gtext('Cs');
xlabel('Frequency.(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity of H(jw)');
grid;

```

```

%***** Magnitude Sensitivity of H(jw) at fp=16kHz*****
f=[20:1:20e3];
w=2*pi.*f;
C=0.001e-6;
Cs=0.0047e-6;
R=100e3;
Rs2=200;
Rp2=10e3;
sen_rp2=-(Cs^2*Rp2*(Rs2+Rp2).*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_rs2=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs^2*Rp2*(Rp2+Rs2).*w.^2))/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_r=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_c=(-1)+((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)+(Cs*(Rp2+Rs2).*w).^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_cs=(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);
gtext('Rp2');
gtext('Rs2');
gtext('R');
gtext('C');
gtext('Cs');
xlabel('Frequency.(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity of H(jw)');
grid;

```

โปรแกรมประกอบ Phase Sensitivity (บทที่ 3)

```
%***** Phase Sensitivity of H(jw) at fp=60Hz *****  
f=[20:1:20e3];  
w=2*pi.*f;  
C=0.27e-6;  
Cs=1.2e-6;  
R=100e3;  
Rs2=200;  
Rp2=10e3;  
sen_rp2=(Rp2.*Cs.*(R*Rs2*C*Cs.*w.^2-1).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_rs2=((Rp2.*(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)-Rp2-Rs2)*Cs.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_r=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_c=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
sen_cs=-(Cs*(Rp2+Rs2).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);  
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);  
gtext('Rp2');  
gtext('Rs2');  
gtext('R');  
gtext('C');  
gtext('Cs');  
xlabel('Frequency.(Hz)');  
ylabel('Phase Sensitivity of H(jw)');  
grid;
```

%***** Phase Sensitivity of H(jw) at fp=240Hz *****

f=[20:1:20e3];

w=2*pi.*f;

C=0.068e-6;

Cs=0.33e-6;

R=100e3;

Rs2=200;

Rp2=10e3;

sen_rp2=(Rp2.*Cs.*(R*Rs2*C*Cs.*w.^2-1).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_rs2=((Rp2.*(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)-Rp2-Rs2)*Cs.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_r=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_c=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_cs=-((Cs*(Rp2+Rs2).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);

gtext('Rp2');

gtext('Rs2');

gtext('R');

gtext('C');

gtext('Cs');

xlabel('Frequency.(Hz)');

ylabel('Phase Sensitivity of H(jw)');

grid;

```

%***** Phase Sensitivity of H(jw) at fp=1kHz *****
f=[20:1:20e3];
w=2*pi.*f;
C=0.015e-6;
Cs=0.082e-6;
R=100e3;
Rs2=200;
Rp2=10e3;
sen_rp2=(Rp2.*Cs.*(R*Rs2*C*Cs.*w.^2-1).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_rs2=((Rp2.*(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)-Rp2-Rs2)*Cs.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_r=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_c=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_cs=-(Cs*(Rp2+Rs2).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);
gtext('Rp2');
gtext('Rs2');
gtext('R');
gtext('C');
gtext('Cs');
xlabel('Frequency.(Hz)');
ylabel('Phase Sensitivity of H(jw)');
grid;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%***** Phase Sensitivity of H(jw) at fp=4kHz *****

f=[20:1:20e3];

w=2*pi.*f;

C=0.0039e-6;

Cs=0.02e-6;

R=100e3;

Rs2=200;

Rp2=10e3;

sen_rp2=(Rp2.*Cs.*(R*Rs2*C*Cs.*w.^2-1).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_rs2=((Rp2.*(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)-Rp2-Rs2)*Cs.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_r=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_c=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

sen_cs=-(Cs*(Rp2+Rs2).*w)/((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);

semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);

gtext('Rp2');

gtext('Rs2');

gtext('R');

gtext('C');

gtext('Cs');

xlabel('Frequency.(Hz)');

ylabel('Phase Sensitivity of H(jw)');

grid;

```

%***** Phase Sensitivity of H(jw) at fp=16kHz *****
f=[20:1:20e3];
w=2*pi.*f;
C=0.001e-6;
Cs=0.0047e-6;
R=100e3;
Rs2=200;
Rp2=10e3;
sen_rp2=(Rp2.*Cs.*(R*Rs2*C*Cs.*w.^2-1).*w)/(((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_rs2=((Rp2.*(1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2)-Rp2-Rs2)*Cs.*w)/(((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_r=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/(((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_c=-((R*Rs2*C*Cs.^2*(Rp2+Rs2)).*w.^2.*w)/(((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
sen_cs=-(Cs*(Rp2+Rs2).*w)/(((1-R*Rs2*C*Cs.*w.^2).^2+(Cs*(Rs2+Rp2).*w).^2);
semilogx(f, sen_rp2, f, sen_rs2, f, sen_r, f, sen_c, f, sen_cs);
gtext('Rp2');
gtext('Rs2');
gtext('R');
gtext('C');
gtext('Cs');
xlabel('Frequency.(Hz)');
ylabel('Phase Sensitivity of H(jw)');
grid;

```

โปรแกรมประกอบ Boost Response (บทที่ 3)

%***** Boost function response at fp=60Hz *****

%*****Define value of elements*****

f=[20:1:20e3];

w=2*pi.*f;

C=0.27e-6;

Cs=1.2e-6;

R=100e3;

Rp2=10e3;

Rs2=200;

Rf4=12e3;

Ri=4e3;

%*****

%*****Magnitude function*****

wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));

wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)

wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)

a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri.^2;

b=(wb1.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;

c=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2;

d=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri.^2;

e=(wb2.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;

g=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2;

%*****

```

%*****Phase function*****
%*****Q-Minimum*****
h=(wb1.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);

j=(wb2.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
%*****

subplot(2,1,1);
%*****Response of boost function*****
%*****Q-Minimum*****
Hb1=(sqrt(a+b))./c;
HbdB1=20*log10(Hb1);
%*****

%*****Response of boost function*****
%*****Q-Maximum*****
Hb2=(sqrt(d+e))./g;
HbdB2=20*log10(Hb2);
%*****

semilogx(f,HbdB1,f,HbdB2);
ylabel('Magnitude(dB)');
gtext('Qmax');
gtext('Qmin');
grid;

subplot(2,1,2);
%***Phase Response of boost function***
%*****Q-Minimum*****
Pb1=atan(h)-atan(i);
%*****

```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pb2=atan(j)-atan(k);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pb1,f,180/pi.*Pb2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%***** Boost function response at fp=240Hz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.068e-6;
```

```
Cs=0.33e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf4=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w.^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2;
```

```
d=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w.^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2;
```

```
%*****
```

```
%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf4+Ri))./(wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);
```

```
j=(wb2.*w*(Rf4+Ri))./(wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
```

```
%*****
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
%*****Response of boost function*****
```

```
%*****(Q-Minimum)*****
```

```
Hb1=(sqrt(a+b))./c;
```

```
HbdB1=20*log10(Hb1);
```

```
%*****
```

```
%*****Response of boost function*****
```

```
%*****(Q-Maximum)*****
```

```
Hb2=(sqrt(d+e))./g;
```

```
HbdB2=20*log10(Hb2);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,HbdB1,f,HbdB2);
```

```
ylabel('Magnitude(dB)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%*****(Q-Minimum)*****
```

```
Pb1=atan(h)-atan(i);
```

```
%*****
```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pb2=atan(j)-atan(k);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pb1,f,180/pi.*Pb2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%***** Boost function response at fp=1kHz *****

%*****Define value of elements*****

f=[20:100:20e3];

w=2*pi.*f;

C=0.015e-6;

Cs=0.082e-6;

R=100e3;

Rp2=10e3;

Rs2=200;

Rf4=12e3;

Ri=4e3;

%*****

%*****Magnitude function*****

wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));

wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)

wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)

a=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;

b=(wb1.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;

c=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2);

d=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;

e=(wb2.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;

g=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2);

%*****

```

%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);

j=(wb2.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
%*****

subplot(2,1,1);
%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Minimum)*****
Hb1=(sqrt(a+b))./c;
HbdB1=20*log10(Hb1);
%*****

%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Maximum)*****
Hb2=(sqrt(d+e))./g;
HbdB2=20*log10(Hb2);
%*****

semilogx(f,HbdB1,f,HbdB2);
ylabel('Magnitude(dB)');
gtext('Qmax');
gtext('Qmin');
grid;
subplot(2,1,2);
%***Phase Response of boost function***
%*****(Q-Minimum)*****
Pb1=atan(h)-atan(i);
%*****

```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pb2=atan(j)-atan(k);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pb1,f,180/pi.*Pb2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%***** Boost function response at fp=4kHz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.0039e-6;
```

```
Cs=0.02e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf4=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2);
```

```
d=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2);
```

```
%*****
```

```

%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);

j=(wb2.*w*(Rf4+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
%*****

subplot(2,1,1);
%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Minimum)*****
Hb1=(sqrt(a+b))./c;
HbdB1=20*log10(Hb1);
%*****

%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Maximum)*****
Hb2=(sqrt(d+e))./g;
HbdB2=20*log10(Hb2);
%*****

semilogx(f,HbdB1,f,HbdB2);
ylabel('Magnitude(dB)');
gtext('Qmax');
gtext('Qmin');
grid;

subplot(2,1,2);

```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%***** (Q-Minimum)*****
```

```
Pb1=atan(h)-atan(i);
```

```
%*****
```

```
%***Phase Response of boost funcuon***
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pb2=atan(j)-atan(k);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f, 180/pi.*Pb1,f, 180/pi.*Pb2);
```

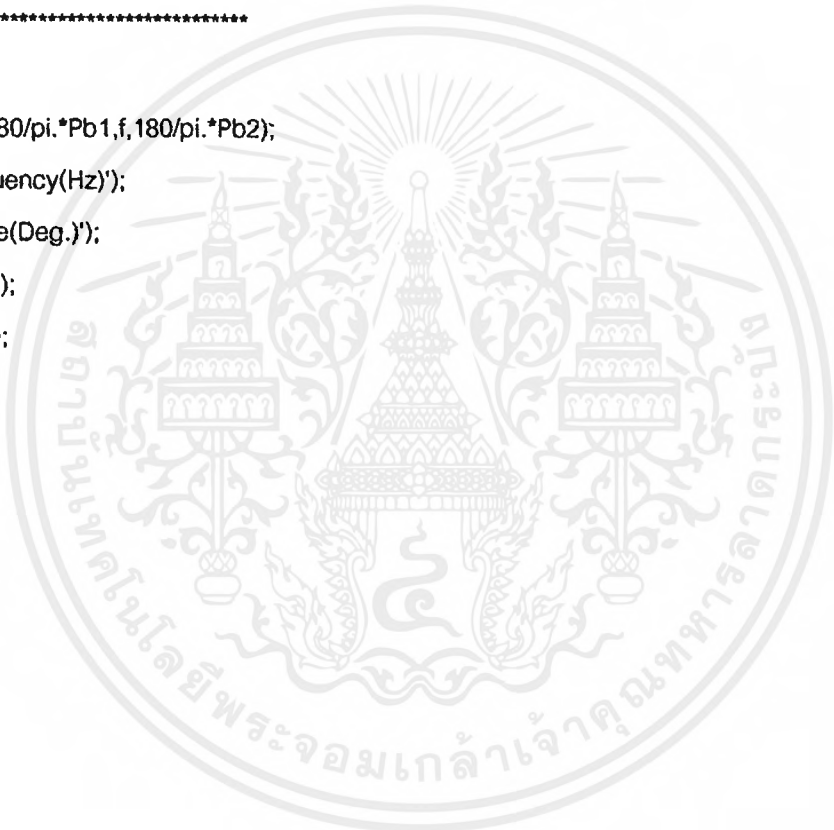
```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%***** Boost function response at fp=16kHz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.001e-6;
```

```
Cs=0.0047e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf4=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2);
```

```
d=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf4+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf4*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2);
```

```
%*****
```

```

%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf4+Ri))./(wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);
j=(wb2.*w*(Rf4+Ri))./(wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
%*****

subplot(2,1,1);
%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Minimum)*****
Hb1=(sqrt(a+b))./c;
HbdB1=20*log10(Hb1);
%*****

%*****Response of boost function*****
%*****(Q-Maximum)*****
Hb2=(sqrt(d+e))./g;
HbdB2=20*log10(Hb2);
%*****

semilogx(f,HbdB1,f,HbdB2);
ylabel('Magnitude(dB)');
gtext('Qmax');
gtext('Qmin');
grid;

subplot(2,1,2);
%***Phase Response of boost function***
%*****(Q-Minimum)*****
Pb1=atan(h)-atan(i);
%*****

```

```
%***Phase Response of boost function***
```

```
%*****Q-Maximum*****
```

```
Pb2=atan(j)-atan(k);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pb1,f,180/pi.*Pb2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



โปรแกรมประกอบ Cut Response (บทที่ 3)

```
%***** cut function response at fp=60Hz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.27e-6;
```

```
Cs=1.2e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf2=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2;
```

```
d=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2;
```

```
%*****
```

```

%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)/(wp^2-w.^2);

j=(wb2.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)/(wp^2-w.^2);
%*****

subplot(2,1,1);
%*****Response of cut function*****
%*****(Q-Minimum)*****
Hc1=c./(sqrt(a+b));
HcdB1=20*log10(Hc1);
%*****

%*****Response of cut function*****
%*****(Q-Maximum)*****
Hc2=g./(sqrt(d+e));
HcdB2=20*log10(Hc2);
%*****

semilogx(f,HcdB1,f,HcdB2);
ylabel('Magnitude(dB)');
gtext('Qmax');
gtext('Qmin');
grid;

subplot(2,1,2);

```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Minimum)*****
```

```
Pc1=atan(i)-atan(h);
```

```
%*****
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pc2=atan(k)-atan(j);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pc1,f,180/pi.*Pc2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



```
%***** cut function response at fp=240Hz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.068e-6;
```

```
Cs=0.33e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf2=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w.*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*Ri.*w).^2);
```

```
d=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w.*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=(((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*Ri.*w).^2);
```

```
%*****
```

```
%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)/(wp^2-w.^2);
```

```
j=(wb2.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)/(wp^2-w.^2);
```

```
%*****
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%*****(Q-Minimum)*****
```

```
Hc1=c./sqrt(a+b);
```

```
HcdB1=20*log10(Hc1);
```

```
%*****
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%*****(Q-Maximum)*****
```

```
Hc2=g./sqrt(d+e);
```

```
HcdB2=20*log10(Hc2);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,HcdB1,f,HcdB2);
```

```
ylabel('Magnitude(dB)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Minimum)*****
```

```
Pc1=atan(i)-atan(h);
```

```
%*****
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pc2=atan(k)-atan(j);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pc1,f,180/pi.*Pc2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



```
%***** cut function response at fp=1kHz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.015e-6;
```

```
Cs=0.082e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf2=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c((((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2);
```

```
d((((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g((((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2);
```

```
%*****
```

```
%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)/(wp^2-w.^2);
```

```
j=(wb2.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)/(wp^2-w.^2);
```

```
%*****
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%*****(Q-Minimum)*****
```

```
Hc1=c./sqrt(a+b);
```

```
HcdB1=20*log10(Hc1);
```

```
%*****
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%*****(Q-Maximum)*****
```

```
Hc2=g./sqrt(d+e);
```

```
HcdB2=20*log10(Hc2);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,HcdB1,f,HcdB2);
```

```
ylabel('Magnitude(dB)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Minimum)*****
```

```
Pc1=atan(i)-atan(h);
```

```
%*****
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Maximum)*****
```

```
Pc2=atan(k)-atan(j);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pc1,f,180/pi.*Pc2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



```
%***** cut function response at fp=4kHz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.0039e-6;
```

```
Cs=0.02e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf2=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*Ri.*w).^2;
```

```
d=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri).^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*Ri.*w).^2;
```

```
%*****
```

```
%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)/(wp^2-w.^2);
```

```
j=(wb2.*w*(Rf2+Ri))/((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)/(wp^2-w.^2);
%*****
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
%*****Response of cut function*****
%*****(Q-Minimum)*****
Hc1=c./sqrt(a+b);
HcdB1=20*log10(Hc1);
%*****
```

```
%*****Response of cut function*****
%*****(Q-Maximum)*****
Hc2=g./sqrt(d+e);
HcdB2=20*log10(Hc2);
%*****
```

```
semilogx(f,HcdB1,f,HcdB2);
```

```
ylabel('Magnitude(dB)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%******(Q-Minimum)*****
```

```
Pc1=atan(i)-atan(h);
```

```
%*****
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%******(Q-Maximum)*****
```

```
Pc2=atan(k)-atan(j);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pc1,f,180/pi.*Pc2);
```

```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```



```
%***** cut function response at fp=16kHz *****
```

```
%*****Define value of elements*****
```

```
f=[20:1:20e3];
```

```
w=2*pi.*f;
```

```
C=0.001e-6;
```

```
Cs=0.0047e-6;
```

```
R=100e3;
```

```
Rp2=10e3;
```

```
Rs2=200;
```

```
Rf2=12e3;
```

```
Ri=4e3;
```

```
%*****
```

```
%*****Magnitude function*****
```

```
wp=1/(sqrt(R*Rs2*C*Cs));
```

```
wb1=(Rp2+Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 max.(Q - min.)
```

```
wb2=(Rs2)/(R*Rs2*C);%Rp2 min.(Q - max.)
```

```
a=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri.^2;
```

```
b=(wb1.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
c=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb1*Ri.*w).^2;
```

```
d=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2.*w).^2*(Rf2+Ri)*Ri.^2;
```

```
e=(wb2.*w*Rf2*Ri.*(wp^2-w.^2)).^2;
```

```
g=((wp^2-w.^2).*Ri).^2+(wb2*Ri.*w).^2;
```

```
%*****
```

```
%*****Phase function*****
%*****(Q-Minimum)*****
h=(wb1.*w*(Rf2+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
i=(wb1.*w)./(wp^2-w.^2);
```

```
j=(wb2.*w*(Rf2+Ri))./((wp^2-w.^2).*Ri);
k=(wb2.*w)./(wp^2-w.^2);
```

```
%*****
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%***** (Q-Minimum) *****
```

```
Hc1=c./sqrt(a+b);
```

```
HcdB1=20*log10(Hc1);
```

```
%*****
```

```
%*****Response of cut function*****
```

```
%***** (Q-Maximum) *****
```

```
Hc2=g./sqrt(d+e);
```

```
HcdB2=20*log10(Hc2);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,HcdB1,f,HcdB2);
```

```
ylabel('Magnitude(dB)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Minimum) *****
```

```
Pc1=atan(i)-atan(h);
```

```
%*****
```

```
%****Phase Response of cut function****
```

```
%***** (Q-Maximum) *****
```

```
Pc2=atan(k)-atan(j);
```

```
%*****
```

```
semilogx(f,180/pi.*Pc1,f,180/pi.*Pc2);
```

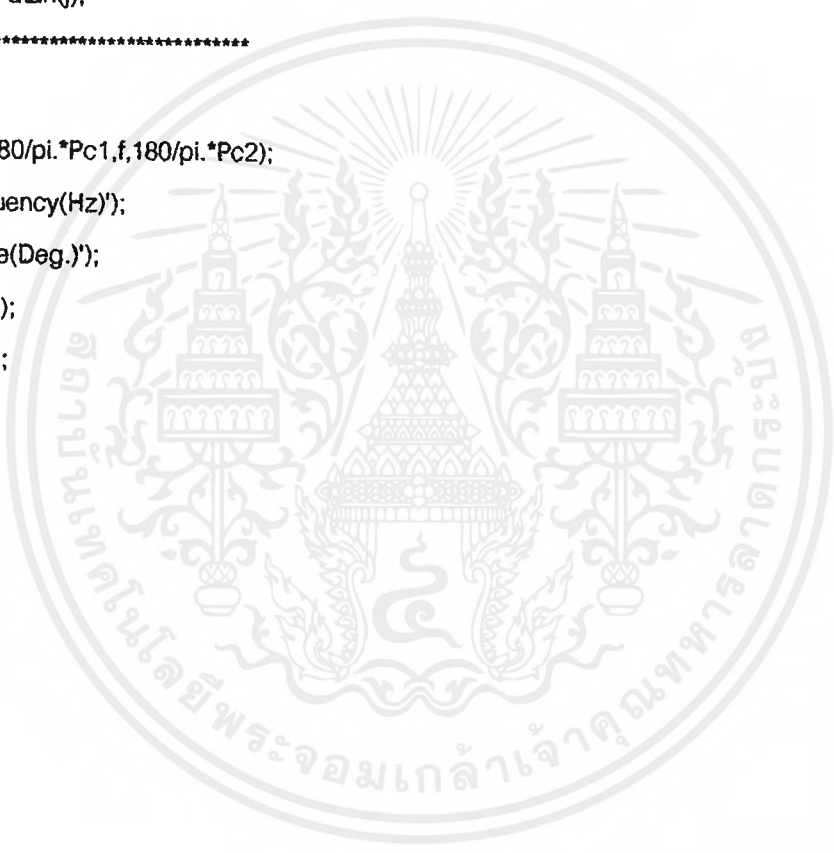
```
xlabel('Frequency(Hz)');
```

```
ylabel('Phase(Deg.)');
```

```
gtext('Qmax');
```

```
gtext('Qmin');
```

```
grid;
```





ภาคผนวก ค

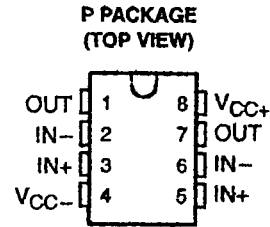
รายละเอียดของตัวอุปกรณ์ (Data Sheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5532, NE5532A, NE5532I, NE5532AI DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS075A – NOVEMBER 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

- Equivalent Input Noise Voltage
5 $\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ Typ at 1 kHz
- Unity-Gain Bandwidth . . . 10 MHz Typ
- Common-Mode Rejection Ratio
100 dB Typ
- High DC Voltage Gain . . . 100 V/mV Typ
- Peak-to-Peak Output Voltage Swing
32 V Typ With $V_{CC\pm} = \pm 18$ V and
 $R_L = 600 \Omega$
- High Slew Rate . . . 9 V/ μs Typ
- Wide Supply Voltage Range . . . ± 3 V
to ± 20 V
- Designed to Be Interchangeable With
Signetics NE5532 and NE5532A



description

The NE5532 and NE5532A are monolithic high-performance operational amplifiers combining excellent dc and ac characteristics. They feature very low noise, high output drive capability, high unity-gain and maximum-output-swing bandwidths, low distortion, high slew rate, input-protection diodes, and output short-circuit protection. These operational amplifiers are internally compensated for unity-gain operation. The NE5532A has specified maximum limits for equivalent input noise voltage.

The NE5532 and NE5532A are characterized for operation from 0°C to 70°C. The NE5532I and NE5532AI are characterized for operation from -40°C to 85°C.

symbol (each amplifier)



PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1990, Texas Instruments Incorporated

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

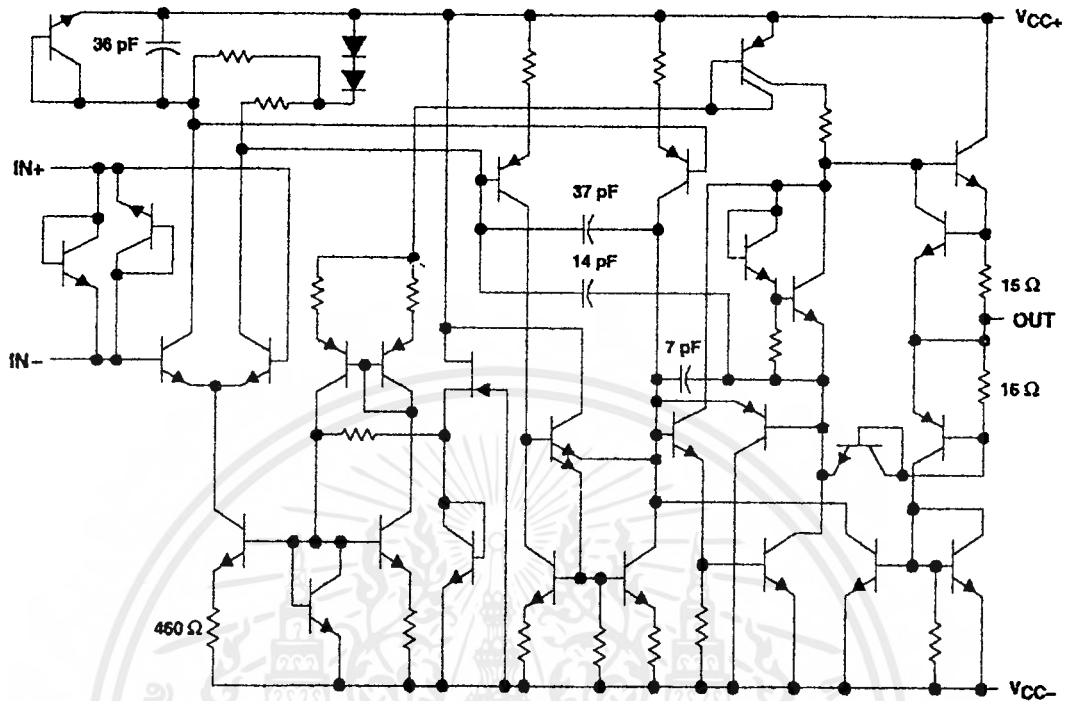
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5532, NE5532A, NE5532I, NE5532AI DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS075A – NOVEMBER 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

schematic (each amplifier)



Component values shown are nominal.

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC+} (see Note 1)	22 V
Supply voltage, V_{CC-} (see Note 1)	-22 V
Input voltage, either input (see Notes 1 and 2)	$V_{CC\pm}$
Input current (see Note 3)	± 10 mA
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited
Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table
Operating free-air temperature range: NE5532, NE5532A	0°C to 70°C
NE5532I, NE5532AI	-40°C to 85°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

- NOTES:
- All voltage values, except differential voltages, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
 - The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage.
 - Excessive input current will flow if a differential input voltage in excess of approximately 0.6 V is applied between the inputs unless some limiting resistance is used.
 - The output may be shorted to ground or either power supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure the maximum dissipation rating is not exceeded.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	OPERATING FACTOR ABOVE $T_A = 25^\circ\text{C}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 85^\circ\text{C}$ POWER RATING
P	1000 mW	8 mW/°C	640 mW	520 mW

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75285

NE5532, NE5532A, NE5532I, NE5532AI DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS075A - NOVEMBER 1979 - REVISED SEPTEMBER 1990

recommended operating conditions

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage, V_{CC+}	5		15	V
Supply voltage, V_{CC-}	-5		-15	V

electrical characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.5	4	mV
		$T_A = \text{Full range}$			5	
I_{IO} Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			10	150	nA
	$T_A = \text{Full range}$				200	
I_{IB} Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			200	800	nA
	$T_A = \text{Full range}$				1000	
V_{ICR} Common-mode input voltage range			± 12	± 13		V
V_{OPP} Maximum peak-to-peak output voltage swing	$R_L \geq 600 \Omega$	$V_{CC\pm} = \pm 15$ V	24	26		V
		$V_{CC\pm} = \pm 18$ V	30	32		
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 600 \Omega$, $V_O = \pm 10$ V	$T_A = 25^\circ\text{C}$	15	50		V/mV
		$T_A = \text{Full range}$	10			
	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$, $V_O = \pm 10$ V	$T_A = 25^\circ\text{C}$	25	100		
		$T_A = \text{Full range}$	15			
A_{vd} Small-signal differential voltage amplification	$f = 10 \text{ kHz}$			2.2		V/mV
B_{OM} Maximum-output-swing bandwidth	$R_L = 600 \Omega$	$V_O = \pm 10$ V	140			kHz
		$V_{CC\pm} = \pm 18$ V, $V_O = \pm 14$ V	100			
B_1 Unity-gain bandwidth	$R_L = 600 \Omega$	$C_L = 100 \text{ pF}$	10			MHz
r_i Input resistance			30	300		k Ω
z_o Output impedance	$A_{VD} = 30 \text{ dB}$, $R_L = 600 \Omega$, $f = 10 \text{ kHz}$		0.3			Ω
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR \text{ min}}$		70	100		dB
k_{SVR} Supply voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC\pm} = \pm 9$ V to ± 15 V, $V_O = 0$		80	100		dB
I_{OS} Output short-circuit current			38			mA
I_{CC} Total supply current	$V_O = 0$, No load		8	16		mA
	Crosstalk attenuation (V_{O1}/V_{O2})		110			
	$V_{O1} = 10$ V peak, $f = 1 \text{ kHz}$					dB

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Full range for T_A is 0°C to 70°C for NE5532/NE5532A and -40°C to 85°C for NE5532I/NE5532AI.

operating characteristics, $V_{CC\pm} = \pm 15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE5532/NE5532I			NE5532A/NE5532AI			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
SR Slew rate at unity gain			9		9		V/ μs	
Overshoot factor	$V_I = 100 \text{ mV}$, $R_L = 600 \Omega$, $A_{VD} = 1$, $C_L = 100 \text{ pF}$		10%		10%			
V_n Equivalent input noise voltage	$f = 30 \text{ Hz}$		8		8	10	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
	$f = 1 \text{ kHz}$		5		5	6		
I_n Equivalent input noise current	$f = 30 \text{ Hz}$		2.7		2.7		pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
	$f = 1 \text{ kHz}$		0.7		0.7			

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5534, NE5534A, SE5534, SE5534A LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS070 – JULY 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

- Equivalent Input Noise Voltage
3.5 nV/√Hz
- Unity-Gain Bandwidth . . . 10 MHz Typ
- Common-Mode Rejection Ratio
100 dB Typ
- High DC Voltage Gain . . . 100 V/mV Typ
- Peak-to-Peak Output Voltage Swing
32 V Typ With $V_{CC\pm} = \pm 18$ V and $R_L = 600 \Omega$
- High Slew Rate . . . 13 V/μs Typ
- Wide Supply Voltage Range ± 3 V to ± 20 V
- Low Harmonic Distortion
- Designed to Be Interchangeable With
Signetics NE5534, NE5534A, SE5534,
and SE5534A

description

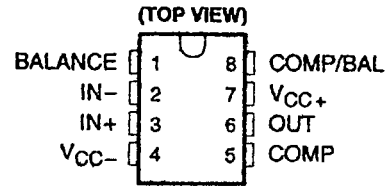
The NE5534, NE5534A, SE5534, and SE5534A are monolithic high-performance operational amplifiers combining excellent dc and ac characteristics. Some of the features include very low noise, high output drive capability, high unity-gain and maximum-output-swing bandwidths, low distortion, and high slew rate.

These operational amplifiers are internally compensated for a gain equal to or greater than three. Optimization of the frequency response for various applications can be obtained by use of an external compensation capacitor between COMP and COMP/BAL. The devices feature input-protection diodes, output short-circuit protection, and offset-voltage nulling capability.

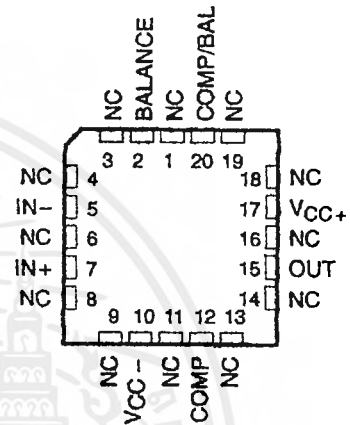
For the NE5534A, a maximum limit is specified for equivalent input noise voltage.

The NE5534 and NE5534A are characterized for operation from 0°C to 70°C. The SE5534 and SE5534A are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C.

NE5534, NE5534A . . . D OR P PACKAGE
SE5534, SE5534A . . . JG PACKAGE

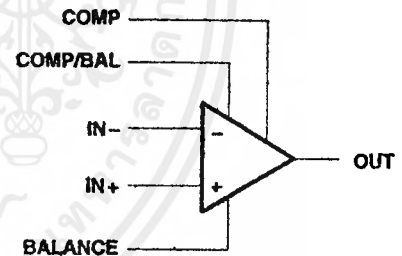


SE5534, SE5534A . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

symbol



SE5534A FROM TI NOT RECOMMENDED
FOR NEW DESIGNS

AVAILABLE OPTIONS

T _A	V _{IO} max AT 25°C	PACKAGE			
		SMALL OUTLINE (D)	CERAMIC (FK)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (P)
0°C to 70°C	4 mV	NE5534D NE5534AD	— —	— —	NE5534P NE5534AP
-55°C to 125°C	2 mV	— —	SE5534FK SE5534AFK	SE5534JG SE5534AJG	— —

The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., NE5534DR).

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

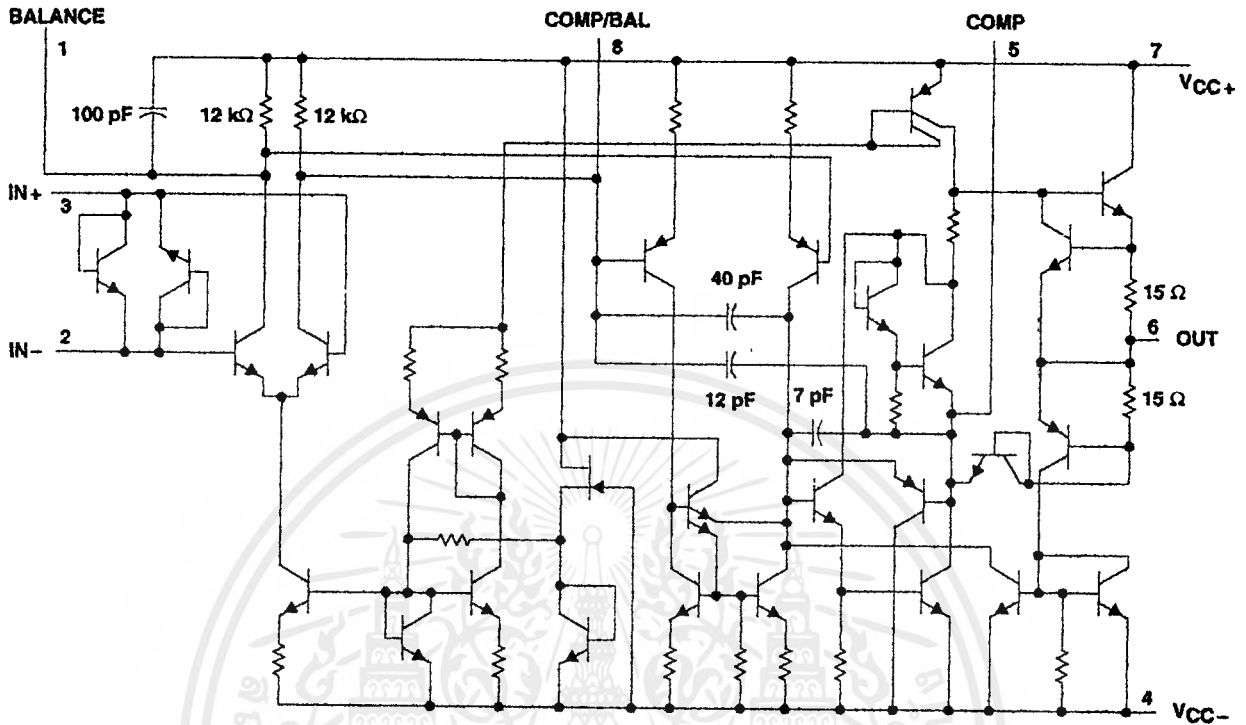
Copyright © 1990, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5534, NE5534A, SE5534, SE5534A LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS070 – JULY 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

schematic



All component values shown are nominal.
Pin numbers shown are for D, JG, and P packages.

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, V_{CC+} (see Note 1)	22 V
Supply voltage, V_{CC-} (see Note 1)	-22 V
Input voltage either input (see Notes 1 and 2)	V_{CC+}
Input current (see Note 3)	± 10 mA
Duration of output short circuit (see Note 4)	unlimited
Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table
Operating free-air temperature range:	
NE5534, NE5534A	0°C to 70°C
SE5534, SE5534A	-55°C to 125°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Case temperature for 60 seconds: FK package	260°C
Lead temperature range 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds: JG package	300°C
Lead temperature range 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds: D or P package	260°C

- NOTES: 1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage.
3. Excessive current will flow if a differential input voltage in excess of approximately 0.6 V is applied between the inputs unless some limiting resistance is used.
4. The output may be shorted to ground or to either power supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure the maximum dissipation rating is not exceeded.

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

NE5534, NE5534A, SE5534, SE5534A LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS070 – JULY 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR ABOVE $T_A = 25^\circ\text{C}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	725 mW	5.8 mW/°C	464 mW	N/A
FK (see Note 5)	1375 mW	11.0 mW/°C	880 mW	275 mW
JG	1050 mW	8.4 mW/°C	672 mW	210 mW
P	1000 mW	8.0 mW/°C	640 mW	N/A

NOTE 5: For the FK package, power rating and derating factor will vary with actual mounting technique used. The values stated here are believed to be conservative.

recommended operating conditions

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage, V_{CC+}	5		15	V
Supply voltage, V_{CC-}	-5		-15	V

electrical characteristics, $V_{CC} \pm = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†		NE5534, NE5534A			SE5534, SE5534A			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.5	4		0.5	2	mV	
		$T_A = \text{Full range}$			5		3		
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	20	300		10	200	nA	
		$T_A = \text{Full range}$			400		500		
I_{IB} Input bias current	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	500	1500		400	800	nA	
		$T_A = \text{Full range}$			2000		1500		
V_{ICR} Common-mode input voltage range			± 12	± 13		± 12	± 13	V	
$V_{O(PP)}$ Maximum peak-to-peak output voltage swing	$R_L \geq 600\ \Omega$	$V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$	24	26		24	26	V	
		$V_{CC\pm} = \pm 18\text{ V}$	30	32		30	32		
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10\text{ V}$, $R_L \geq 600\ \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	25	100		50	100	V/mV	
		$T_A = \text{Full range}$	15			25			
A_{vd} Small-signal differential voltage amplification	$f = 10\text{ kHz}$	$C_C = 0$		6		6		V/mV	
		$C_C = 22\text{ pF}$		2.2		2.2			
B_{OM} Maximum-output-swing bandwidth	$V_O = \pm 10\text{ V}$, $C_C = 0$			200		200		kHz	
	$V_O = \pm 10\text{ V}$, $C_C = 22\text{ pF}$			95		95			
	$V_{CC\pm} = \pm 18\text{ V}$, $R_L \geq 600\ \Omega$, $C_C = 22\text{ pF}$	$V_O = \pm 14\text{ V}$, $C_C = 22\text{ pF}$		70		70			
B_1 Unity-gain bandwidth	$C_C = 22\text{ pF}$, $C_L = 100\text{ pF}$		10			10		MHz	
r_i Input resistance			30	100		50	100	k Ω	
Z_o Output impedance	$A_{VD} = 30\text{ dB}$, $C_C = 22\text{ pF}$, $f = 10\text{ kHz}$	$R_L \geq 600\ \Omega$, $f = 10\text{ kHz}$		0.3		0.3		Ω	
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_O = 0$, $R_S = 50\ \Omega$	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	70	100		80	100	dB	
k_{SVR} Supply voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC+} = \pm 9\text{ V to } \pm 15\text{ V}$, $V_O = 0$	$R_S = 50\ \Omega$	80	100		86	100	dB	
I_{OS} Output short-circuit current				38		38		mA	
I_{CC} Supply current	$V_O = 0$, No load	$T_A = 25^\circ\text{C}$	4	8		4	6.5	mA	
		$T_A = \text{Full range}$					9		

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. Full range is $T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C for NE5534 and NE5534A and -55°C to 125°C for SE5534 and SE5534A.



POST OFFICE BOX 855303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5534, NE5534A, SE5534, SE5534A LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS070 - JULY 1979 - REVISED SEPTEMBER 1980

operating characteristics, $V_{CC} \pm = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE5534, NE5534			SE5534A, NE5534A			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
SR Slew rate at unity gain	$C_C = 0$		13			13		V/ μs
	$C_C = 22\text{ pF}$		6			6		
t_r Rise time	$V_I = 50\text{ mV}$, $R_L = 600\ \Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$		20			20		ns
Overhoot factor	$A_{VD} = 1$, $C_C = 22\text{ pF}$		20%			20%		
t_r Rise time	$V_I = 50\text{ mV}$, $R_L = 600\ \Omega$, $C_L = 500\text{ pF}$		50			50		ns
Overhoot factor	$A_{VD} = 1$, $C_C = 47\text{ pF}$		35%			35%		
V_n Equivalent input noise voltage	$f = 30\text{ Hz}$		7		5.5	7		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
	$f = 1\text{ kHz}$		4		3.5	4.5		
I_n Equivalent input noise current	$f = 30\text{ Hz}$		2.5		1.5			pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
	$f = 1\text{ kHz}$		0.6		0.4			
F Average noise figure	$R_S = 5\text{ k}\Omega$, $f = 10\text{ Hz to } 20\text{ kHz}$				0.9			dB

TYPICAL CHARACTERISTICS†

NORMALIZED INPUT BIAS CURRENT
AND INPUT OFFSET CURRENT
VS
FREE-AIR TEMPERATURE

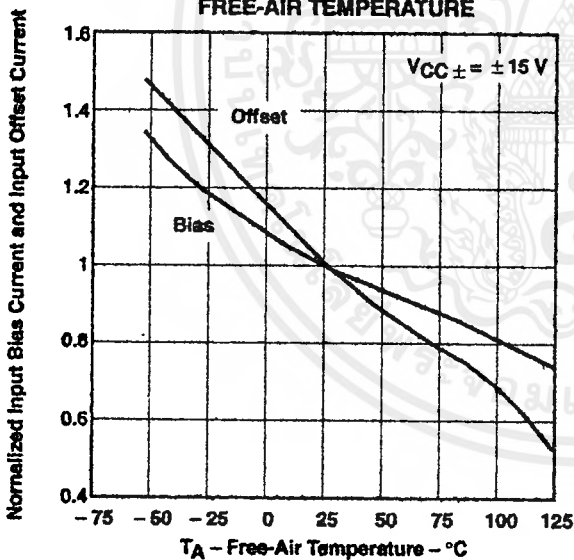


Figure 1

MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE
VS
FREQUENCY

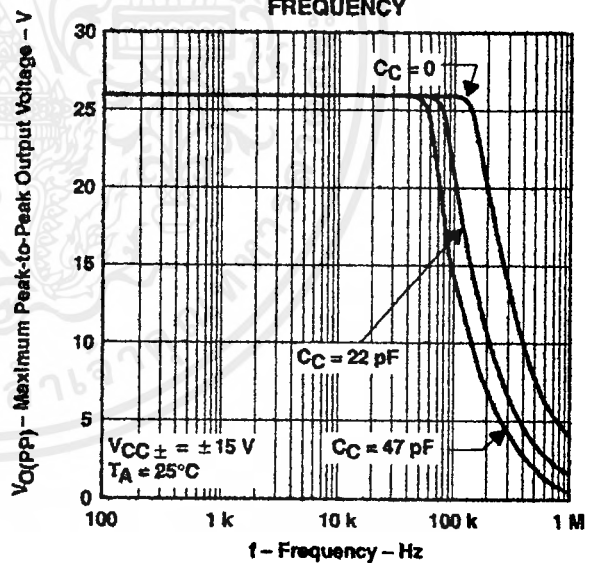


Figure 2

† Data at high and low temperatures are applicable only within the rated operating free-air temperature ranges of the various devices.

TYPICAL CHARACTERISTICS†

LARGE-SIGNAL
 DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION
 VS
 FREQUENCY

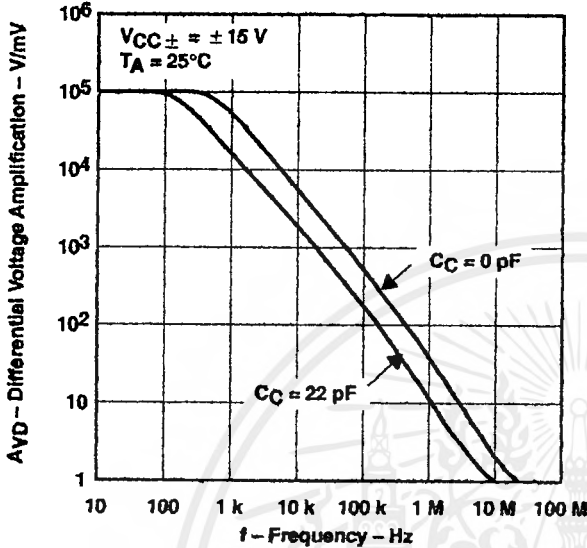


Figure 3

NORMALIZED SLEW RATE AND
 UNITY-GAIN BANDWIDTH
 VS
 SUPPLY VOLTAGE

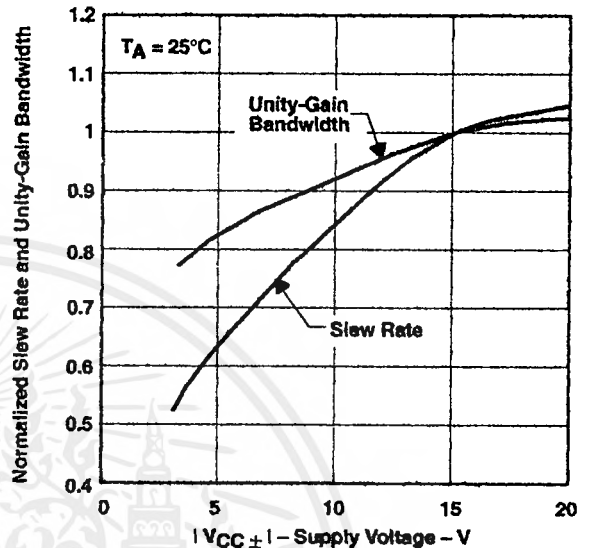


Figure 4

NORMALIZED SLEW RATE AND
 UNITY-GAIN BANDWIDTH
 VS
 FREE-AIR TEMPERATURE

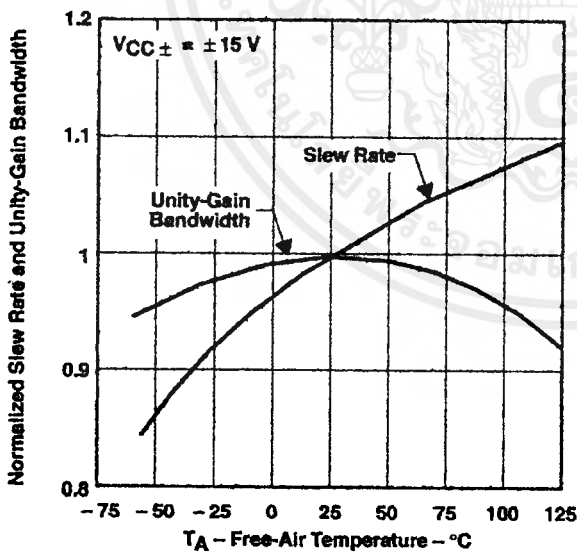


Figure 5

TOTAL HARMONIC DISTORTION
 VS
 FREQUENCY

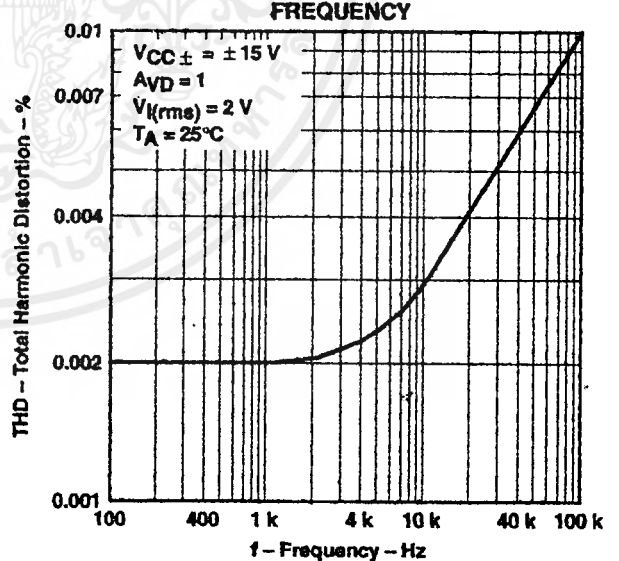


Figure 6

† Data at high and low temperatures are applicable only within the rated operating free-air temperature ranges of the various devices.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5534, NE5534A, SE5534, SE5534A LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS070 – JULY 1979 – REVISED SEPTEMBER 1990

TYPICAL CHARACTERISTICS

**EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE
vs
FREQUENCY**

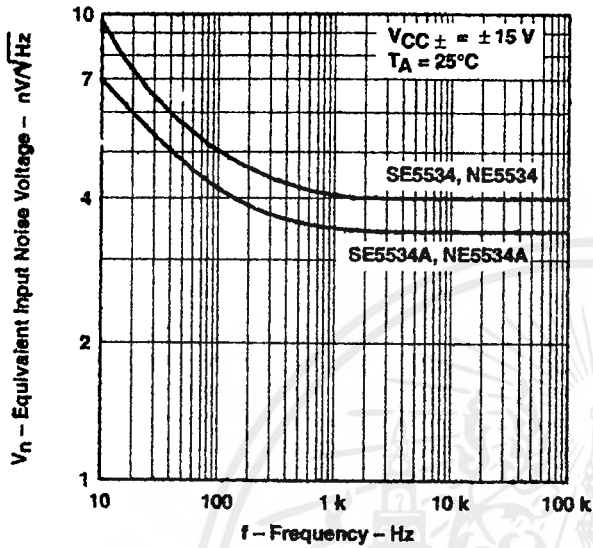


Figure 7

**EQUIVALENT INPUT NOISE CURRENT
vs
FREQUENCY**

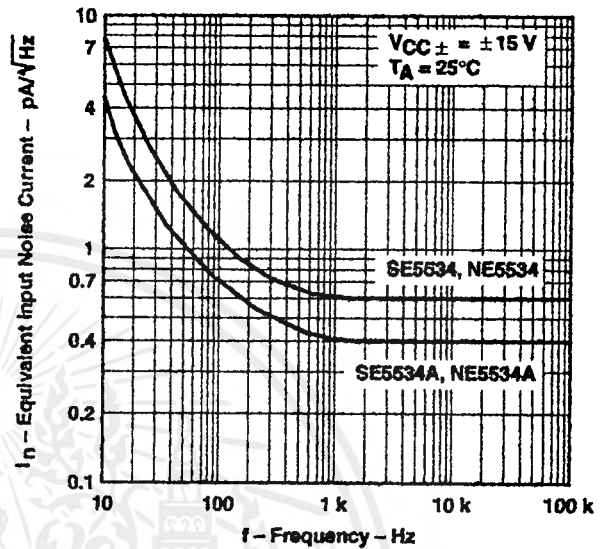


Figure 8

**TOTAL EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE
vs
SOURCE RESISTANCE**

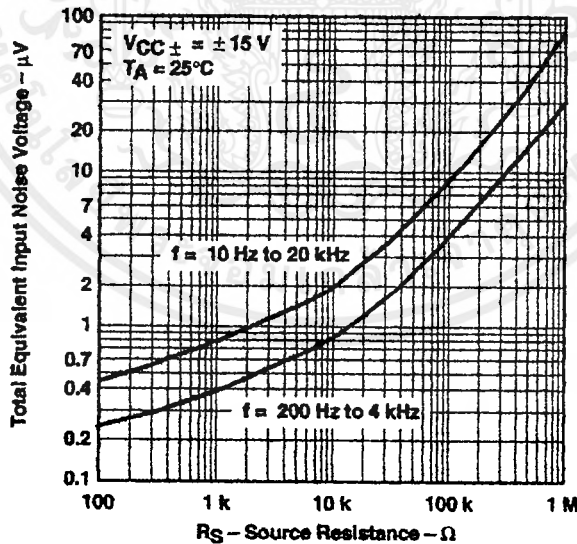


Figure 9



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้