



๒๕๓๒
๒๕๓๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

026902

ปีการศึกษา 2532

เอกทัฬหี เฟสลิเนียร์ กรอสโอเวอร์ เนทเวอร์ค

โดย

นายก้าพล ค.สกุล

นายไพศาล สุขสมัย

นายเยี่ยม เนตรชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์สุรพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

026902

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2532

เรื่อง แอคทีฟ เฟสไลน์รี ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Active Phase-Linear
Cross-over network)

โดย นายกำพล ต.สกุล 30.3601

นายไพศาล สุขสมัย 30.3617

นายเยี่ยม เนตรขำ 30.3620



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทนำ	II
บทที่ 1 จุดมุ่งหมายในการเลือกใช้ Active Filter cross-over network	1
1.1 จุดประสงค์ของการใช้ Cross-over	1
1.2 ข้อแตกต่างของ Active filter และ passive filter	1
1.3 Active filter cross-over network กับการจัดระบบของลำโพง	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการออกแบบวงจร Active filter และ cross-over network	7
2.1 วงจรกรองความถี่ First-order low-pass Butterworth filter	7
2.2 วงจร Second-order low-pass butterworth filter	10
2.3 วงจรกรองความถี่สูง (High pass filter)	11
2.4 วงจรกรองความถี่เป็นช่วง (Band-pass filter)	13
2.5 วงจร All - pass Filter	17
บทที่ 3 การออกแบบวงจรในทางปฏิบัติ	21
3.1 การออกแบบวงจรชนิด Butterworth filter	21
3.2 ความถี่คัทออฟ (cut-off) และลักษณะ Roll off	22

3.3	การเลือกใช้ครอสโอเวอร์ 2 ทางหรือ 3 ทาง	23
บทที่ 4	แนวคิดในการสร้างวงจร Active Phase Linear Cross-over network	25
4.1	ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวงจร Active cross-over network	25
4.2	Radiation pattern ของระบบ cross-over network	25
4.3	Phase Linearity กับรูปแบบของวงจร	27
บทที่ 5	การสร้างวงจรสำหรับใช้งาน	29
5.1	รูปแบบของวงจรที่นำมาใช้	29
5.2	การคำนวณหาค่า R, C และส่วนประกอบของวงจร	30
5.3	การหาค่า R, C และส่วนประกอบของวงจร สัญญาณความถี่กลางและสูง	34
5.4	ส่วนประกอบของวงจร (parts list)	37
บทที่ 6	สรุปผลการทดลอง	39
6.1	ปัญหาจากการสร้างวงจร	39
6.2	ผลการทดลอง	40

บทคัดย่อ

ในการแยกความถี่ของเสียงให้กับลำโพง โดยการพัฒนาระบบต่าง ๆ มาใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นับตั้งแต่ระบบ passive cross over network จนถึงแบบ Active cross-over network ซึ่งใช้อยู่ในขณะนี้ พบว่าแต่ละระบบมีข้อบกพร่องและปัญหาหลายประการ อาทิ การผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง การเปลี่ยนแปลงของ phase แต่ละความถี่ การขาดประสิทธิภาพ การกระจายของสัญญาณ (Radiation Pattern) เป็นต้น

คณะผู้ศึกษาจึงได้วิเคราะห์แนวคิดของระบบต่าง ๆ ทำการค้นคว้าวิธีการแก้ไขข้อบกพร่อง โดยดำเนินการสร้างวงจรระบบที่เรียกว่า "Active Phase-Linear Cross-over network" ผลปรากฏว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของลำโพง และแก้ไขปัญหาให้หมดไปได้ กล่าวคือสัญญาณเสียงไม่ผิดเพี้ยน phase-shift คงที่ การกระจายของสัญญาณมีประสิทธิภาพสูง สอดคล้องตามเจตนารมณ์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

บทนำ

ก่อนหน้านี้ได้มีการนำระบบ cross-over network มาใช้เพื่อแยกความถี่เสียงทุ้ม กลางและแหลมให้กับลำโพง โดยใช้ระบบที่เรียกว่าพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (passive cross-over network) ในระบบแบบ passive cross over วงจรแบบนี้จะต่ออยู่กับภาคขยายกำลังกับลำโพง โดยความถี่ต่ำต่อเข้ากับลำโพงเสียงทุ้ม ความถี่กลางต่อเข้ากับลำโพงเสียงกลาง และความถี่สูงต่อเข้ากับลำโพงเสียงแหลม ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบนี้คือ ลำโพงเสียงทุ้มอาจจะมีเสียงกลางหรือเสียงแหลมปนเข้าไปได้ เสียงกลางและเสียงแหลมผิดเพี้ยนไป ทำให้คุณภาพของเสียงในการรับฟังไม่ชัดเจนและสดใสตามที่ต้องการ อีกทั้งในระบบ passive cross-over network ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุและค่า Inductor ที่ประกอบในวงจร การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จุดตัดต่าง ๆ ทำได้ยากเนื่องจากมีความยุ่งยากในการปรับค่าต่าง ๆ

ปัจจุบัน จึงได้มีการปรับปรุงข้อเสียของวงจร passive cross-over network โดยนำเอาวงจรระบบ Active cross-over network มาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกสัญญาณความถี่ ช่วงความถี่ ต่ำ กลาง สูง ขั้วออกทางลำโพง การสูญเสียกำลังของสัญญาณ เมื่อเทียบกับระบบ passive cross over แล้วจะให้ผลดีกว่ามาก เพราะระบบของวงจรไม่ต้องผ่านขดลวดตัวต้านทานตัวเก็บประจุ ไม่ทำให้ phase เปลี่ยนมากนัก ไม่ต้องคำนึงถึง Impedance ของลำโพงแต่ละตัวว่าจะมีค่าไม่เท่ากัน การปรับหรือลดเสียงสัญญาณช่วงความถี่ได้ง่ายตามต้องการ สามารถเลือกความถี่ตัด (cross-over frequency) ได้ตามต้องการได้ง่ายกว่าวงจรชนิด passive อุปกรณ์ชนิด op-Amp ราคาถูกลง วงจรกินไฟน้อย จึงมีราคาประหยัดกว่าวงจรชนิด passive filter

อย่างไรก็ดี แม้จะได้มีการพัฒนาโดยนำเอาวงจรระบบ Active cross-over network มาใช้ แต่พบว่ายังมีปัญหบางประการที่วงจรชนิดนี้ไม่สามารถแก้ได้ คือสัญญาณต่อความถี่ของแต่ละช่วงยังลดสัญญาณของสัญญาณความถี่ใกล้เคียง การเปลี่ยนแปลงของ phase ระหว่างความถี่ของช่วงสัญญาณยังมีผลกับประสิทธิภาพของ radiation ทั้งระบบซึ่ง radiation การคำนวณว่ากรณีใดข้างต้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pattern จึงขึ้นอยู่กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลง

ด้วยเหตุนี้ คณะผู้ศึกษา จึงได้ทำการวิเคราะห์แนวคิดของระบบ Active cross-over network เพื่อค้นหาวิธีการในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น ให้หมดสิ้นหรือลดน้อยลง รวมทั้งดำเนินการในการสร้างระบบให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้จึงได้เลือกใช้วงจรที่เรียกว่า "Active phase-linear cross-over network"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

จุดมุ่งหมายในการเลือกใช้ Active Filter cross-over network

1.1 จุดประสงค์ของการใช้ cross-over

ในการใช้ cross-over network ทั้งแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟนั้น จุดมุ่งหมายที่สำคัญเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องของลำโพง เนื่องจากการสร้างลำโพงนั้น การที่จะออกแบบให้สนองตอบตลอดย่านความถี่เสียง (20-20000 เฮิรตซ์) นั้นยังเป็นไปได้ยาก การใช้ลำโพงที่ตอบสนองความถี่เฉพาะย่านความถี่ตั้งแต่สองถึงสามตัว จึงเป็นวิธีแก้ปัญหาที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ทำให้เกิดระบบลำโพงสองทางหรือสามทางขึ้น วงจร cross-over จึงทำหน้าที่แยกความถี่ของ สัญญาณออก Amplifier เป็นส่วน ๆ คือเสียงสูง กลาง และต่ำขับออกทางลำโพงแต่ละตัว

การจัดระบบโดยใช้ Amplifier แบบพาสซีฟครอสโอเวอร์ ถ้าคุณภาพของ Amplifier ไม่ดีพอ การที่จะขับเสียงตลอดย่านความถี่นั้นทำให้เกิดการผิดเพี้ยนที่เรียกว่า Inter Modulation Distortion อันเกิดจากคุณสมบัติของ Amplifier เองความถี่ที่ต้องการจะมีความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการผสมผสานออกมาด้วย ทำให้คุณภาพของเสียงในการรับฟังไม่ชัดเจนและสดใสตามที่ต้องการ หากเป็นความถี่สูง ๆ ตามธรรมชาติขาดความชัดเจน เสียงกลางและเสียงต่ำจะเป็นเสียงกบไม่เป็นไปตามความเป็นจริง สาเหตุจากการปะปนระหว่างความถี่เสียงต่ำ และความถี่เสียงกลางนั้น ๆ

1.2 ข้อแตกต่างของ Active filter และ Passive filter

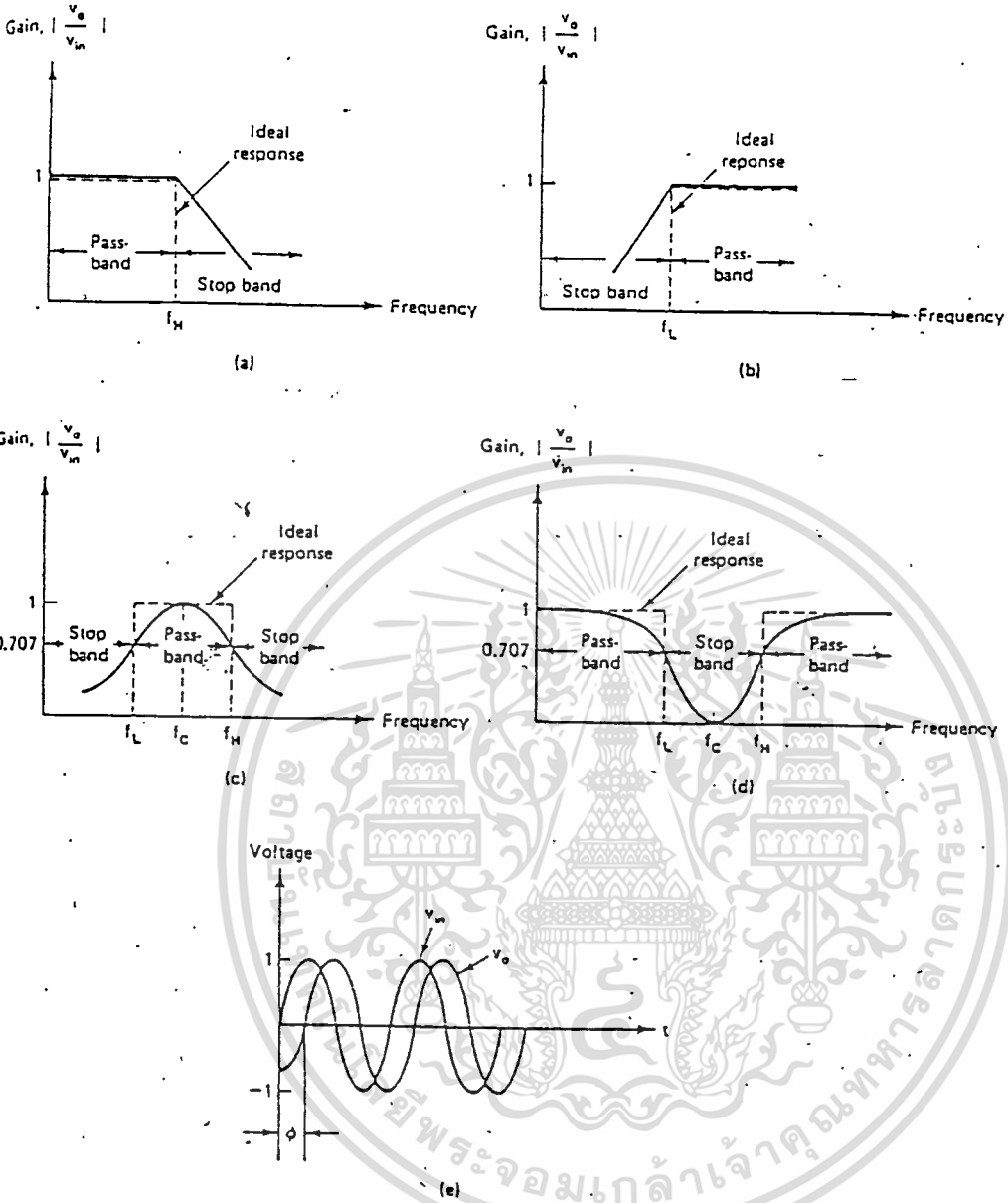
เหตุที่มีการนำ Active Filter มาใช้แทนการใช้ Passive Filter ในวงจรนั้น เนื่องจากการใช้ Active Filter โดยนำ Op-Amps. มาใช้ใน ช่วง ความถี่ Audio Frequency จะมีผลดีกว่า Passive Filter โดยในวงจร Active Filter สามารถลดตัว Inductor อันเป็นสาเหตุให้วงจรมีขนาดใหญ่ มีราคาแพง เมื่อเทียบกับในวงจร Active Filter โดยใช้เพียง R,C ในวงจร อีกทั้งการใช้ Inductor ทำให้ต้องใช้ Power มากอัน

เนื่องจาก Magnetic Field ที่เกิดขึ้นในตัว Inductor นั้น ๆ ไม่สามารถนำเอาพลังงานที่สูญเสียไปส่วนหนึ่งมาใช้เพื่อการสื่อสารทางอื่น ๆ ได้อีก และต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ Active Filter มีข้อดีกว่า Passive Filter ที่มองเห็นชัดเจนดังนี้

1. การปรับค่าความถี่และค่า Gain ในวงจร Active Filter มีความคล่องตัวกว่าในวงจร Passive Filter โดยเฉพาะ Op-Amps. ของวงจร Active Filter มีสัญญาณลดทอน (Attenuation) ต่ำ
2. วงจร Active Filter ไม่มีปัญหาในเรื่อง Loading ของวงจรขยายเนื่องจาก Input Resistance สูง และ Output Resistance ต่ำของตัว Op-Amps เอง
3. ราคาของ Active Filter ถูกกว่า Passive Filter สาเหตุจากราคาของ Op-Amps. ในปัจจุบันมีราคาถูก ประกอบกับสามารถลดค่าของ Inductor ในวงจร ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีในวงจร Active Filter
4. สาเหตุอันเกิดจากรูปแบบของวงจรที่ต้องใช้ Passive Network ก็อยู่ระหว่าง Amplifier กับลำโพง ทำให้ความต้านทานภายในของวงจรพาสซีฟ เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นการลดทอนสัญญาณ (power loss) ในตัวความต้านทาน ทำให้กำลังที่เข้าออกทางลำโพงลดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทางด้านการแยกเสียงถึงแม้การใช้วงจร Passive Filter สามารถทำให้ตัดความถี่ช่วงไหนก็ได้โดยไม่ยาก แต่เมื่อประกอบขึ้นแล้ว การจะเปลี่ยนช่วงความถี่ตัด เพื่อให้มีความเหมาะสมกับตัวลำโพงหรือห้องฟังเสียง กระจ่างได้ยากเนื่องจากต้องเปลี่ยนค่า Inductor จึงเป็นเรื่องยากที่จะทำวงจรให้ได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง ๆ อีกทั้งต้องลงทุนสูง ข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ง่ายและดีกว่า เมื่อใช้วงจรประเภท Active Filter

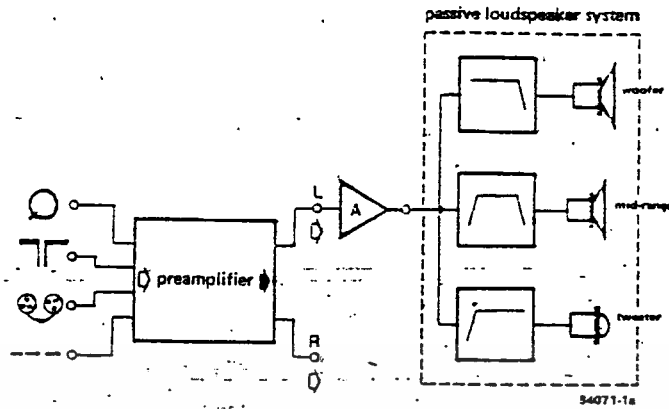
Active Filters



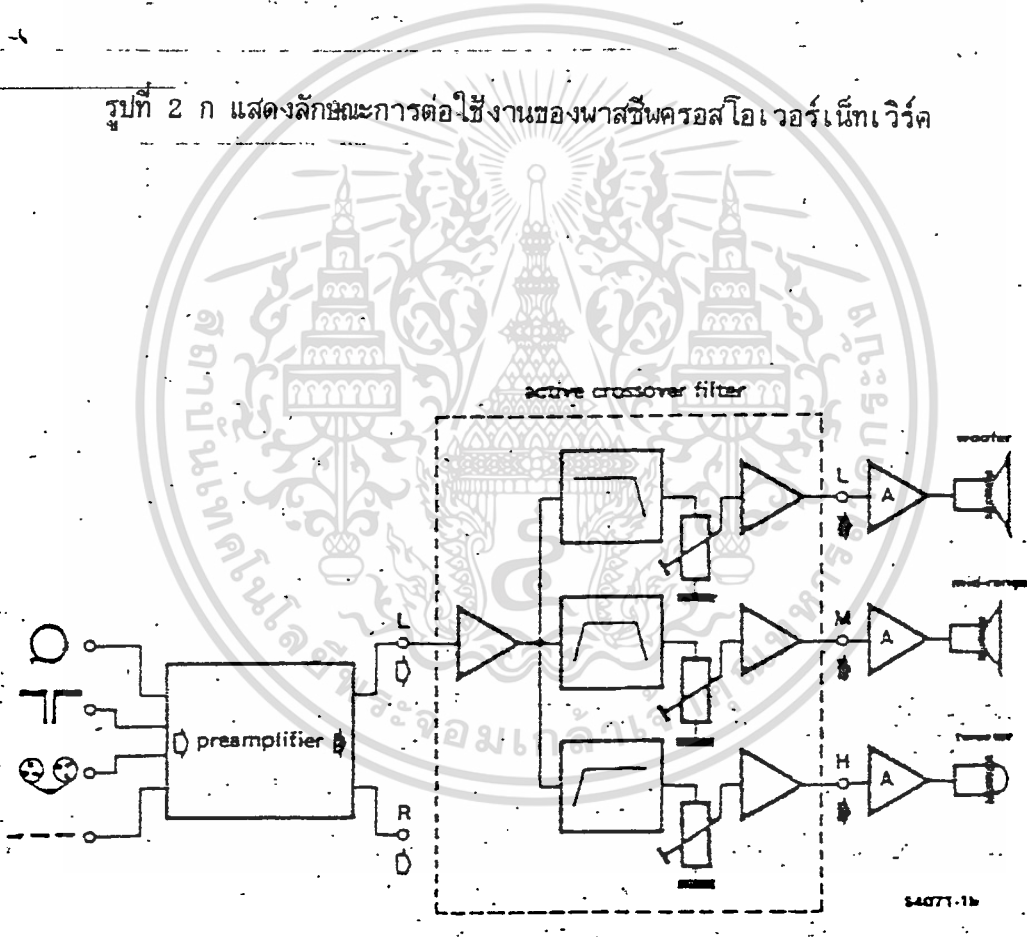
รูปที่ 1 แสดงการตอบสนองของวงจรมีขั้วของวงจร Active Filter

- a. Low-pass Filter b. High-pass Filter
- c. Band-pass Filter d. Band Reject
- e. Phase shift between input and output voltage of an All-pass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ก แสดงลักษณะการต่อใช้งานของพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค



รูปที่ 2 ข แสดงลักษณะการต่อใช้งานของแอกทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

นอกจากคุณสมบัติตามที่กล่าวมาแล้ว หากเรานำมาพิจารณาการจัดการระบบโดยใช้ Amplifier

1 ชุด กับพาสซีฟครอสโอเวอร์ โดยใช้ลำโพงสองหรือสามทางควรระมัดระวังการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไฮไฟได้พอสมควร แต่การใช้ Amplifier คุณภาพต่ำหรือปานกลางเพียงตัวเดียว ขั้วความถี่ตลอดย่านนั้น ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวที่เรียกว่า Intermodulation Distortion อันเกิดจากคุณสมบัติของ Amplifier เอง ตัวอย่างเช่นสมมติว่ามีสัญญาณสองสัญญาณป้อนเข้าทางอินพุทของเครื่องขยายอันหนึ่งมีความถี่ 100 เฮิรท์ อีกอันหนึ่ง 1,000 เฮิรท์ ออกทางเข้าที่พหุด้วยขนาดเท่าที่ต้องการ แต่โดยความเป็นจริงจะไม่เป็นเช่นนั้น โดยจะมีความถี่ผลบวกกับผลต่างของความถี่ทั้งสองคือ 1900 และ 900 เฮิรท์ ปะปนออกมาด้วย กรณีตั้งว่านี่ถ้าเป็นเสียงเพลงซึ่งประกอบด้วยความถี่มากมายปะปนกันออกมา เสียงที่ออกจาก Amplifier จะถูกปนเติมด้วยความถี่เล็กน้อยด้วยแล้วแยกผ่านเน็ตเวิร์คออกทางลำโพง ลักษณะเช่นนี้หากเป็นเสียงสูง ๆ ตามธรรมชาติทำให้ขาดความสดใส เสียงกลางจะแข็งและขาดความเป็นไปตามธรรมชาติ เสียงทุ้มลึกจะกลายเป็นเสียงทึบ ๆ เครื่องขยายเสียงจะขาดความสมบูรณ์การเป็นไฮไฟ ดังนั้นหากกรณีดังกล่าวแล้ว การใช้ passive cross-over จะไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้

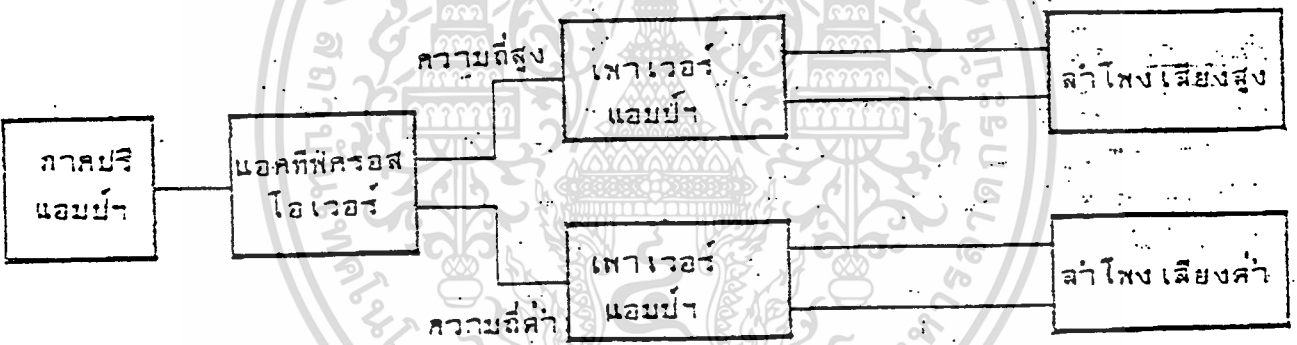
1.3 Active filter cross-over network กับการจัดระบบของลำโพง

การจัดระบบและคุณสมบัติของ Active cross-over สามารถแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วได้ เช่นกรณี Intermodulation Distortion เนื่องจากสัญญาณอินพุทถูกแยกออกเป็นช่วงความถี่ ก่อนป้อนเข้าเพาเวอร์แอมป์ ช่วงความถี่ที่เข้าเพาเวอร์แอมป์ แต่ละชุดจึงไม่กว้างมาก โอกาสที่จะเกิดการบิดเบี้ยวจึงลดน้อยลงมาก โดยเฉพาะเสียงช่วงความถี่กลางจึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด

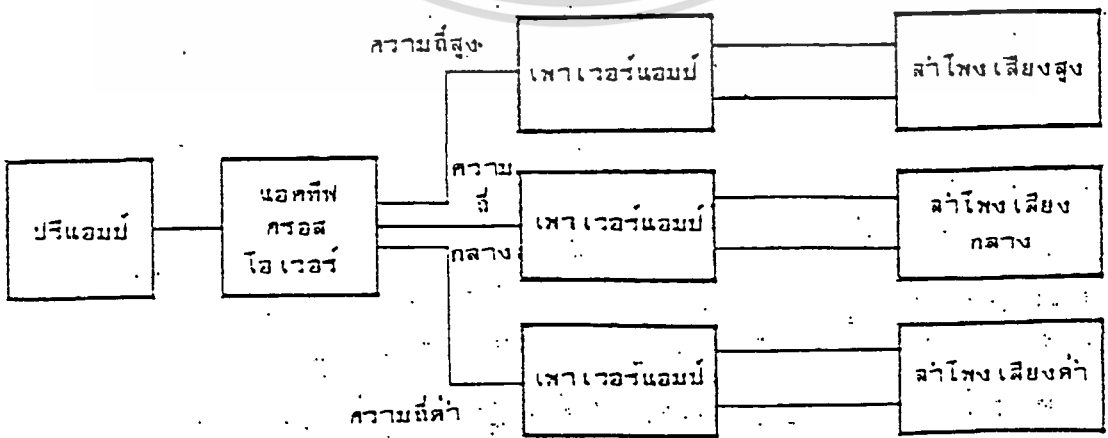
ตามหลักการของ Active cross-over คือการแยกเสียงความถี่ต่าง ๆ ก่อนเข้า Power Amp ไปขับลำโพงของแต่ละตัว โดยที่หากใช้ลำโพง 2 ทางใช้ Power Amp 2 ชุด ถ้าใช้ลำโพง 3 ทางจะใช้ power Amp 3 ชุด เป็นต้น วงจรแยกเสียงต่าง ๆ ใช้อุปกรณ์ Active เช่น Transistor หรือ Op-Amp ร่วมกับตัวความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ในส่วนป้อนกลับผลที่ได้จะเป็นวงจร Active Filter การเปลี่ยนค่าความถี่ต่าง ๆ ของจุดตัดสามารถทำได้ง่าย โดยการเปลี่ยนค่า R, C ซึ่งง่ายกว่าการเปลี่ยนค่า Inductor ของวงจร passive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกความถี่ป้อนเข้า Power Amp แต่ละตัวทำให้สามารถปรับสัญญาณแต่ละช่วงความถี่ได้อย่างอิสระ การจะเน้นหรือลดช่วงความถี่ใด ๆ ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของห้องฟัง หรือรสนิยม ทำได้ในช่วงกว้างกว่าการใช้โทนคอนโทรล (Tone Control) เสียงแหลมที่ออกทางลำโพงจึงสดใส เสียงทุ้มลึกหนักแน่น จะเป็นการเพิ่มสมรรถนะของลำโพง และ Dynamic Range ของระบบ การต่อวงจรแสดงโดย Block Diagram ตามรูปที่ 3 ก เป็นรูปแบบของแอสซิมเมตริกโอเวอร์แบบสองทาง และรูปที่ 3 ข ระบบแอสซิมเมตริกโอเวอร์แบบสามทาง



รูปที่ 3 ก แอสซิมเมตริกโอเวอร์แบบสองทาง



รูปที่ 3 ข ระบบแอสซิมเมตริกโอเวอร์แบบสามทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

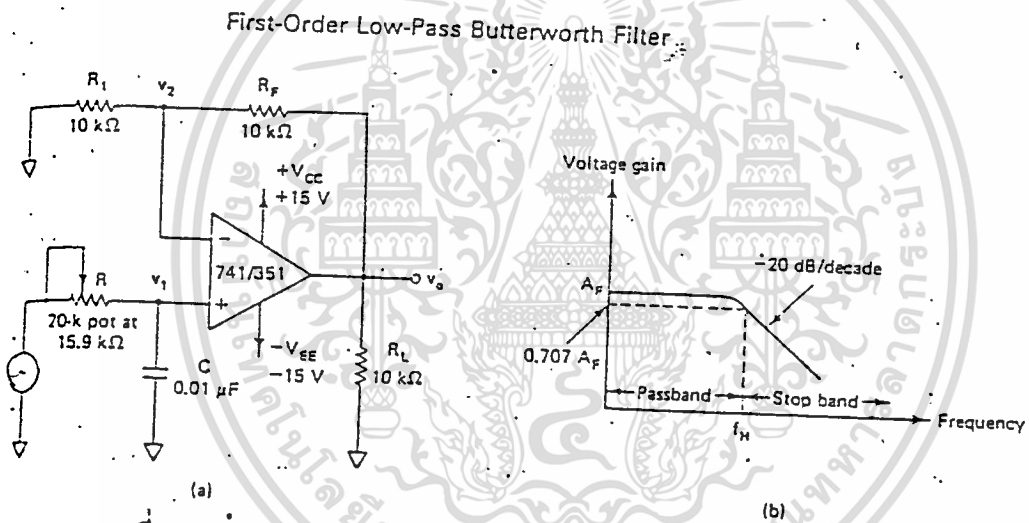
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการออกแบบวงจร Active Filter และ Cross-over network

2.1 วงจรกรองความถี่ First-order low-pass Butterworth filter

วงจรกรองความถี่ First-order Low-pass Butterworth filter จุดประ

สงค์ที่ต้องการให้สัญญาณบางความถี่ผ่านเข้าออกเท่านั้น โดยที่สัญญาณความถี่นอกเหนือจากนี้จะถูกตัดออก



รูปที่ 4 response.

First-order low-pass Butterworth filter. (a) Circuit. (b) Frequency

ตามรูปเป็นวงจรเฟิร์สออร์เดอร์ชนิด Low pass filter วงจรแบบนินเวิร์ต
โดยใช้ R, C และใช้ Op-Amp ชนิด noninverting R_1 และ R_F เป็น Gain ของวงจร

$$v_1 = \frac{-jxc}{R-jxc} v_{in}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ และ $-jxc = \frac{1}{j2\pi fc}$

$$v_1 = \frac{v_{in}}{1+j2\pi fRC}$$

$$v_o = \frac{(1 + R_F/R_1) v_1}{R_1}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{AF}{1+j(f/f_H)}$$

เมื่อ $\frac{v_o}{v_{in}} =$ gain ของ Filter

$$AF = 1 + \frac{R_F}{R_1} = \text{passband gain of the filter}$$

f = frequency of the input signal

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \text{high cutoff frequency of filter}$$

โดยจะได้ phase $\theta = -\tan^{-1} (f/f_H)$

ในวงจร low pass ค่า gain จะสัมพันธ์กับค่าความถี่

1. กรณี $f < f_H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right|^2 \approx A_F$$

2. กรณี $f = f_H$

$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{2}} = 0.707 A_F$$

3. กรณี $f > f_H$ $\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| < A_F$

วิธีการออกแบบวงจร Low-pass filter

1. โดยเลือกค่าความถี่สูงสุด f_H
2. เลือกค่า C ซึ่งมีค่าโดยทั่วไปไม่เกิน $1 \mu F$
3. คำนวณหาค่า R โดยใช้สูตร

$$R = \frac{1}{2\pi f_H C}$$

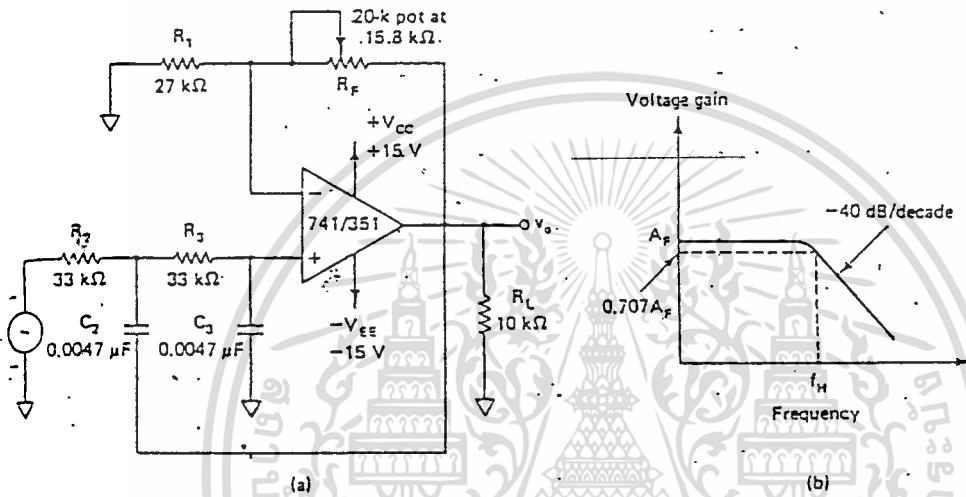
4. หาค่า R_1 และ R_F โดย

$$A_F = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

2.2 วงจร Second-order low pass Butterworth filter

วงจร Second-order low-pass Butterworth ตามรูป

Second-Order Low-Pass Butterworth Filter



รูปที่ 5 Second-order low-pass Butterworth filter. (a) Circuit. (b) Frequency response.

วงจรกรองความถี่ต่ำออกเดอรัทที่สอง Second order Low pass filter ค่าของ Gain ขึ้นอยู่กับ R_1 และ R_F ความถี่ out off คือ f_H ขึ้นอยู่กับค่า R_2, C_2, R_3 โดยหาได้จากสูตร

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}} \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

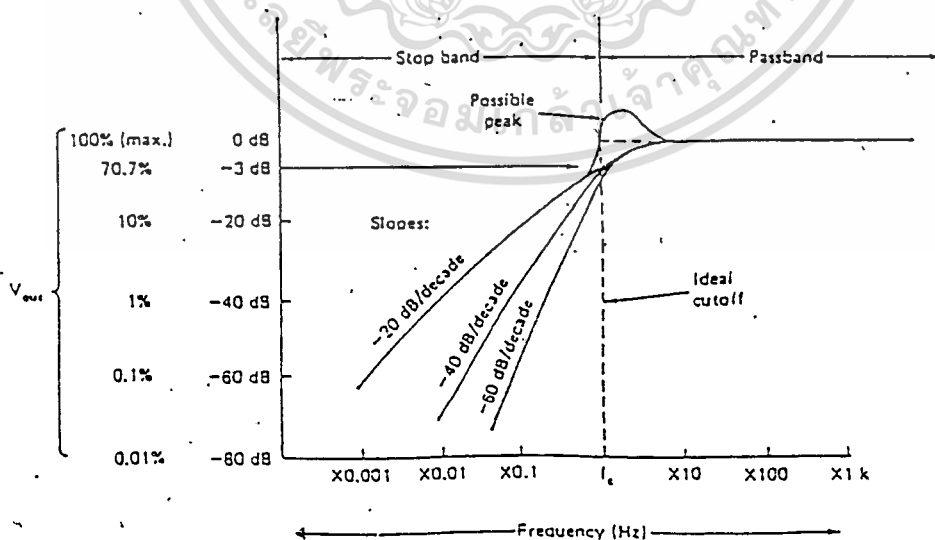
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A_F}{1+(f/f_H)^4}$$

$$A_F = 1 + \frac{R_F}{R_1} = \text{pass band gain of the filter}$$

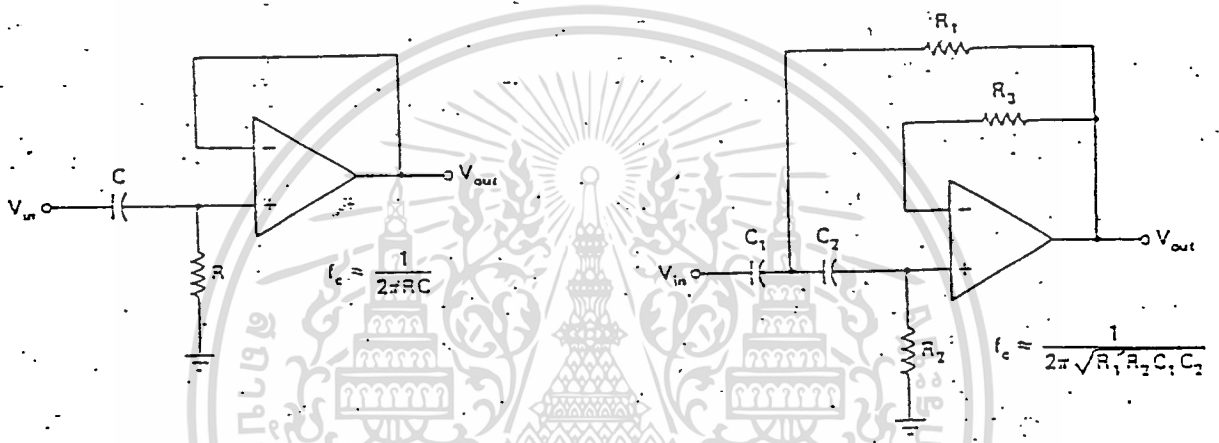
f = frequency of the input signal (Hz)

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_3C_2C_3}} = \text{high cut off frequency (Hz)}$$

2.3 วงจรกรองความถี่สูง High pass filter เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านเข้าไปสู่ out-put ของวงจรได้ แต่จะกันไม่ให้สัญญาณความถี่ต่ำลอดเข้าไปได้ จากคุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ วงจรนี้จึงมีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำ คือเกิดความถี่คัทออฟ f_c ขึ้น และอัตราการขยายจะค่อย ๆ ลดลง คือไม่ตกลงในแนวตั้งเลขที่เดี่ยวดังรูปที่ 6



เราสามารถสร้างวงจรนี้โดยการสลับตำแหน่งตัวความต้านทาน และตัวเก็บประจุของวงจรความถี่ต่ำดังรูปที่ 7 ก และสามารถอธิบายคุณสมบัติที่ว่า ที่ความถี่สูง อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าต่ำ ดังนั้นสัญญาณอินพุตเกือบทั้งหมดจึงตกคร่อมตัวต้านทาน R และมีค่าเท่ากับ V_{out} แต่ที่ความถี่ต่ำกว่า f_c อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าสูง ทำให้แรงดันทั้งหมดตกคร่อมตัวเก็บประจุเอง และเบี่ยงผลให้แรงดันคร่อมตัวต้านทานและแรงดันเอาท์พุทมีค่าต่ำมาก โดยที่วงจรตามรูปที่ 7 ก. มีความชันประมาณ -20 dB/decade และความถี่คัทออฟ หาได้จากสมการเดียวกันกับวงจรชนิด Low-pass filter

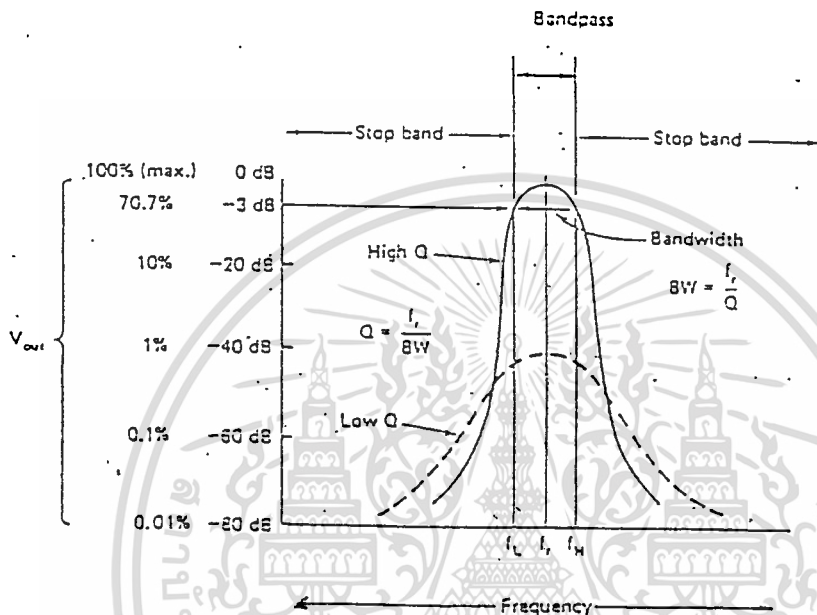


รูป 7 ก วงจรความถี่ต่ำ

รูป 7 ข วงจรกรองความถี่สูง

ตามรูปที่ 7 ข. แสดงวงจรกรองความถี่สูง ซึ่งถูกปรับให้มีความชัน -40 dB/decade และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของการทำงาน C_1 ควรมีค่าเท่ากับ C_2 R_3 ควรเท่ากับ R_2 โดยมี R_2 เป็นตัวบ่อนสัญญาณกลับเพื่อกรองสัญญาณอีกครึ่งหนึ่ง

2.4 วงจรกรองความถี่เป็นช่วง Band-Pass Filter



รูปที่ 8 ความถี่เรโซแนนซ์

วงจรกรองความถี่เป็นช่วงหรือแบนด์พาสฟิลเตอร์ คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณบาง

ความถี่ผ่านได้เท่านั้น ตามรูปที่ 8 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่เป็นช่วง

ตามรูปจะเห็นว่า ณ. ความถี่ที่เอาต์พุตมีขนาดสูงสุด เราเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) และที่ความถี่ซึ่งแรงดันเอาต์พุตลดลงเหลือ 70.7% ทั้งด้านที่ความถี่สูงขึ้น และที่

ความถี่ลดลง เรียกว่าความถี่ f_H และ f_L ตามลำดับ โดยที่ผลต่างของความถี่ทั้งสองนี้

$(f_H - f_L)$ จะแสดงเป็นแบนด์วิดท์ (BW) ของวงจร ถ้า BW มีขนาดต่ำกว่า 10% ของความถี่เรโซแนนซ์

(f_r) จะเรียกววงจรนี้ว่า วงจรฟิลเตอร์ช่วงแคบ แต่จะเรียกเป็นวงจรฟิลเตอร์ช่วงกว้าง

หากแบนด์วิดท์มีค่าสูงกว่า 10% ของ f_r นอกจากนี้ยังให้นิยามสำหรับค่า Q (quality

factor) ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ไซแนสท์ และแบนด์วิดท์ ตามสมการ

$$Q = fr/BW$$

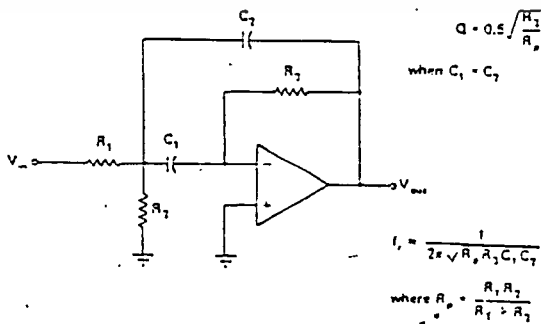
วงจรที่มีค่า Q สูงมากเท่าใด แบนด์วิดท์จะยิ่งแคบเท่านั้น (เข้าใกล้วงจรในอุดมคติซึ่งต้องการเลือกความถี่ที่ผ่านวงจรกรองได้เพียงค่าเดียว) และเอาท์พุทก็จะมีขนาดสูงขึ้นด้วยตามเส้นประในรูปที่ 8 แสดงวงจรกรองแบนด์พาสที่มี Q ค่อนข้างต่ำ

วงจรในรูปที่ 9 แสดงวงจรกรองความถี่เป็นช่วง ซึ่งใช้การรวมวงจรกรองความถี่สูงและวงจรกรองความถี่ต่ำเข้าด้วยกัน (โดยที่วงจรใดจะมาก่อนก็ได้) R_1 และ C_1 คืออุปกรณ์ในการกรองความถี่ต่ำ ส่วน C_2 และ R_2 ใช้กรองความถี่สูง และสามารถหาความถี่ไซแนสท์ f_r ได้จากสมการดังนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_p R_3 C_1 C_2}}$$

โดยที่ $R_p = R_1 // R_2$

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



รูปที่ 9 แสดงวงจรกรองความถี่เป็นช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สมการหาค่า } Q = 0.5 \sqrt{\frac{R_3}{R_F}} \quad \text{เมื่อ } C_1 = C_2$$

จากสมการในการคำนวณหา f_r และ Q จะพบว่าตัวต้านทาน R_3 จะมีบทบาทสำคัญมาก เช่น เมื่อตัวต้านทานป้อนกลับ R_3 มีค่าต่ำ f_r จะมีค่าสูง และ Q มีค่าต่ำ เป็นต้น

เราสามารถแสดงความแตกต่างของผลการใช้ตัวต้านทาน R_3 ที่มีค่าต่างกันดังตัวอย่าง

เมื่อ $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$

$R_2 = 10 \text{ K}\Omega$

$R_3 = 100 \text{ K}\Omega$

$C_1 = 0.01 \mu\text{F}$

$C_2 = 0.01 \mu\text{F}$

$$R_{10} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 5 \text{ K}\Omega$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_p R_3 C_1 C_2}}$$

= 714 Hz

$$Q = 0.05 \sqrt{R_3 / R_p}$$

= 2.25

$$BW = \frac{f_r}{Q} = 317 \text{ Hz}$$

$$f_H = f_r + \frac{BW}{2} = 873 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_L = f_r - \frac{Bw}{2} = 714 - \frac{317}{2} = 556 \text{ Hz}$$

แต่เมื่อ R_3 ถูกเปลี่ยนจาก 100 K Ω เป็น 1 Mega Ω จะได้

$$f_r = 225 \text{ Hz}$$

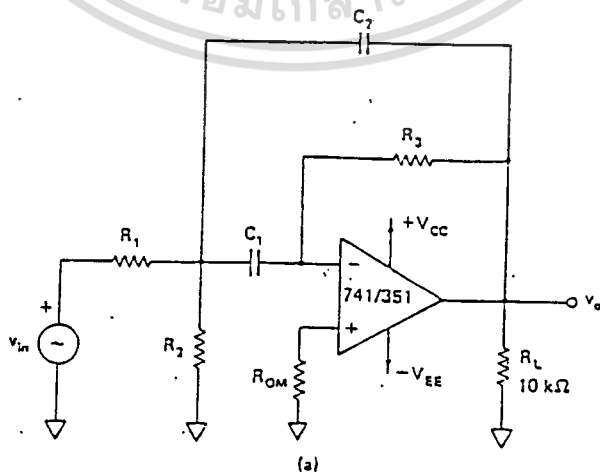
$$Q = 7.07$$

$$Bw = \frac{2.25}{7.07} = 32 \text{ Hz}$$

$$f_H = f_r + \frac{Bw}{2} = 225 + \frac{32}{2} = 241 \text{ Hz}$$

$$f_L = f_r - \frac{Bw}{2} = 225 - \frac{32}{2} = 209 \text{ Hz}$$

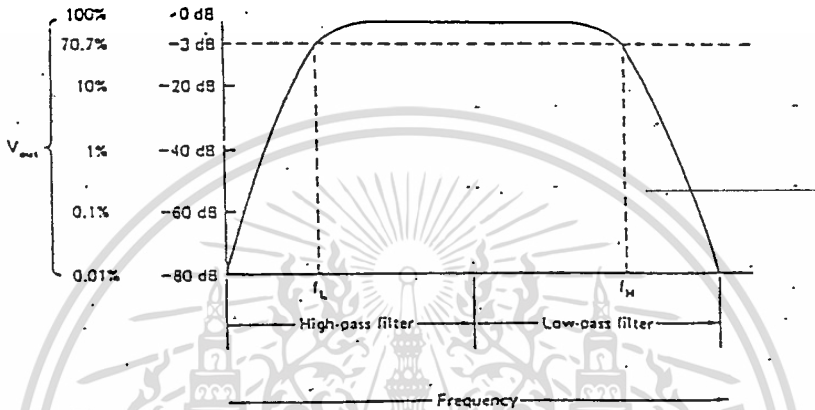
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวต้านทาน R_3 จะเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเลือกความถี่ของสัญญาณที่ต้องการให้ผ่านเข้ามา และความกว้างของช่วงความถี่นั้น ๆ



รูปที่ 10 วงจรกรองความถี่เป็นช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

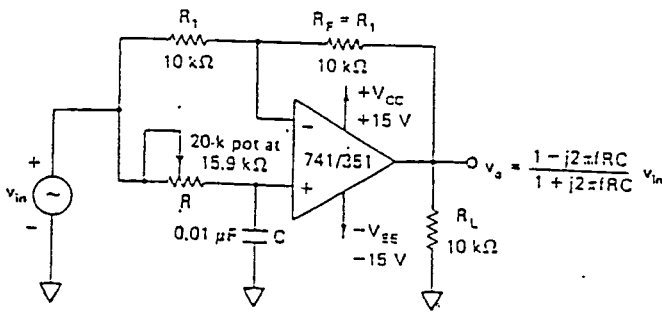
ในกรณีที่ต้องการวงจรกรองความถี่เป็นช่วง ๆ ที่มีช่วงกว้างมาก ๆ เราสามารถทำ
 วงจรความถี่ต่ำ และวงจรกรองความถี่สูงมาต่อรวมกันได้เลย โดยใช้ f_c สำหรับกรอง
 ความถี่ต่ำเป็น f_H และใช้ f_c ของวงจรกรองความถี่สูงเป็น f_L ซึ่งจะได้กราฟตอบสนองต่อ
 ความถี่ดังรูปที่ 11



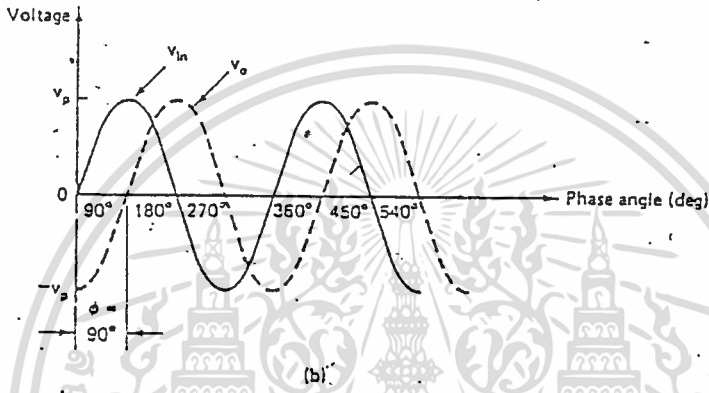
รูปที่ 11 กราฟตอบสนองความถี่ต่ำและความถี่สูง

2.5 วงจร All-pass Filter

ตามชื่อเป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ทุกย่านผ่านวงจร โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณ
 โดยสามารถรู้ได้ว่า phase เปลี่ยนแปลงไปเท่าใดในย่านความถี่ต่าง ๆ การชดเชยค่า phase
 เปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้โดยใช้วงจรกรองความถี่ All pass Filter หรือวงจรนี้บางครั้งเรียก
 delay Equalizer หรือ phase corrector ดังรูปที่ 12



(a)



(b)

รูปที่ 12 All-pass filter. (a) Circuit. (b) Phase shift between input and output voltages.

โดยสามารถเขียนสูตรระหว่าง v_o และ v_{in} ได้ดังนี้

$$v_o/v_{in} = 1 - j2\pi fRC$$

$$\text{phase angle } \phi = -2 \tan^{-1} (2\pi fRC/1)$$

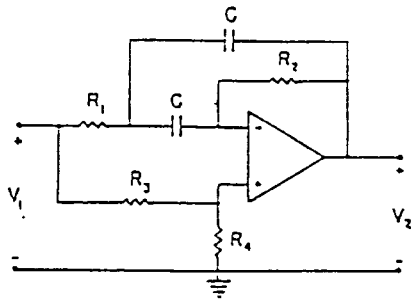
หรือในกรณีของวงจร order ที่ 2 ของ all pass filter โดย Transfer function จะได้

$$H(S) = [K(S^2 - as+b)/(S^2+as+b)]$$

$$\phi(\omega) = -2 \text{ arc tan}(\omega/b-\omega^2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ไม่ควรแจกจ่ายให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 An all-pass filter.

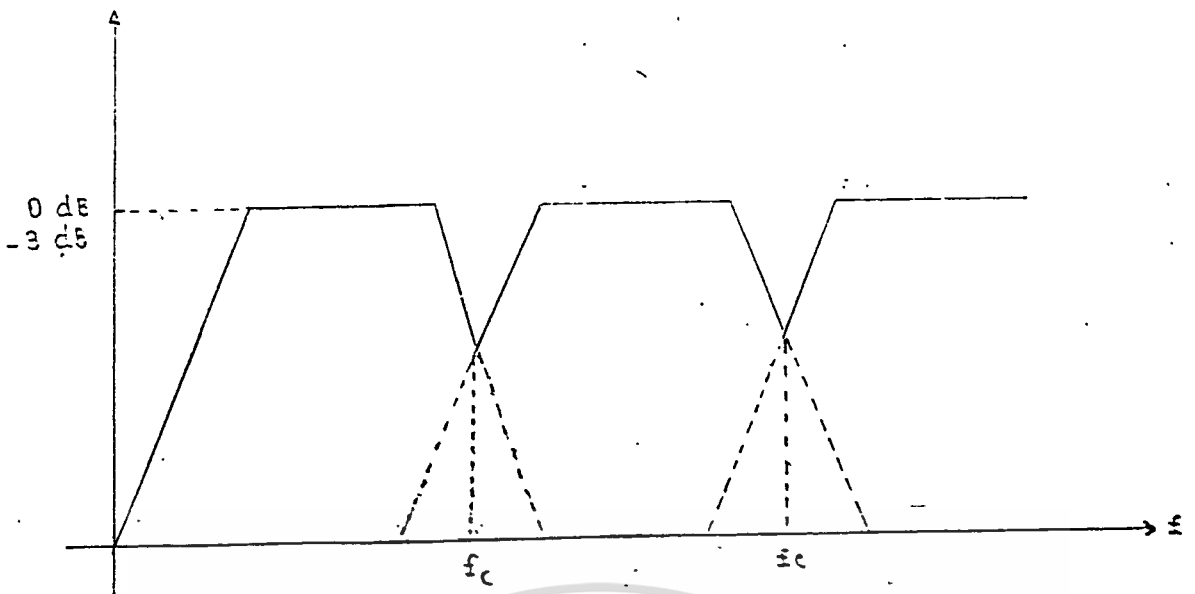
วงจร All pass ตามรูปที่ 13 ตามสมการที่กล่าวมาแล้วจะได้

$$a = -2 / (R_2 C)$$

$$b = 1 / (R_1 R_2 C^2)$$

$$K = R_4 / (R_3 + R_4)$$

การที่จะให้ลำโพงมีประสิทธิภาพดี จำเป็นต้องแบ่งย่านความถี่สูง ต่ำ ป้อนเข้าลำโพงให้เหมาะสม เช่น ใช้วงจรกรองความถี่สูงเพื่อป้อนให้กับเพาเวอร์แอมป์ของ Tweeter และวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อป้อนให้กับเพาเวอร์แอมป์ของ woofer ความถี่ครอสโอเวอร์ก็คือจุดแบ่งความถี่ที่จะป้อนให้ลำโพง หรือแอมป์แต่ละชุด โดยทั่วไปจะใช้จุดครอสโอเวอร์ที่ 3 dB จากจุดสูงสุดของเอ๊าท์พุทจากครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค ตามรูปที่ 14 ซึ่งในกรณีนี้จุดครอสโอเวอร์ก็คือจุดคัทออฟของฟิลเตอร์แต่ละชุดนั่นเอง



รูปที่ 14 แสดงความถี่ครอสโอเวอร์ของเพนเวิร์ค 3 ทง



บทที่ 3

การออกแบบวงจรในทางปฏิบัติ

3.1 การออกแบบวงจรชนิด Butterworth filter

ชนิดของวงจรเลือกใช่วงจรกรองความถี่ชนิด (Butterworth filter) ซึ่งวงจรมีคุณสมบัติน้อยกว่า Bessel และ chebyshev filter อันมีคุณสมบัติทางด้านตอบสนองความถี่ราบเรียบดี มี phase และ Transient response ดี ทำให้เหมาะกับการนำมาใช้ทำเป็นเอคพรีเฟรอสโอเวอร์

การออกแบบวงจรกรองความถี่ในทางปฏิบัตินั้น เมื่อต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่ จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการสังเคราะห์วงจรหรือการประมาณฟังก์ชัน เพียงแต่ใช้คู่มือที่ดีอยู่ช่วยในการออกแบบหาค่าต่าง ๆ อาจมีค่าอุปกรณ์ เช่น R หรือ C ที่ใช้ในวงจร เพียงแต่กำหนดชนิดของวงจรเป็นชนิดใด อันได้แก่ ความถี่คัตออฟ อัตราการขยาย เราก็สามารถหาค่าต่าง ๆ ได้จากตารางในหนังสือ ซึ่งได้กำหนดค่าต่าง ๆ ไว้ตามที่ต้องการแล้ว ในที่นี้ใช้จากตารางในหนังสือของ David E. Johns และ John L. Hibern ซึ่งเป็นคู่มือที่ใช้ออกแบบวงจรที่เร็วมากเล่มหนึ่ง ตามตารางตัวอย่างที่แนบในภาคผนวก

การใช้ตารางหาค่าต่าง ๆ เรากำหนดค่า f_c ตามตาราง 2.10a, b หรือ c โดย f_c อยู่ระหว่าง 1 Hz และ $10^2 = 100$ Hz เราใช้ตารางที่ 2.10a หรือ f_c ระหว่าง 100 Hz และ $10^4 = 10,000$ Hz ใช้ตารางที่ 2.10b ตามตารางค่าที่ f_c ปรากฏขณะเดียวกันกับที่เรากำหนดค่า f_c เราจะได้ค่า C ต่าง ๆ ตามตาราง เมื่อเลือกค่า C ที่ปรากฏก็สามารถหาค่า parameter K ได้ หลังจากนั้นก็สามารถหาค่า C และ R อื่น ๆ ในวงจรตามตารางที่กำหนด

ตัวอย่างการออกแบบเช่น เรากำหนดความถี่ f_c ที่ 1000 Hz จากรูปตารางที่ 2.10b เราเลือก C ระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- ในที่นี้ถ้าเลือกค่า C มีค่า 0.01 μF
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

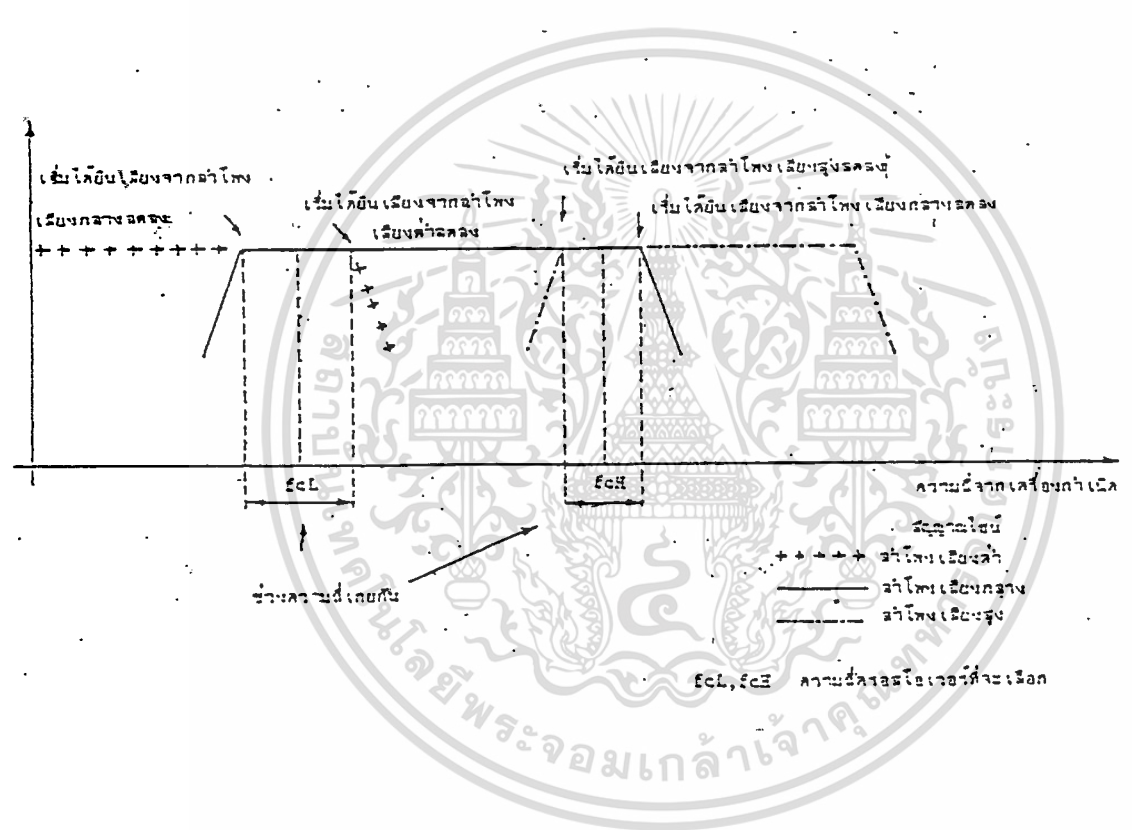
สนองตอบ ความถี่ต่ำจากจุดคัทออฟลงมาว่ามีความชัน (Slop) มากน้อยเพียงใด มักบอกเป็นหน่วย ดีบี/ออกเตป (db/octave) หมายความว่าเอาที่พุกของฟิลเตอร์จะลดลงเท่าใด (dB) เช่นการสนองตอบของ HPF มี roll off -6dB/octave หมายความว่า ณ ความถี่ต่ำกว่าจุดคัทออฟ $f_{\text{CH}}/2$ จะมีเอาที่พุก -9 dB และต่ำกว่า 4 เท่าจะมีเอาที่พุก -15 dB เป็นต้นขนาดของโรลออฟจะสัมพันธ์กับออ เดอร์

ออเดอร์ (Order) จะมีความสัมพันธ์กับค่า roll off ของฟิลเตอร์หากฟิลเตอร์ออเดอร์สูง ๆ ค่า roll off จะสูงด้วย เช่นบอกว่าฟิลเตอร์ออเดอร์ 1 มี roll off -6dB/octave แล้ว ฟิลเตอร์ออเดอร์ 2 จะมี roll off -12 dB/octave ฟิลเตอร์ออเดอร์ 3 จะมี roll off -18 dB/octave จะเห็นว่าค่า roll off จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าตามออเดอร์ ดังนั้นจำนวนออเดอร์จะบอกได้ว่าฟิลเตอร์นั้น ๆ จะสามารถตัดความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้งได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งการสร้างแอกทีฟ ฟิลเตอร์ออเดอร์สูง ๆ ทำได้ยากกว่าฟิลเตอร์ออเดอร์ต่ำ ๆ

3.3 การเลือกใช้ครอสโอเวอร์ 2 ทางหรือ 3 ทาง

จำเป็นต้องทดสอบลำโพงที่มีอยู่ โดยการทดสอบว่าลำโพงที่มีอยู่จะมีการตอบสนองความถี่ครอบคลุมความถี่ได้อย่างไร โดยการต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณไฮท์ เข้าอินพุตแอมป์ไพร์ตั้งแอมป์ไว้ในตำแหน่ง Flat ครั้งแรกลองกับลำโพงเสียงต่ำก่อน ตั้งความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ 100 เฮิรท์ ขนาดของสัญญาณพอได้ยินทางลำโพง ค่อย ๆ ปรับความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณจะเพิ่มช้า ๆ จนถึงจุดซึ่งได้ยินเสียงจากลำโพงเริ่มลดลง ให้จดความถี่ตรงนั้นไว้ จากนั้นเปลี่ยนเป็นลำโพงเสียงสูง โดยเริ่มที่ความถี่ 5 กิโลเฮิรท์ป้อนเข้าแอมป์ตั้งขนาดให้ได้ยินเสียงชัดเจน ค่อย ๆ ปรับความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณลงช้า ๆ จนถึงจุดซึ่งได้ยินจากลำโพงเริ่มลดลงนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้วัดครั้งแรก หากความถี่สองอันมาเกยกัน อย่างเช่นครั้งแรกวัดได้ 5 กิโลเฮิรท์ ครั้งที่สองวัดได้ 1 กิโลเฮิรท์ ก็แสดงว่าลำโพงทั้งสองตัวครอบคลุมความถี่ตลอดย่านความถี่เสียง สามารถนำลำโพงทั้งสองตัวมาประกอบเป็นวงจร 2 ทางได้ แต่ถ้าการทำสองครั้ง ความถี่ที่วัดไม่เกยกัน และไม่ครอบคลุมตลอดย่านความถี่เสียง ก็นำมาใช้ไม่ได้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ต้องเพิ่มลำโพงเพื่อครอบคลุมความถี่ส่วนที่หายไป โดยเพิ่มเป็นวงจร 3 ทาง เป็นต้น ต่อจากนี้จึงเลือกจุดคัทออฟหรือครอสโอเวอร์ เลือกวงจรหรือชนิดของฟิลเตอร์ หาค่าส่วนประกอบของวงจรโดยการคำนวณหรือตารางเปรียบเทียบ



รูปที่ 16 การเลือกความถี่ครอสโอเวอร์ของระบบสามทางอย่างคร่าว ๆ โดยการฟัง

บทที่ 4

แนวคิดในการสร้างวงจร

Active Phase Linear Crossover Network

4.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวงจร Active cross-over network

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวงจร Active cross-over network ซึ่งมักเกิดขึ้นกับวงจร 2 ทางหรือ 3 ทาง ซึ่งประกอบด้วยวงจร LPF, HPF, BPF นั้นเกิดขึ้นจาก Time Delay ของวงจร โดยที่วงจร LPF ทำให้สัญญาณช้าลง ส่วน HPF จะทำให้สัญญาณเร็วขึ้น อันจะเป็นผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับวงจร Active cross-over network ที่จุดตัด คือ

1. ทำให้สัญญาณจากสองส่วนลดสัญญาณจากอีกส่วนหนึ่งออก
2. ความแตกต่างของ Phase ระหว่างสัญญาณทั้งสอง มีผลกับประสิทธิภาพการกระจายของสัญญาณ (Radiation) ของระบบ
3. รูปแบบของการกระจายคลื่น Radiation Pattern จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่

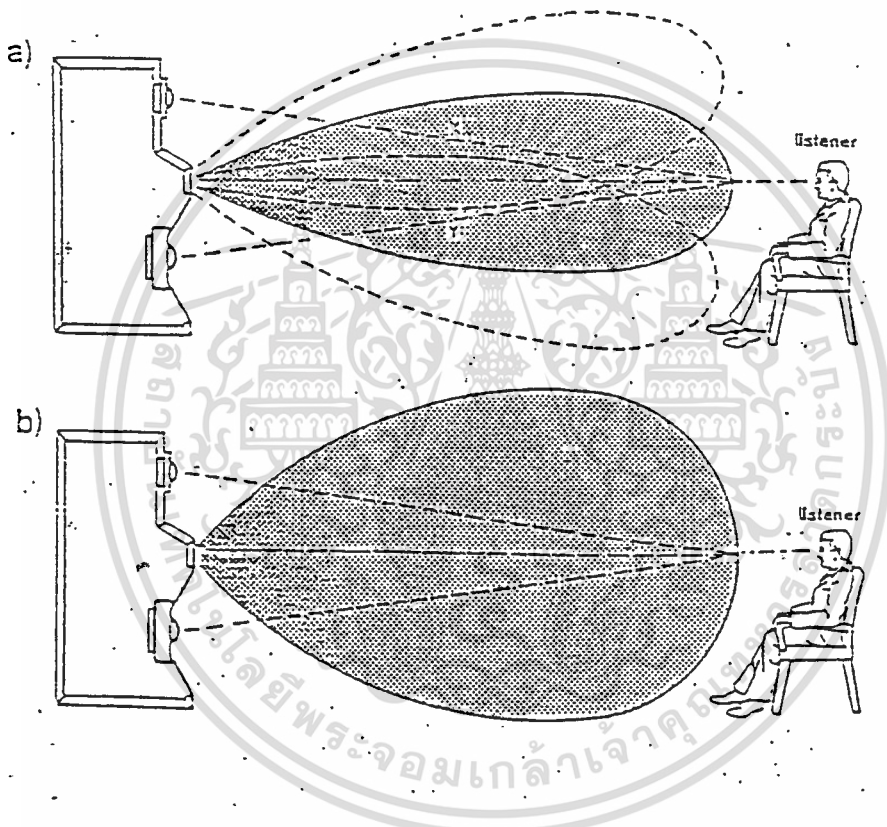
เมื่อไม่นานมานี้ Stanley Lipshiz และ John Van derkooy ซึ่งได้เขียนบทความลงในนิตยสาร Elector Electronic เสนอแนวทางเพื่อแก้ปัญหาจากข้อบกพร่องดังกล่าว โดยใช้วงจรที่เรียกว่า Phase-Linear cross-over network

การทำให้ phase Linear โดยใช้วงจร LPF ที่มีความถี่ต่ำ ซึ่งสามารถทำให้ความถี่สูงในขณะเดียวกัน ด้วยวิธีเพิ่มวงจร Time delay และนำมาลบกันเข้าช่วย ถึงแม้ว่าวงจร Time delay จะไม่สามารถทำความถี่ได้คงที่ตลอดย่านความถี่อย่างแน่แท้ แต่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ช้ามาก ผลที่ได้จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของ Phase ระหว่าง out-put ของสัญญาณทั้งสอง โดยเฉพาะในย่านความถี่ ที่จุดตัดหรือ cross-over point

4.2 Radiation pattern ของระบบ cross-over network

รูปแบบของ radiation pattern ของลำโพงตามระบบ cross-over network เดิม ซึ่งมี pattern คอนข้างแคบตลอดทั้งที่ ตามทิศทางของลำโพง โดยที่การไม่ว่าการมีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจาย pattern จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ อันเนื่องเหตุให้ Lobe เกษีหรือลดลง แต่ในกรณีของวงจร Phase linear จะมีผลให้ Lobe ขยายกว้างขึ้นกว่าเดิม ฟุ้งไปข้างหน้าตลอดย่านความถี่ เมื่อผู้ฟังอยู่ตรงกลางของแนวนอน ตามรูป a แบบทั่วไป b) Radiation pattern ของ phase Linear cross-over network



รูปที่ 17 แสดง vertical vadiation a) Conventional network

b) Phase Linear network

จากแนวคิดในการสร้างวงจร Phase Linear ดังกล่าวแล้ว ยังพบว่ายังมีปัญหาที่

ต้องนำมาแก้ไข 2 ประการคือ

1. ยังมี phase shift เหลืออยู่ แต่ไม่มีปัญหาด้านสัญญาณลดทอนลงตลอดย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความถี่ การแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Phase shift เกิดจากตัววงจรเองมากกว่าเกิดจากวงจร filter ถึง 2 เท่า

ดังนั้นจึงทำให้มองเห็นว่า วงจรความถี่ต่ำต้องเลือกใช้ order คู่ เช่น

2, 4, 6, ... โดยนัยนี้จึงเลือก order ที่ 4 เป็นวงจร Filter ซึ่งเป็นวงจรที่ไม่ยุ่งยากมาก

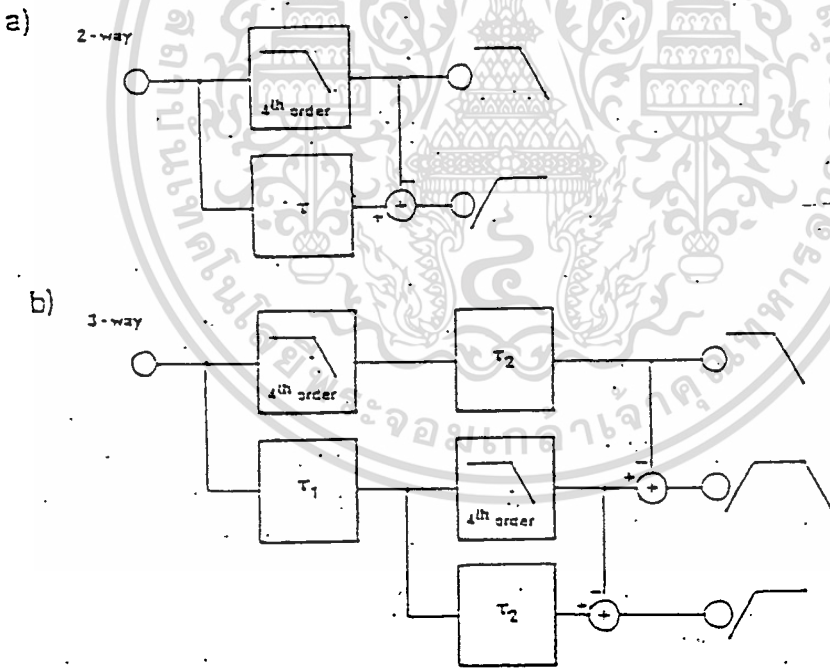
นัก โดยใช้วงจร order ที่ 2 มาทำการต่อ cascade เข้าทำเป็นวงจร Filter order ที่

4 เพื่อให้ได้วงจรที่มี phase เดียวกัน ตามแนวคิดดังกล่าวจึงได้ผลเป็นวงจรที่มี phase

เดียวกัน มี cross over frequency ที่ - 6 dB point ไม่มี phase shift ระหว่างช่วง

สัญญาณ ตามภาพรูปบล็อกไดอะแกรม

4.3 Phase linearity กับรูปแบบของวงจร



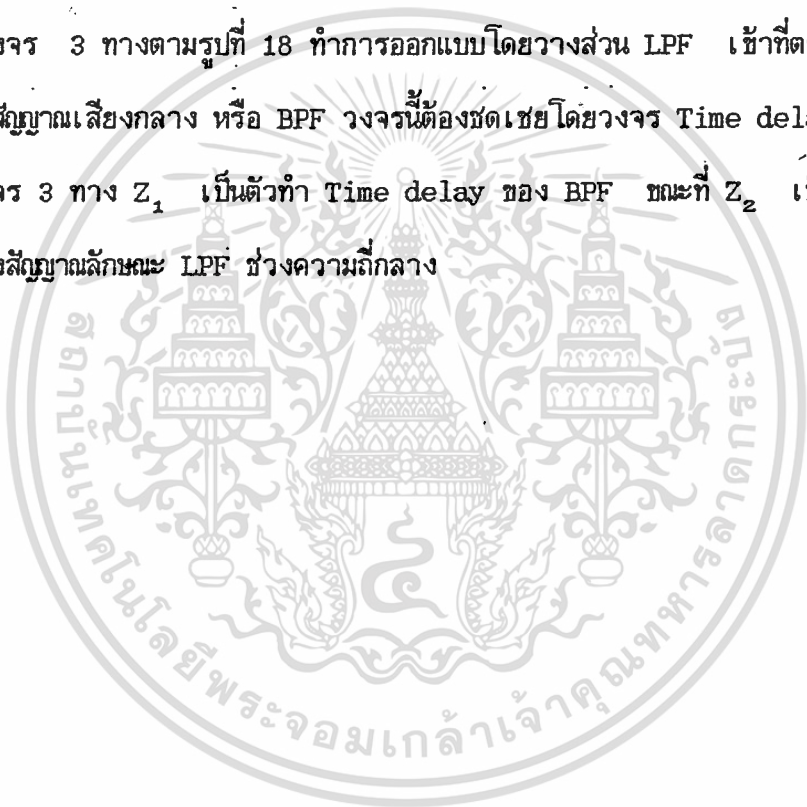
รูปที่ 18 Basic phase-linear filter (a) two-way

(b) Three way

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปวงจร 2 ทาง Time delay เป็นวงจรที่สำคัญที่จะช่วยให้ Phase linearity เมื่อนำสัญญาณทั้งสองมารวมกันเป็นลักษณะวงจรถบ จะเป็นผลได้ความถี่ 2 ทางตามต้องการ คือสัญญาณความถี่ต่ำ และสัญญาณความถี่สูง โดยที่วงจร LPF ใน order ที่ 4 รับสัญญาณเข้า ผ่านสัญญาณความถี่ต่ำออกทาง out-put ขณะที่สัญญาณเข้าอีกด้านหนึ่งผ่านวงจร Time delay Z ที่ออกแบบวงจรให้มี phase เดียวกันกับวงจร LPF และทำงานเป็นวงจร All pass filter เมื่อสัญญาณผ่านวงจร Z สัญญาณรวมกันจะเหลือสัญญาณเป็นสัญญาณของ HPF ซึ่งมี phase เดียวกันกับวงจร LPF

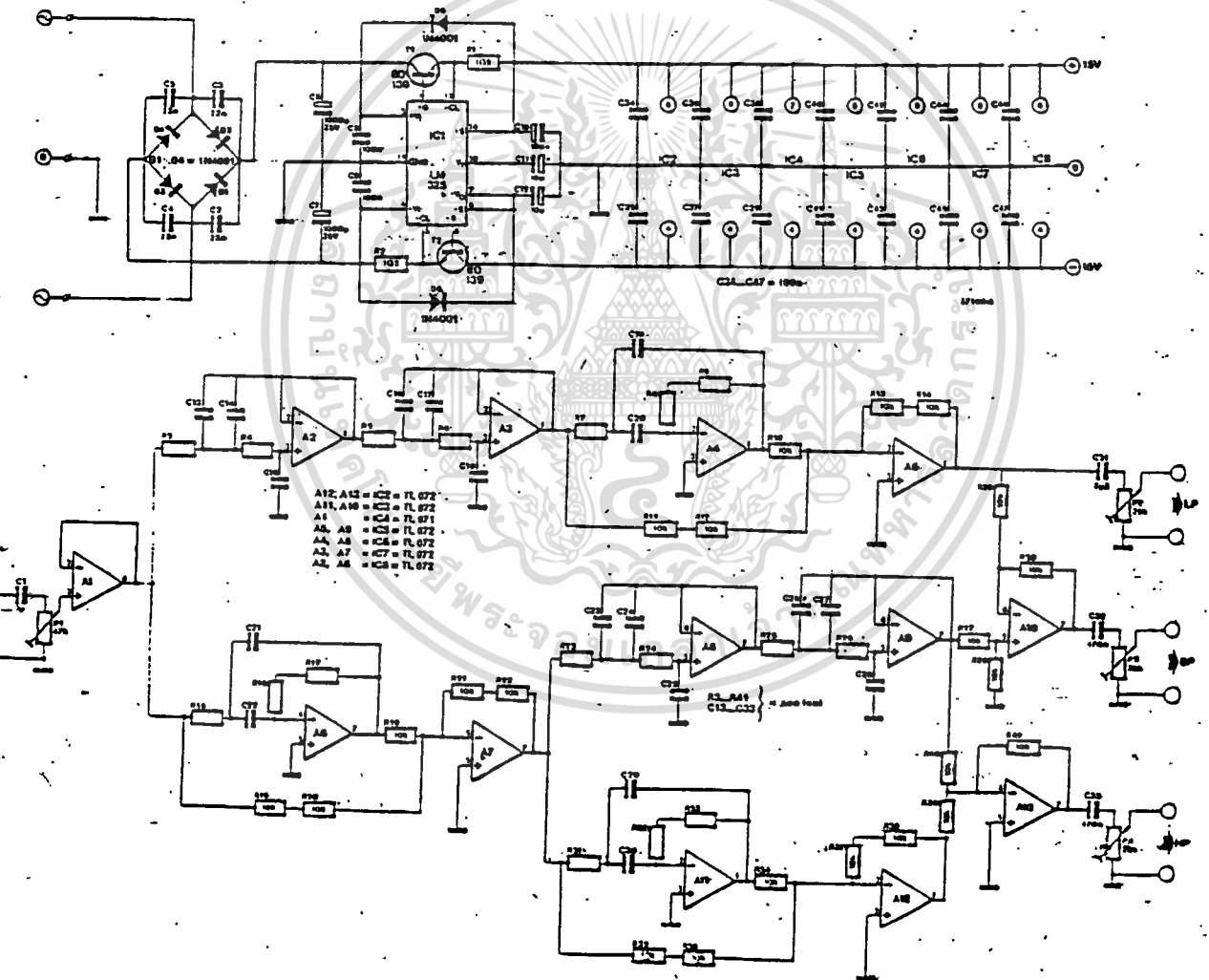
ในวงจร 3 ทางตามรูปที่ 18 ทำการออกแบบโดยวางส่วน LPF เข้าที่ตรงกลาง เพื่อต้องการให้ได้สัญญาณเสียงกลาง หรือ BPF วงจรนี้ต้องขาดเซย์โดยวงจร Time delay ส่วนที่ 2 ดังนั้นในวงจร 3 ทาง Z_1 เป็นตัวทำ Time delay ของ BPF ขณะที่ Z_2 เป็นตัวทำ Time delay ของสัญญาณลักษณะ LPF ช่วงความถี่กลาง



บทที่ 5

การสร้างวงจรสำหรับใช้งาน

รูปที่ 19.1 รูปแบบของวงจรที่นำมาใช้



รูปที่ 19 Circuit diagram of the phase-linear network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามวงจรในรูปที่ 19 สามารถที่จะอธิบายหน้าที่และการทำงานของวงจรแต่ละส่วนได้ดังนี้ วงจร Op-Amp A_1 ทำหน้าที่เป็น Buffer ระหว่างสัญญาณ input และวงจร filter ที่รับสัญญาณในวงจร phase-linear network กรณีที่มีความจำเป็นจะทำการลดสัญญาณ input ด้วย P_1 วงจรขยายรวมเป็นหน่วยเดียวกัน

วงจรความถี่ต่ำ ประกอบด้วย A_2 และ A_3 ขณะที่วงจรวจร A_6 และ A_7 เป็นวงจร All pass filter วงจร A_7 เป็นวงจรขยายเพื่อชดเชยการลดทอนสัญญาณของวงจร A_6

วงจร Low pass filter ย่านความถี่กลางประกอบด้วยวงจร A_8 และ A_9 โดยมีวงจร All pass filter อันประกอบด้วย A_4 และวงจร A_5 เป็นวงจรเสริม เพื่อให้ได้ความถี่ย่านเสียงกลาง

ดังนั้นย่านความถี่กลางตามวงจร out-put ของ A_5 นำมาลกับสัญญาณจาก A_9 ที่ A_{10} จะได้ย่านความถี่ขนาดกลาง

ส่วนสุดท้ายประกอบด้วยวงจร All pass filter ซึ่งมี A_{11} และ A_{12} เมื่อสัญญาณ out-put จากวงจร A_9 มาลกับสัญญาณจาก A_{12} ที่วงจร A_{13} จะได้ความถี่ย่านความถี่สูง

5.2 การคำนวณหาค่า R,C และส่วนประกอบของวงจร

ในการคำนวณหาค่า R,C ของวงจรต่าง ๆ นั้น หาได้จากการคำนวณโดยสูตรการคำนวณพื้นฐานของวงจร filter ซึ่งเป็นวงจรชนิด Butter worth ดังนี้

วงจร A_2 จากการเลือกคุณสมบัติของ Op-Amp สามารถเลือก IC.TL072

วงจร A_2 เป็นวงจรชนิด low-pass filter ชนิด Butter worth มีสูตรการ

คำนวณ

$$f_H = 1/(2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2})$$

เลือกค่า $C = 10 \text{ nF}$

ตามปรกติค่า $C_1 = C_2$

ดังนั้นค่าในวงจร $C_1 = 10 \text{ nF}$

$C_2 = 20 \text{ nF}$

ตามวงจรที่นำมาใช้งาน คือวงจร A_2

C_1 คือ $C_{15} = 10 \text{ nF}$

C_2 คือ $C_{14} + C_{15} = 20 \text{ nF}$

เมื่อแทนค่าในวงจร A_2 จะได้

$$500 = 1 / 6.28 \sqrt{R_1 R_2 (10 \times 10^{-9}) (20 \times 10^{-9})}$$

$$500 = 1 / 6.28 \times 10^{-9} \times 14.142 \sqrt{R_1 R_2}$$

$$\sqrt{R_1 R_2} = 10^9 / (6.28 \times 14.142 \times 500)$$

แต่ $R_1 = R_2$

$$\therefore R = 22.507 \text{ K.ohm}$$

$$\cong 22 \text{ K ohm}$$

ดังนั้นในวงจรของ A_2 จึงเลือกค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

เลือกค่า R_3 และ R_4 ได้ค่า 22 K ohm .

" C_{13}, C_{14}, C_{15} ได้ค่า 10 nF

-วงจร Low pass filter ใน order ที่ 4 ประกอบด้วย A_2 และวงจร A_3

ใน order ที่ 2 ทำวงจร A_2 และ A_3 มาต่อ cascade กัน จะได้วงจร order ที่ 4 โดย

ใช้ IC เบอร์ TL072 เหมือนกัน และค่า R, C ในวงจรทุกค่าที่ค่าเท่ากันทั้งสองวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณหาค่า Phase ของวงจร Low pass filter ของวงจร A_2 และวงจร A_3

จากสูตร $\theta = -\tan^{-1} (f/f_H)$

เมื่อ f = frequency of input signal.

$$f_H = 1/2\pi RC$$

$$f = 500\text{Hz} \text{ ความถี่ที่จุดตัดของ Low pass filter}$$

$$f_H = 1/(2\pi \times 22 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9})$$

$$\theta = -\tan^{-1} 500 \times 2\pi \times 22 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9}$$

$$\approx -35^\circ$$

= ค่า phase ที่ความถี่จุดตัด

วงจร A_4 เป็นวงจร All pass filter จำเป็นตั้งที่วงจรให้ได้ Phase เช่นเดียวกับวงจร Low pass filter ในวงจร A_2 และ A_3 โดยหาค่า R และ C ในวงจร A_4 ดังนี้

ให้ค่า C ของวงจรมีค่า 1nF ที่ความถี่ 500 Hz ทำการหาค่า R, C โดยวิธี Parameter ตามตารางกราฟของ John.L. Hilburn และ David E. Johnson ตามหนังสือ ชื่อ Manual of Active filter design ตามตารางกราฟที่แนบมาภาคผนวก

เลือกค่า C ของวงจร 1 nF ตามตารางการเลือกค่า C ตามค่าที่กำหนดจะได้ค่า K ในตารางที่ 6.7 (c)

นำค่า K ที่ได้จากราย 6.7(c) มาเทียบหาค่า R ของวงจรในตารางที่ 6.11 โดยใช้ phase ใกล้เคียงกับค่าในวงจร A_2, A_3 จะได้ค่า R และ C ของวงจร A_4 ดังนี้

$$C_{19} = C_{20} = 1 \text{ nF}$$

$$R_8 = R_9 = 22 \text{ K}\Omega$$

นำค่า R,C ที่ได้ไปประกอบเป็นวงจร All pass filter A₄ โดยใช้ IC LF

356

จากการได้ค่า phase ของวงจร A₄ ในตารางโดยวิธี Parameter นำมา เปรียบเทียบกับการคำนวณ เพื่อให้ได้สัญญาณ out-put ของวงจร All pass filter A₄ มี phase เท่ากันกับสัญญาณ out-put ของวงจร Low pass filter ที่ A₂ และ A₃ ได้ดังนี้

$$\text{จากสูตรการคำนวณ } \theta = -2 \text{ Arctan } (aw/b-w^2)$$

$$\text{เมื่อ } a = 2/R_2C$$

$$b = 1/R_2R_2C^2$$

$$\text{ค่า } C = 2 \text{ nF}$$

$$R_1 = 22 \text{ K ohm}$$

$$R_2 = 44 \text{ K ohm}$$

$$\text{ความถี่ที่จุดตัด } f = 500 \text{ Hz}$$

$$\therefore \theta = -2 \arctan \frac{\left[\frac{2}{(44 \times 10^3)(2 \times 10^{-9})} \right] \left[2\pi \times 500 \right]}{\left[\frac{1}{(22 \times 10^3)(44 \times 10^3)(2 \times 10^{-9})^2} \right] - \left[2 \times 500 \right]^2}$$

$$= -32^\circ \quad \doteq \quad -35^\circ$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า Phase ของวงจร All pass filter A₄ ที่ความถี่ 500 Hz ได้เท่ากับค่า Phase ของวงจร Low pass filter A₂ และ A₃ สัญญาณ out-put ที่ออกจาก A₄ จึงเป็นสัญญาณความถี่ต่ำ

5.3 การหาค่า RC และส่วนประกอบของวงจรสัญญาณความถี่กลางและสูง

(Band pass filter and High pass filter)

ตามรูป circuit diagram วงจร A_8 เป็นวงจร All pass filter ที่มีการทำงานและรูปแบบของวงจรเหมือนกันทุกประการกับวงจร All pass filter ในวงจร A_4 จึงสามารถเลือกค่า R,C และ IC เช่นเดียวกับวงจร A_4

วงจร A_8 และวงจร A_9 เป็นวงจร Low pass filter ซึ่งมีจุดตัดกำหนดค่าความถี่ไว้ที่ 5 KHz นำไปหาค่า R,C เช่นเดียวกับการหาค่าในวงจร A_2 และ A_3 จะได้ค่าจากการคำนวณแล้วดังนี้

$$R_{23}, R_{24} = 22 \text{ K ohm}$$

$$R_{25}, R_{26} = 22 \text{ K ohm}$$

$$C_{23}, C_{24} = 1 \text{ nF}$$

$$C_{25}, C_{26} = 1 \text{ nF}$$

$$C_{27}, C_{28} = 1 \text{ nF}$$

การหาค่า phase ของวงจร A_8 และ A_9 ทำได้ดังนี้

$$\text{สูตร } \phi = -\tan^{-1} (f/f_H)$$

$$f_H = 1/2\pi RC$$

$$f = 5 \text{ KHz}$$

$$R = 22 \text{ K ohm}$$

$$C = 1 \text{ nF}$$

$$\phi = -\tan^{-1} [(5 \times 10^3) / (2\pi(22 \times 10^3)(2 \times 10^{-9}))]$$

$$= -34.6^\circ$$

$$\therefore -35^\circ$$

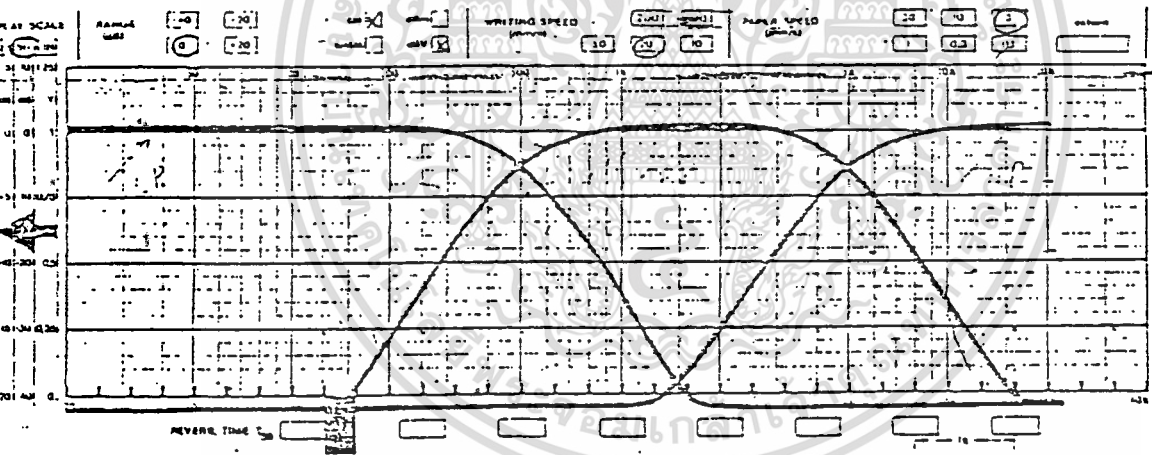
วงจร A_{11} มีค่า R,C และ IC เบอร์เดียวกับกับวงจร A_4 จึงมี phase เท่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญต์ให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกี่ยวกับวงจร A_8 และ A_9 คือ -35°

- นำสัญญาณ out-put ของวงจร Low-pass filter A_8, A_9 มาลบกับสัญญาณ out-put ของสัญญาณ A_{12} แล้วผ่านวงจร A_{13} จะได้สัญญาณ out-put เป็นสัญญาณความถี่เสียงสูง

- ความถี่เสียงกลาง เกิดจากสัญญาณ out-put ของวงจร Low pass filter ความถี่ 500 Hz จากวงจร A_8 และ out-put ของวงจร High pass filter ความถี่เริ่มต้น 5 KHz สองวงจรมารวมกันที่ A_{10} จะเกิดเป็นวงจร Band pass filter ซึ่งมีช่วงความถี่ stop band ระหว่าง 500 Hz ถึง 5000 Hz เป็นความถี่เสียงกลาง

จากวงจรที่ได้คำนวณมาแล้ว จะได้ความถี่ cross-over เป็นวงจร Three way phase linear network ตามรูปที่ 20

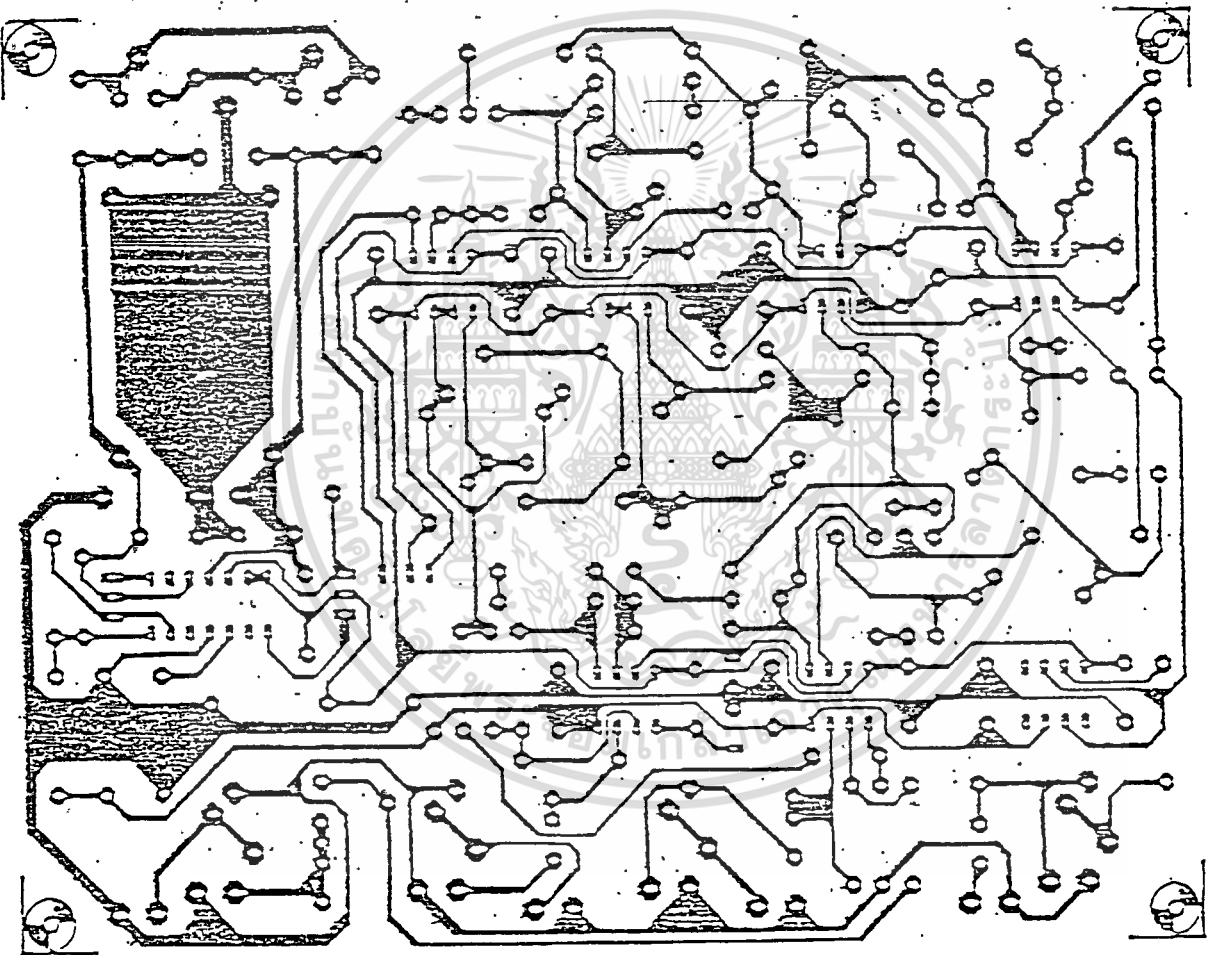


รูปที่ 20 ความถี่ cross-over วงจร Three way phase linear network

ตามรูปที่ 20 จากการคำนวณ หลักการและแนวคิด จะสามารถสร้างวงจร Active phase linear cross-over network ที่เห็นวงจรสัญญาณออกทางลำโพง 3 ทาง โดยมีช่วงความถี่ของสัญญาณแบ่งออกเป็นสัญญาณช่วงความถี่ต่ำ ความถี่กลาง และย่านความถี่เสียงสูง ซึ่งช่วงความถี่ต่ำตั้งแต่ 0 Hz ถึง 500 Hz ช่วงความถี่กลางตั้งแต่ประมาณ 200 Hz ถึง 10 KHz และช่วงความถี่สูงประมาณ 3 KHz ขึ้นไป มีจุด cutoff หรือความถี่ cross-over ด้านการคำนวณนี้เป็นวงจรที่ง่ายและสะดวกในการคำนวณและปรับค่า ไม่ว่าการปรับใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 500 Hz ก็จุดตัดที่ 5 KHz

ขนาดของแผ่นพิมพ์ (print circuit) แสดงขนาดแผ่นพิมพ์เท่าของจริงตามรูปที่ 21



รูปที่ 21 แผ่นพิมพ์เท่าขนาดของจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ส่วนประกอบของวงจร (parts list)

Resistors

$$R_1, R_2 = 1 \text{ K } 5\text{J}$$

$$R_3 \text{ to } R_9; R_{15} \text{ to } R_{17}; R_{23} \text{ to } R_{25}; R_{31} \text{ to } R_{33} = 22 \text{ K } 5\text{F}$$

$$R_{10} \text{ to } R_{14}; R_{18} \text{ to } R_{22}; R_{27} \text{ to } R_{30}; R_{34} \text{ to } R_{41} = 10 \text{ K } \text{F}$$

$$P_1 = 47\text{PJ cermet preset}$$

$$P_2 \text{ to } P_4 = 25\text{KJ cermet preset}$$

Capacitors

$$C_1 = 1 \mu\text{O plastic film}$$

$$C_2 \text{ to } C_5 = 22 \text{ n ceramic}$$

$$C_6; C_7 = 1000 \mu \text{ 25 V electrolytic}$$

$$C_8; C_9; C_{34} \text{ to } C_{47} = 100 \text{ n ceramic}$$

$$C_{10} \text{ to } C_{12} = 10 \mu ; 25 \text{ V electrolytic}$$

$$C_{13} \text{ to } C_{18}; C_{21}; C_{22} = 10 \text{ n; 2.5\% polypropylene}$$

$$C_{19}, C_{20}, C_{23} \text{ to } C_{30} = 1 \text{ no; 2.5\% polypropylene}$$

$$C_{31} = 2 \mu\text{Z plastic film}$$

$$C_{32}; C_{33} = 470 \text{ n plastic film}$$

Semiconductors

$$D_1 \text{ to } D_6 = 1\text{N}4001$$

$$T_1 = \text{BD } 139$$

$$T_2 = \text{BD } 140$$

$$\text{IC}_1 = \text{LM } 325$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆที่ $\text{IC}_2; \text{IC}_3; \text{IC}_5 \text{ to } \text{IC}_6 = \text{TL}072$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE5532 LF353 LM833 OP215

IC₄ = TL071; NE5534, LF356 OP27; OP15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากการทำการทดสอบตามตารางที่แสดง โดยทดลองที่ความถี่ตั้งแต่ ย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่กลาง และย่านความถี่สูงได้ผลตามตารางดังนี้

ผลการทดลอง (TEST DATA)

LOW FREQ		MIDDLE FREQ		HIGH FREQ	
FREQ (Hz)	LEVEL (dB) O/P	FREQ (Hz)	LEVEL (dB) O/P	FREQ (Hz)	LEVEL (dB) O/P
20	0	70	- 50	50	-
50	0	100	- 40	100	-
100	0	200	- 23.0	200	-
200	0	300	- 16.0	300	-
300	- 1.0	400	- 10.0	400	-
400	- 2.8	500	- 6.0	500	-
500	- 6.0	600	- 4.0	600	- 50
600	-9.4	700	- 3.8	500	- 40
700	-13.2	800	- 2.1	600	-33.0
800	-17.0	900	- 1.8	800	-28.5
900	-20.5	1K	- 1.7	1K	-28.0
1K	-23.5	1.5K	- 1.4	1.5K	-23.2
1.5K	-38.0	2K	- 1.4	2K	-14.2
2K	-48.5	3K	- 2.0	3K	-8.0
		4K	- 3.2	4K	-3.0
		5K	- 5.8	5K	-1.8
		6K	- 9.0	6K	-1.2
		7K	- 12.5	7K	-0.8
		8K	- 16.0	8K	0

LOW FREQ		MIDDLE FREQ		HIGH FREQ	
FREQ (Hz)	LEVEL (dB)	FREQ (Hz)	LEVEL (dB)	FREQ (Hz)	LEVEL (dB)
	O/P		O/P		O/P
		9K	- 19.5	9K	0.
		10K	- 22.6	10K	0
		15K	- 36	20K	0
		20K	- 47	30K	0

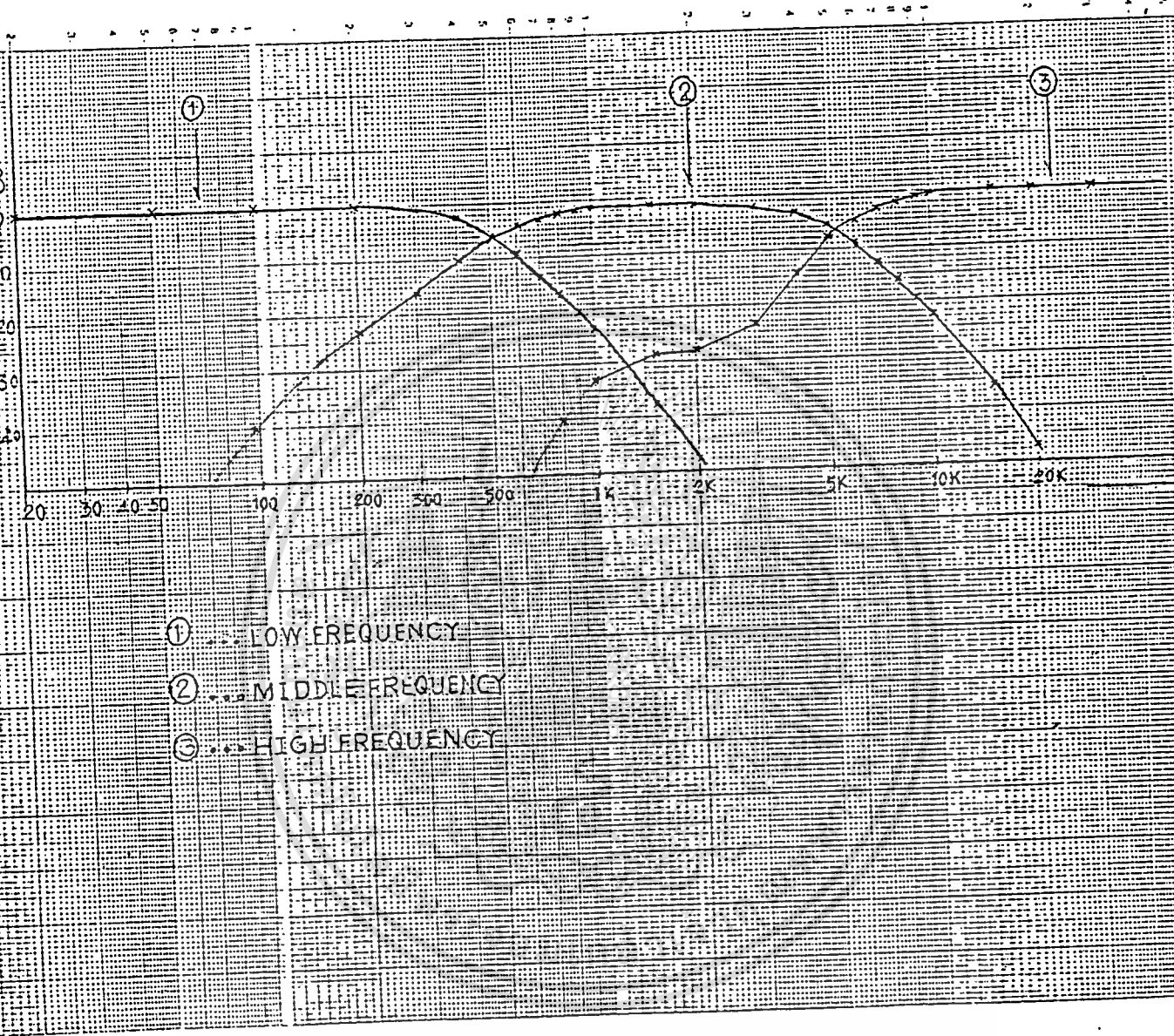
REMARK :- เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

1. Test Oscillator (hp-650A)

1. Level Meter (hp-400D)

หลังจากนำค่าตามตารางการทดลองนำมาหาจุด cut off ของวงจรที่สร้างจะได้

ผลตามรูปที่ 23



รูปที่ 23 ความถี่ cross-over และจุด cut-off frequency และ cross-over point

สรุปผลการทดลอง จากรูปกราฟที่ได้ plot แล้วสามารถสรุปได้ว่า วงจรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาคารสืบค้นเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สร้างได้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณและแนวคิดในการสร้างวงจร ส่วนที่ไม่ได้ตามทฤษฎีสามารถ
ไม่ว่ากรณีใดทางสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าเกิดจากค่าความผิดพลาด อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ R,C มีค่าผิดพลาด. ความถี่ย่านเสียงต่ำ เสียงกลาง และเสียงสูง ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎี cross-over point ที่ความถี่ 500 Hz และ 5 KHz สามารถจะนำหลักการของการสร้าง cross-over network ในระบบ Active phase-linear cross-over network ไปพัฒนาให้ดียิ่ง ๆ ขึ้น นำไปใช้งานในระบบ เครื่องเสียงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- นรินทร์ เนาวประทีป ออปแอมป์ กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์พิสิคส์เซ็นเตอร์, (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์)
- สุนทร พงศ์พันธ์ การออกแบบแอกทีฟครอสโอเวอร์: วารสารอิเล็กทรอนิกส์เทรนิคเวิลด์ ฉบับที่ 24 (ธันวาคม) 2526 หน้า 189-200
- สุนทร พงศ์พันธ์ การออกแบบแอกทีฟครอสโอเวอร์: วารสารอิเล็กทรอนิกส์เทรนิคเวิลด์ ฉบับที่ 25 (มกราคม) 2527 หน้า 108-111
- ไม่ปรากฏผู้เขียน แอกทีฟฟิลเตอร์: วารสารคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เทรนิคเวิลด์ ปีที่ 9 ฉบับที่ 94 (เมษายน) 2528 หน้า 40-47
- Gayakwad, Ramakant A. Op-Amps and Linear Integrated circuit (2nd ed.) New Jersey: Prentice-Hall inc, 1988.
- Hilburn, John L- & Johnson, David E. Manual of Active filter design New York: McGraw-Hill Book Company, 1973.
- Horn, Delton T. & Warring, R.H. 117 Practice IC projects your can build Blue Ridge Summit: TAB Book INC, 1986.
- Hughes, Fredrick W. Op-Amp Hand Book (2nd ed) New Jersey: Prentice Hall, 1986.
- Prensky., Sol D. Manual of Linear Integrated circuits Reston, Virginia: Reston Publishing Company, Inc., 1974.
- Stanley, Lipshitz & John, Vanderkooy . "Active Filter" Elector Electronic Journal April, 1987. pp.36-38
- Stanley, Lipshitz & John, Vanderkooy "Active Filter" Elector Electronic Journal September, 1987. pp.61-66.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

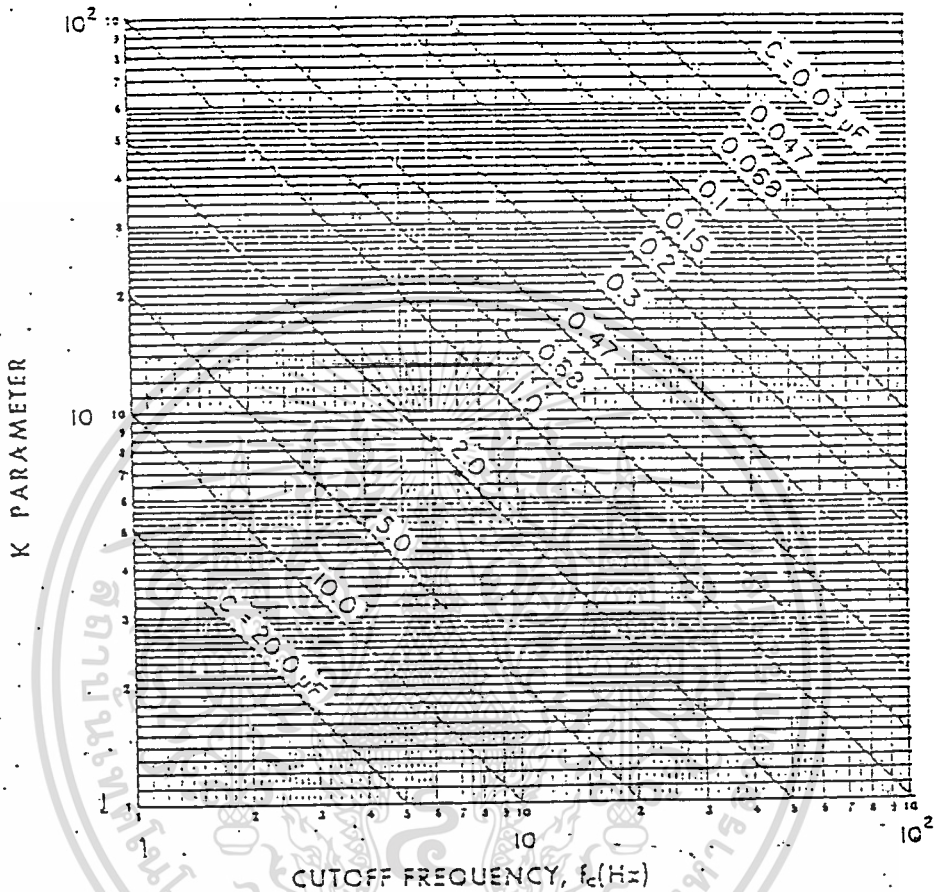


Fig. 2.10. (a) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

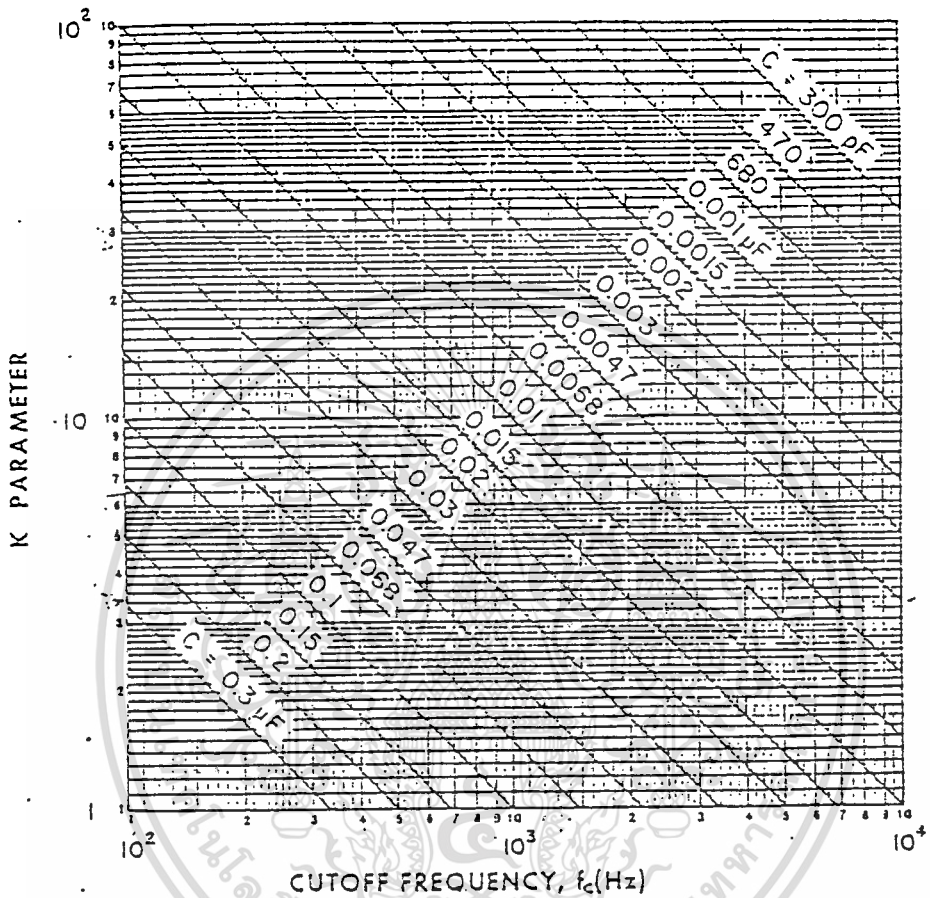


Fig. 2.10. (b) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

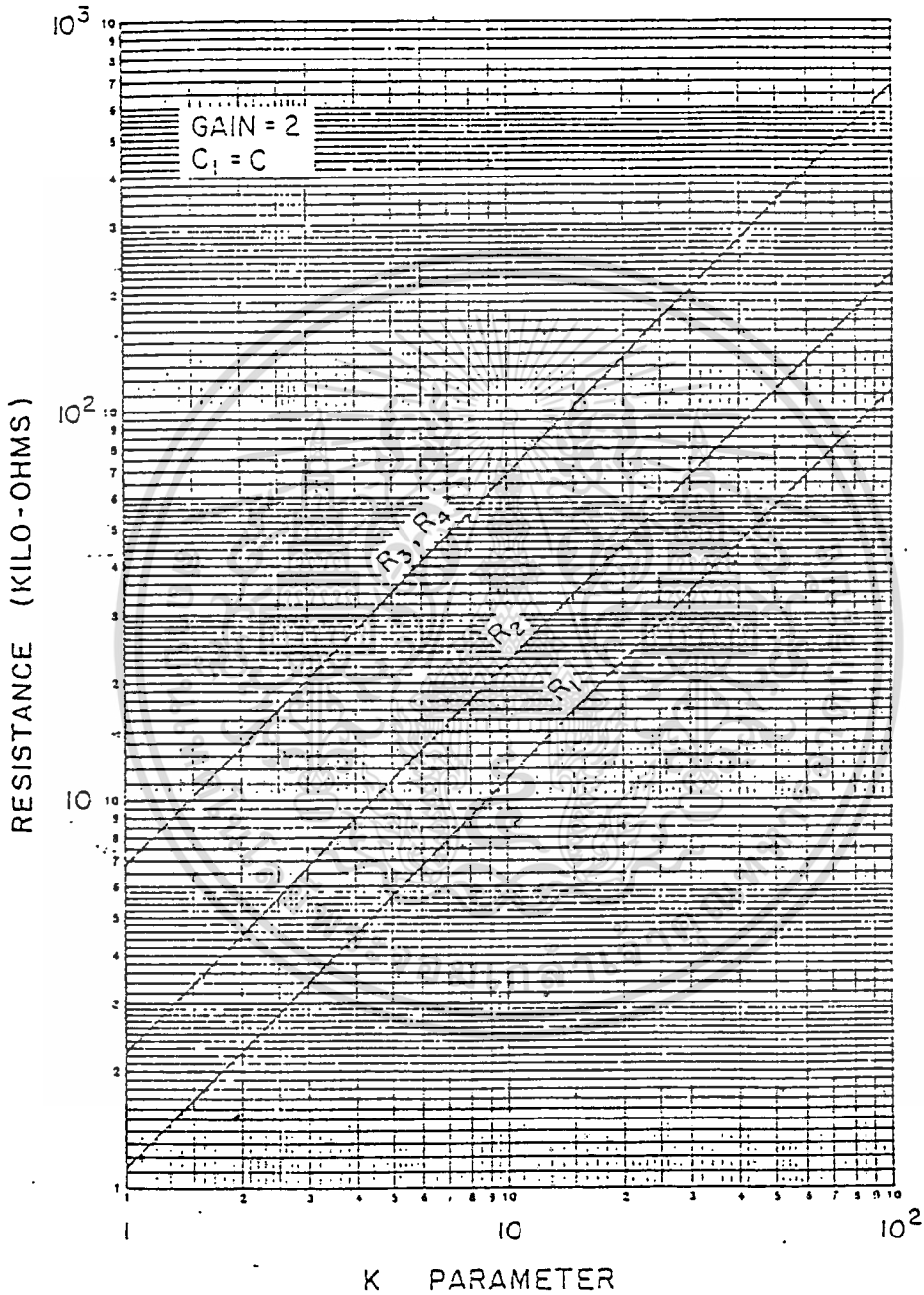


Fig. 2.11. Second-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

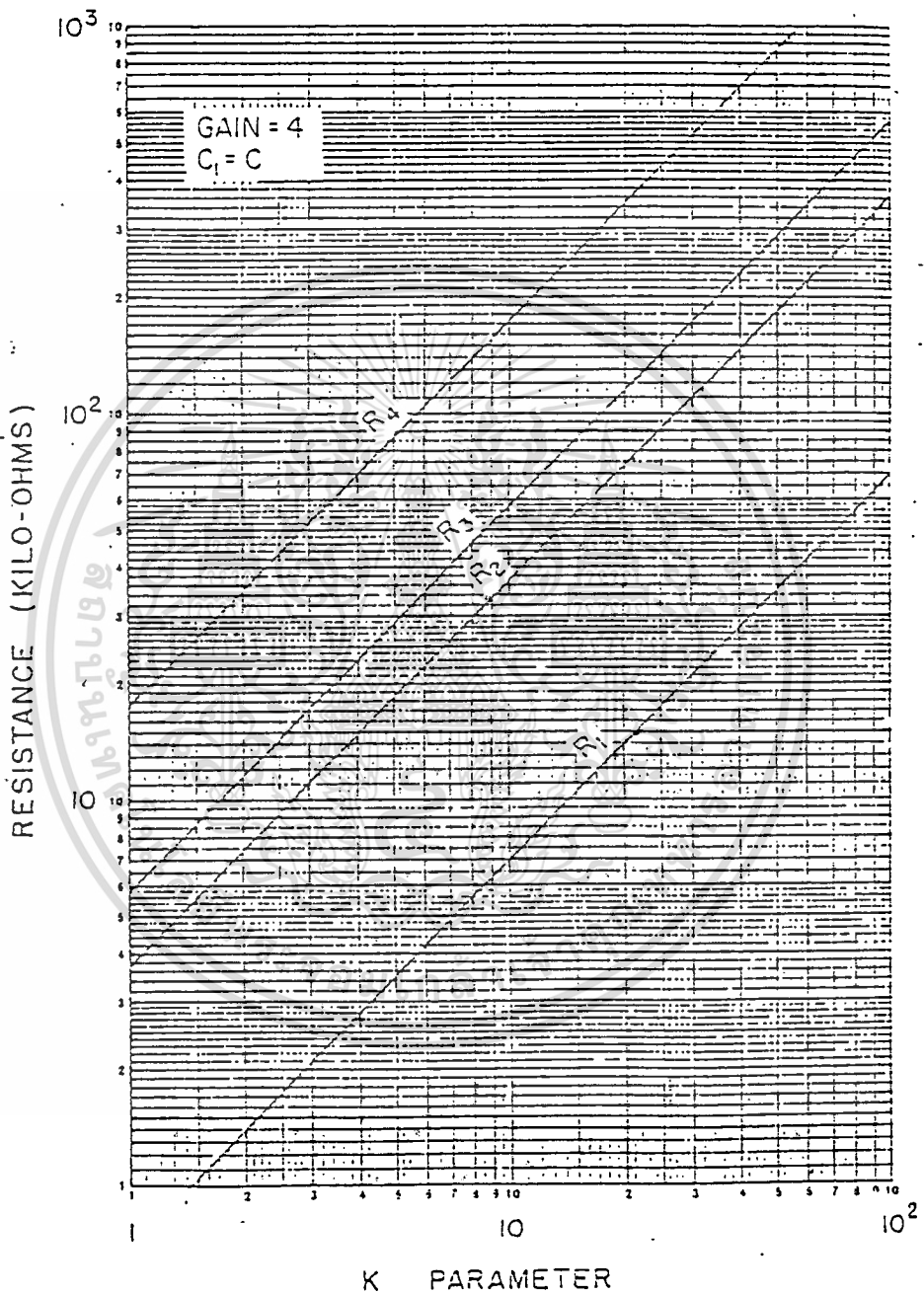


Fig. 2.12. Second-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

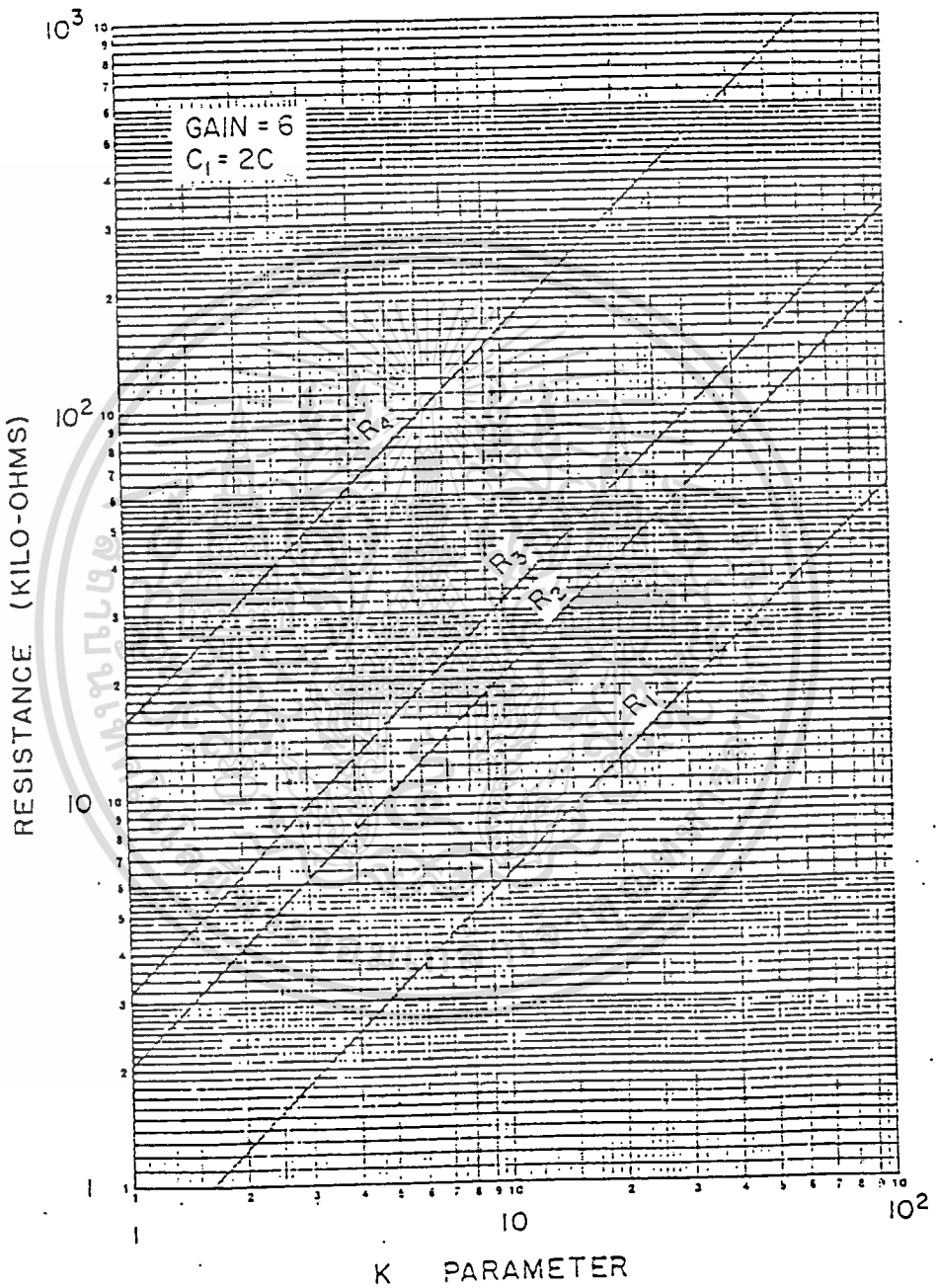


Fig. 2.13. Second-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

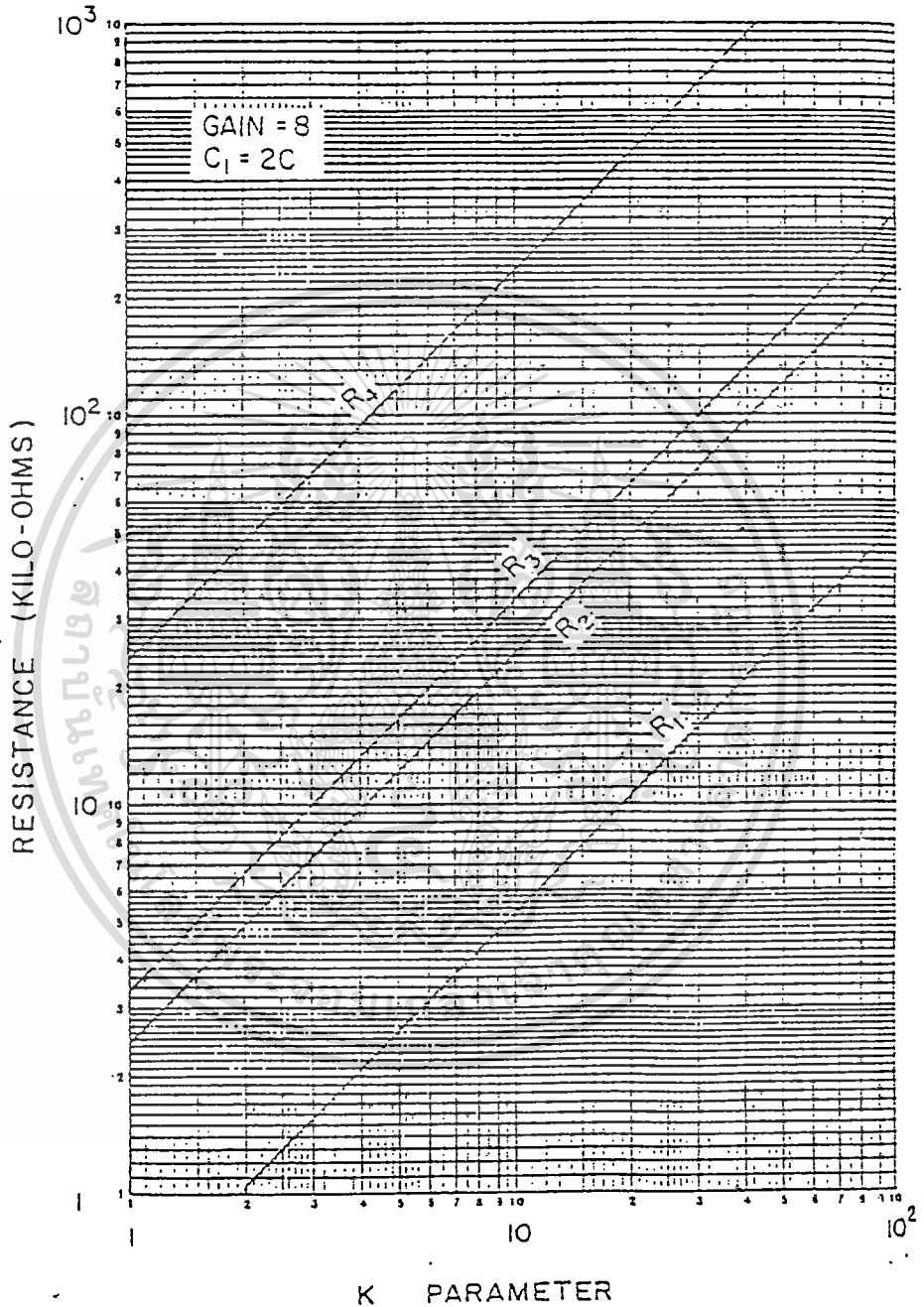


Fig. 2.14. Second-order low-pass Sutterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

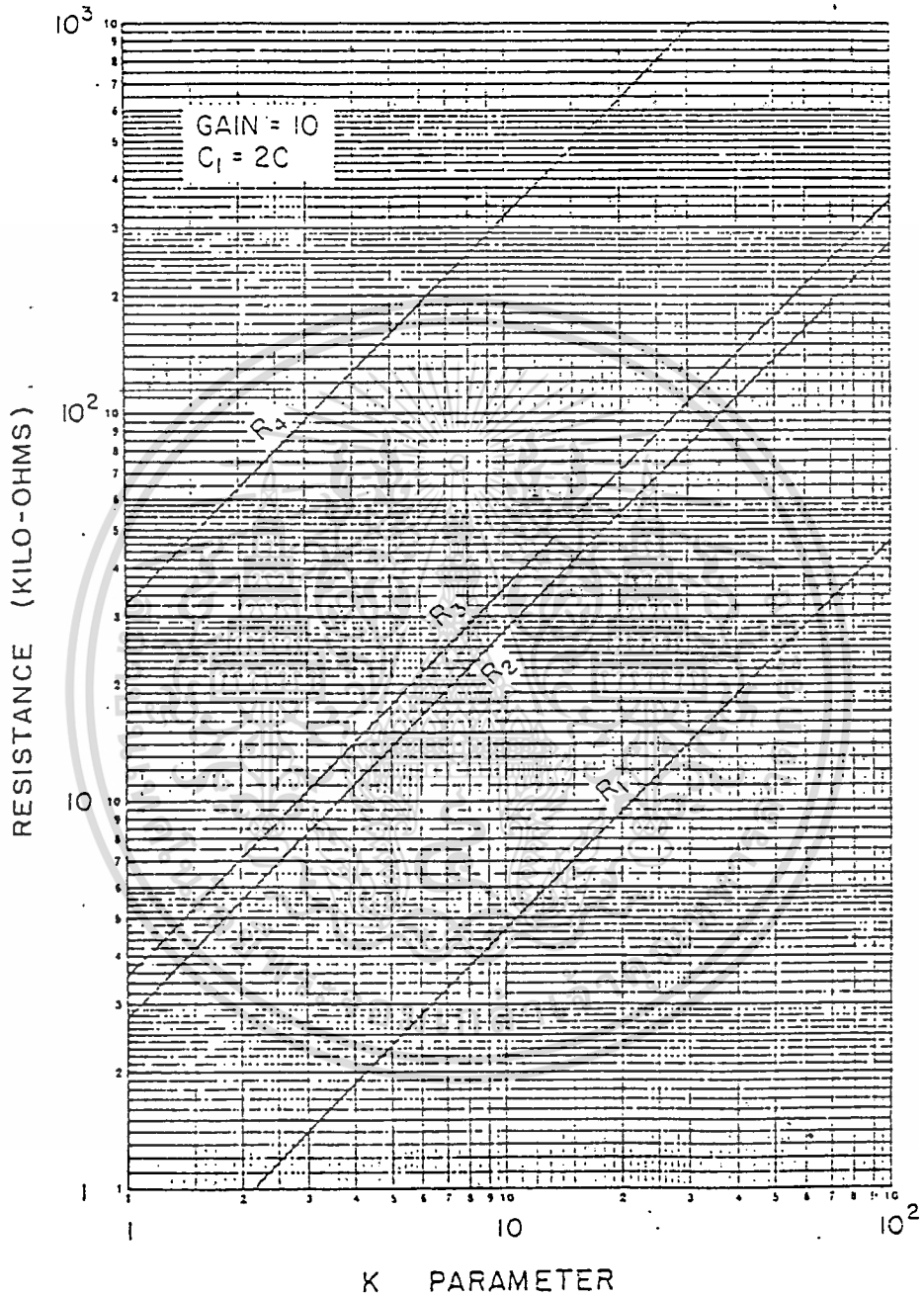


Fig. 2.15. Second-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

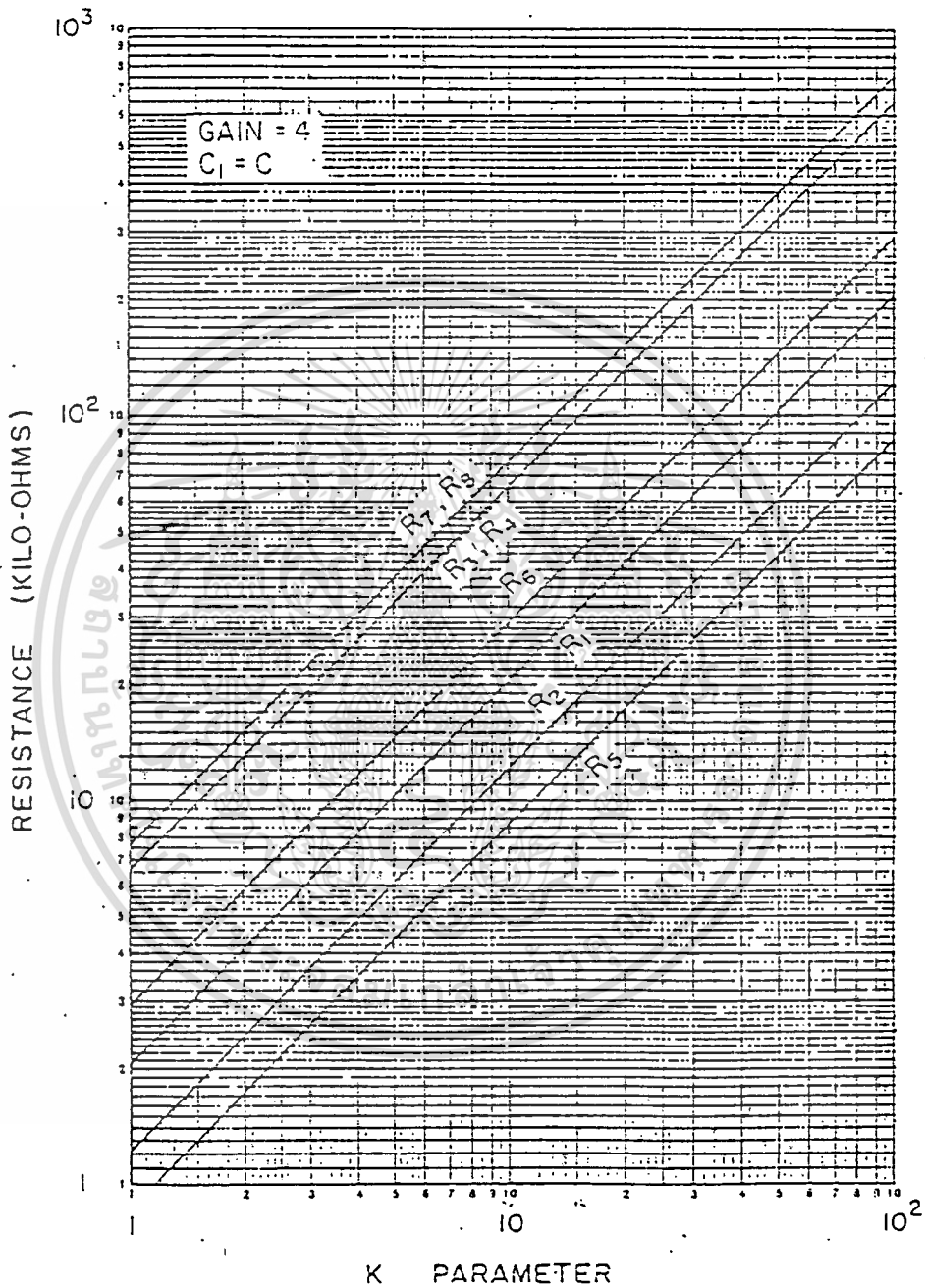


Fig. 2.26. Fourth-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

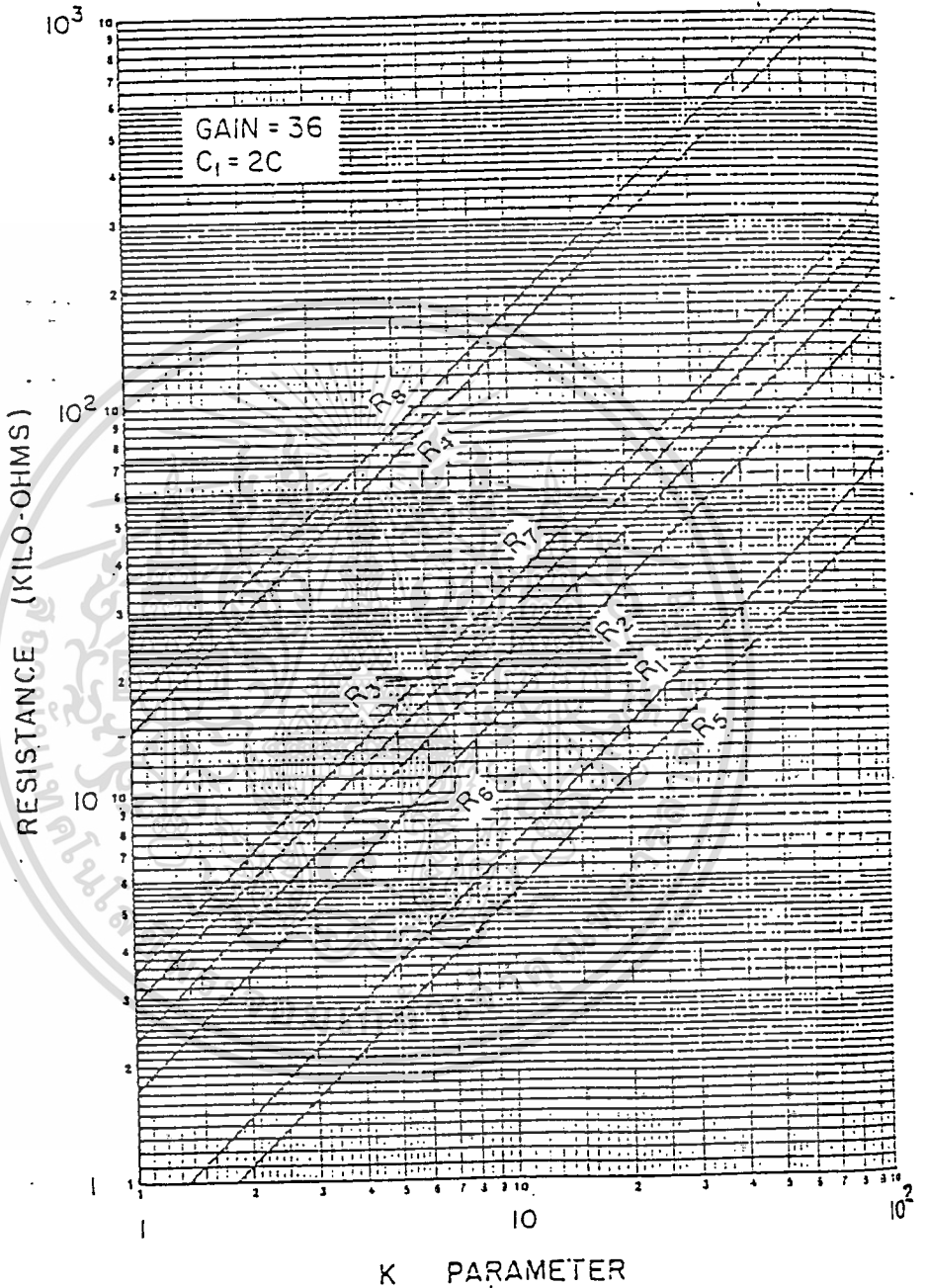


Fig. 2.29. Fourth-order low-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

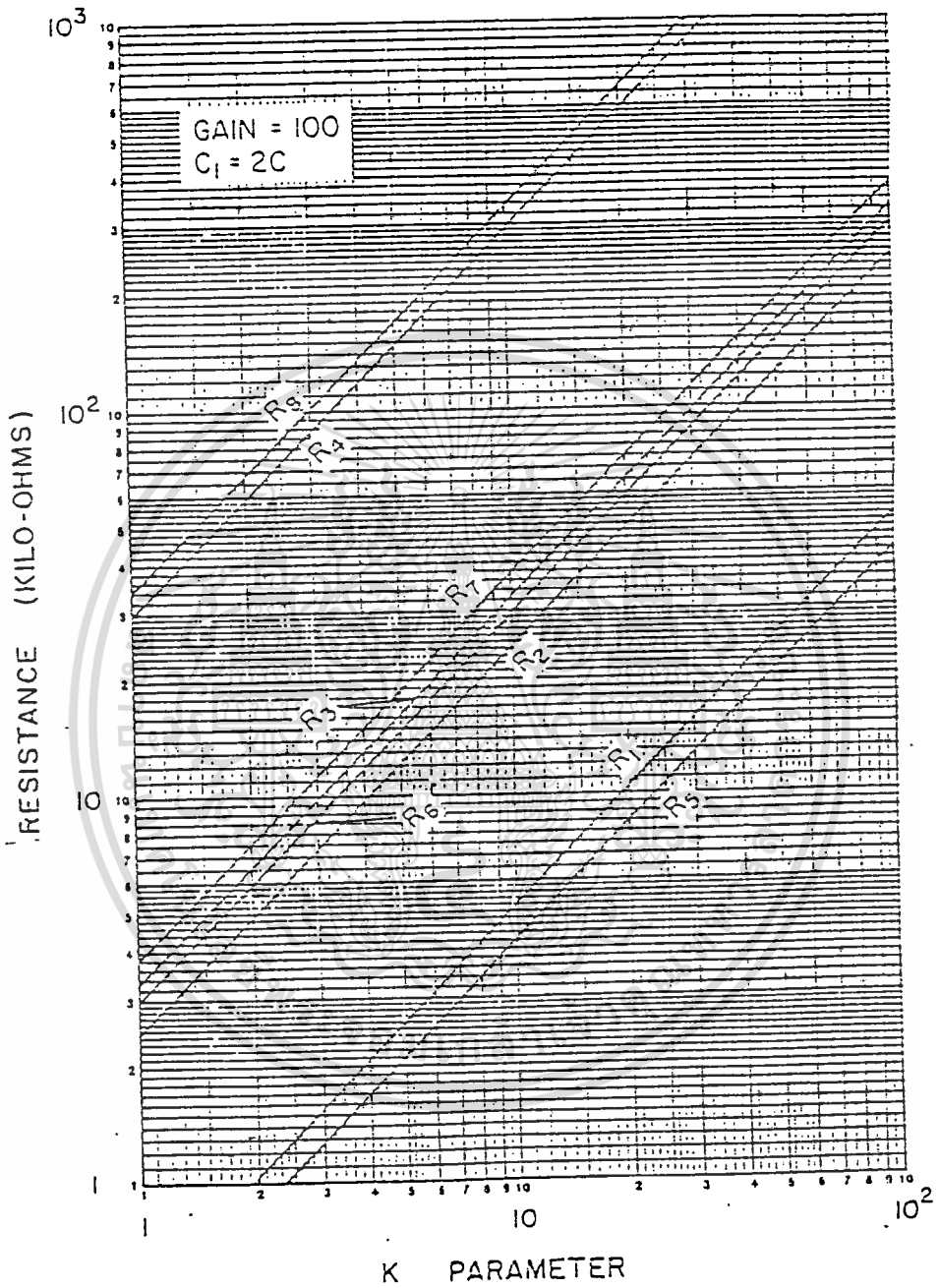


Fig. 2.30. Fourth-order low-pass Sutterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

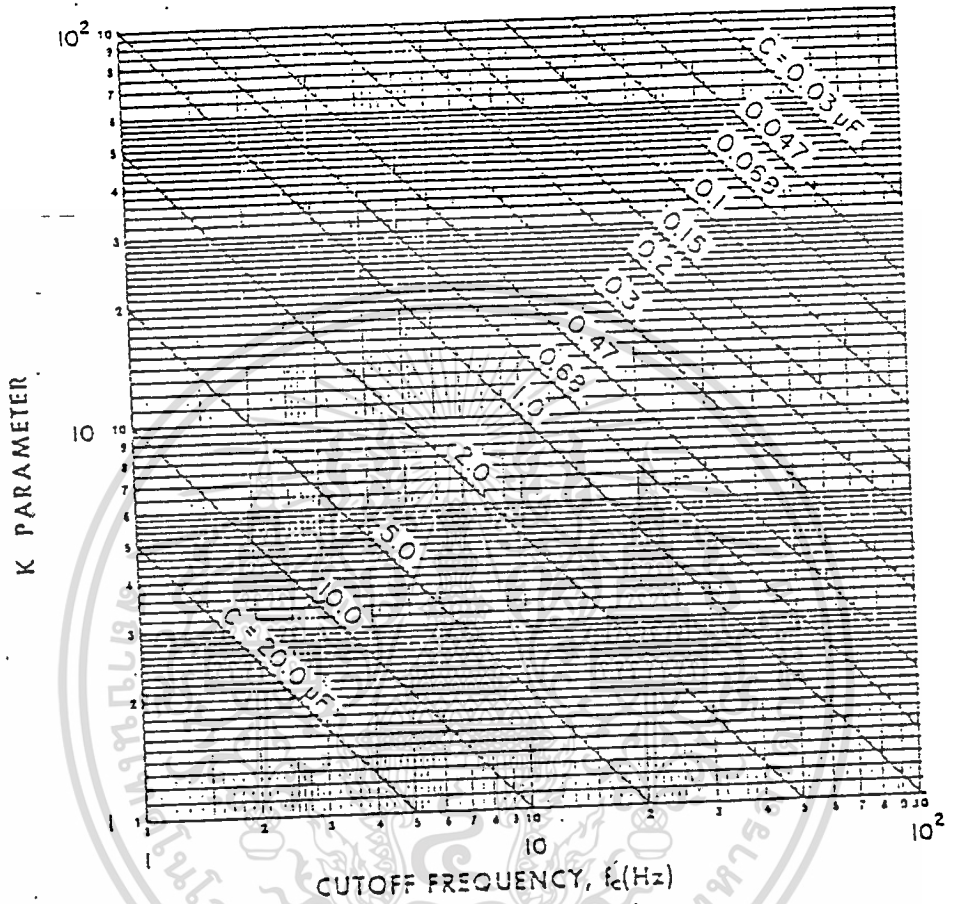


Fig. 3.6. (a) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

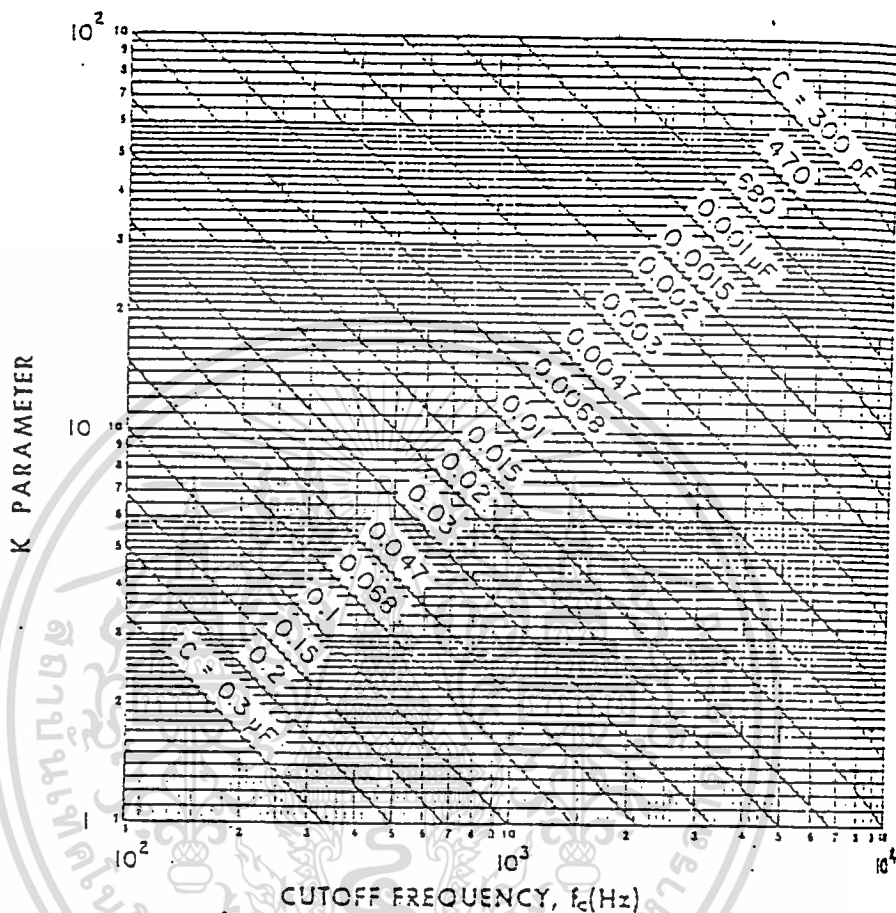


Fig. 3.6. (b) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

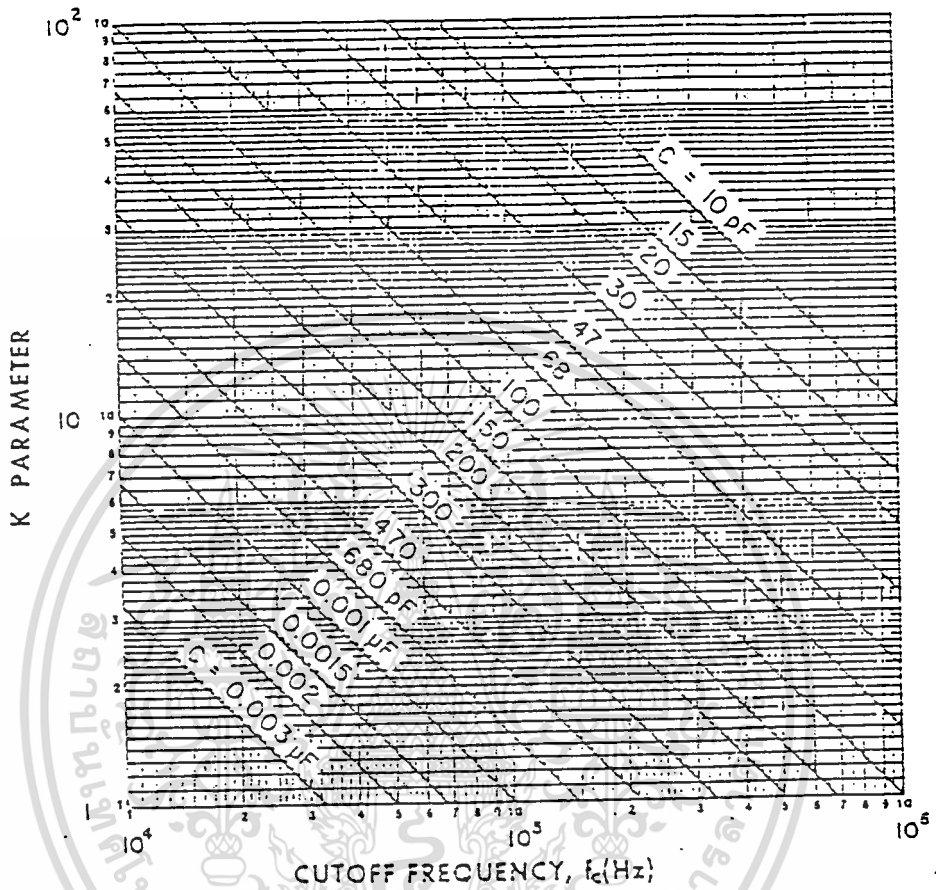


Fig. 3.6. (c) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

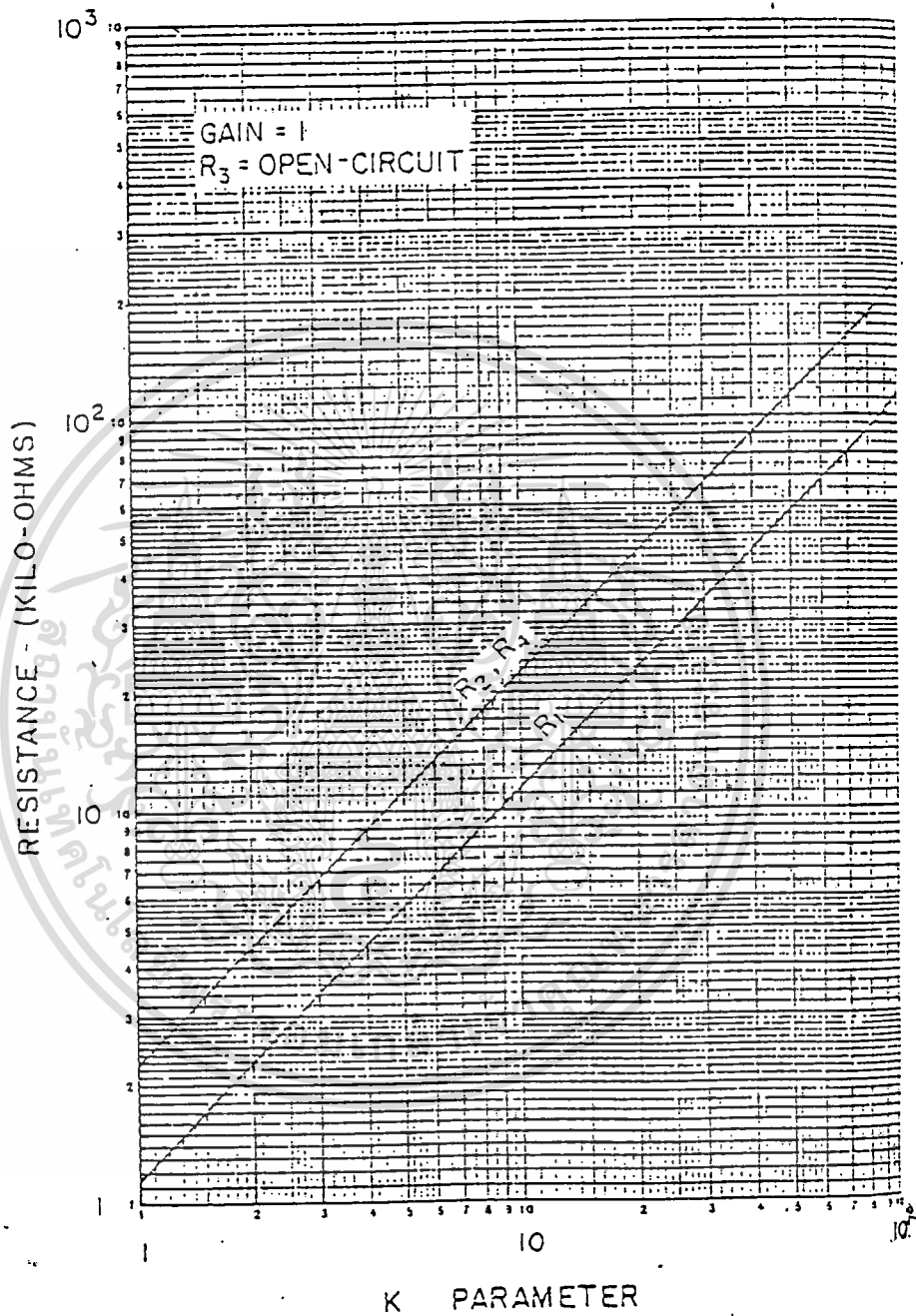


Fig. 3.7. Second-order high-pass Sutterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

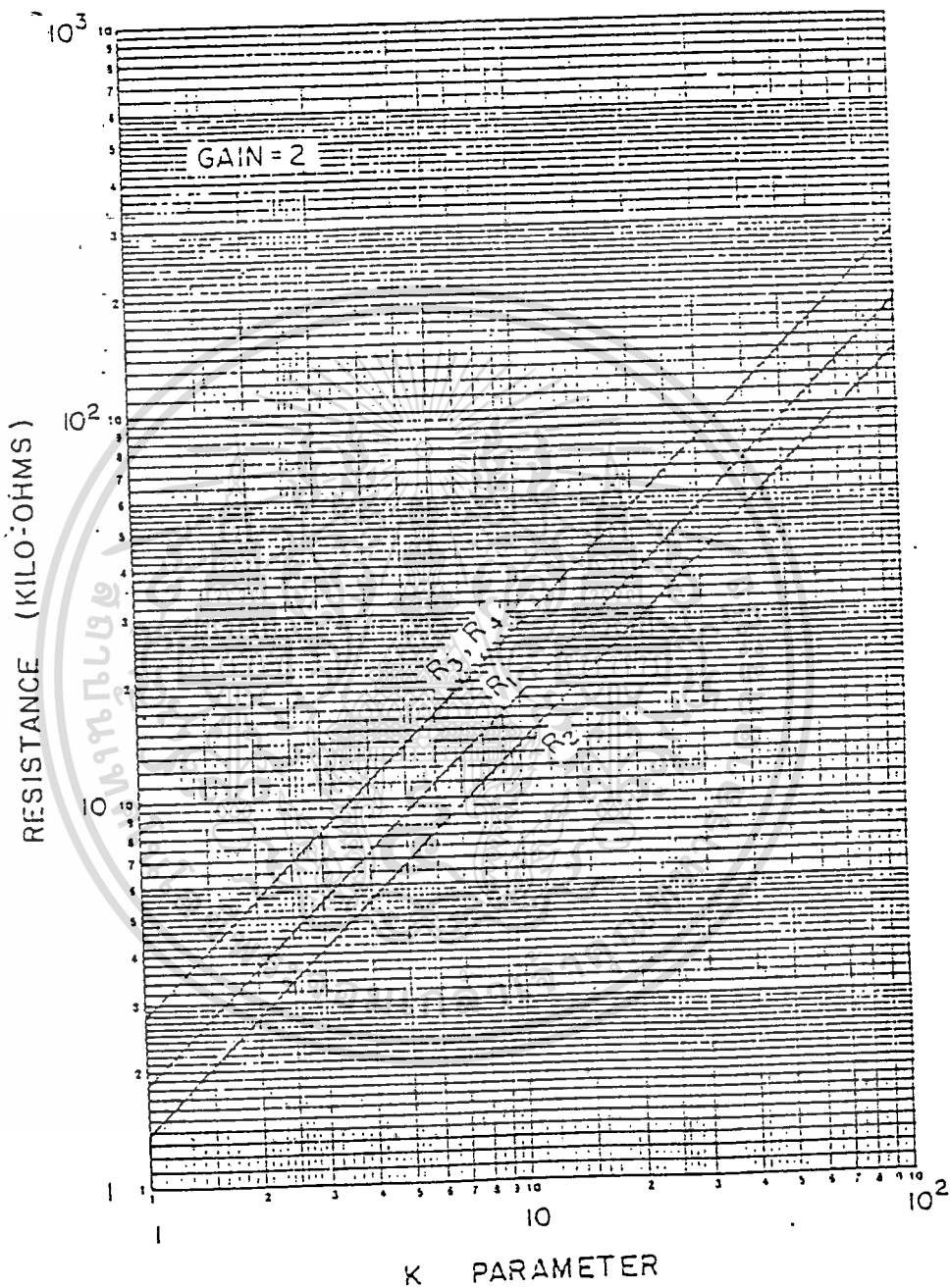


Fig. 3.8. Second-order high-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

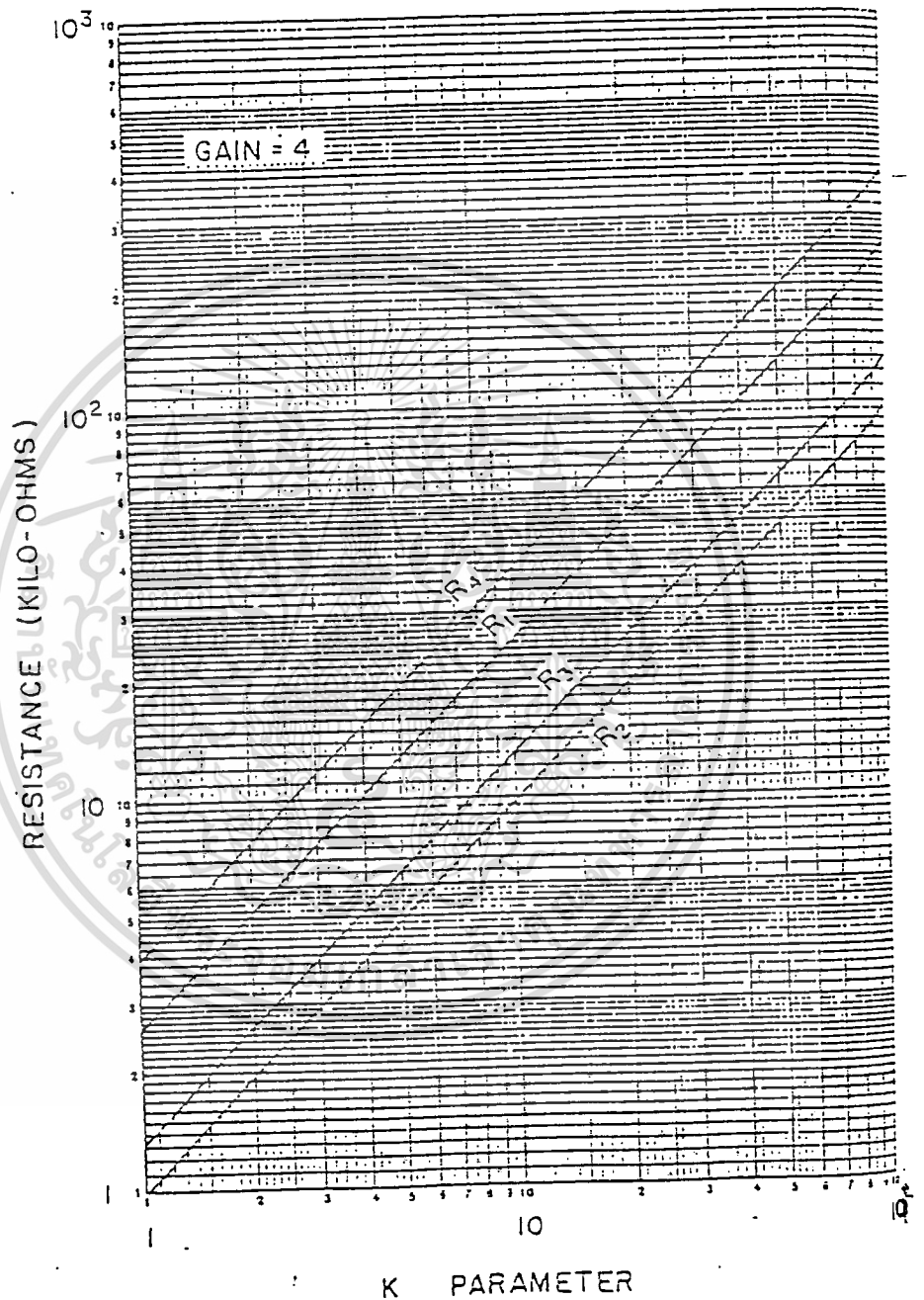


Fig. 3.9. Second-order high-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

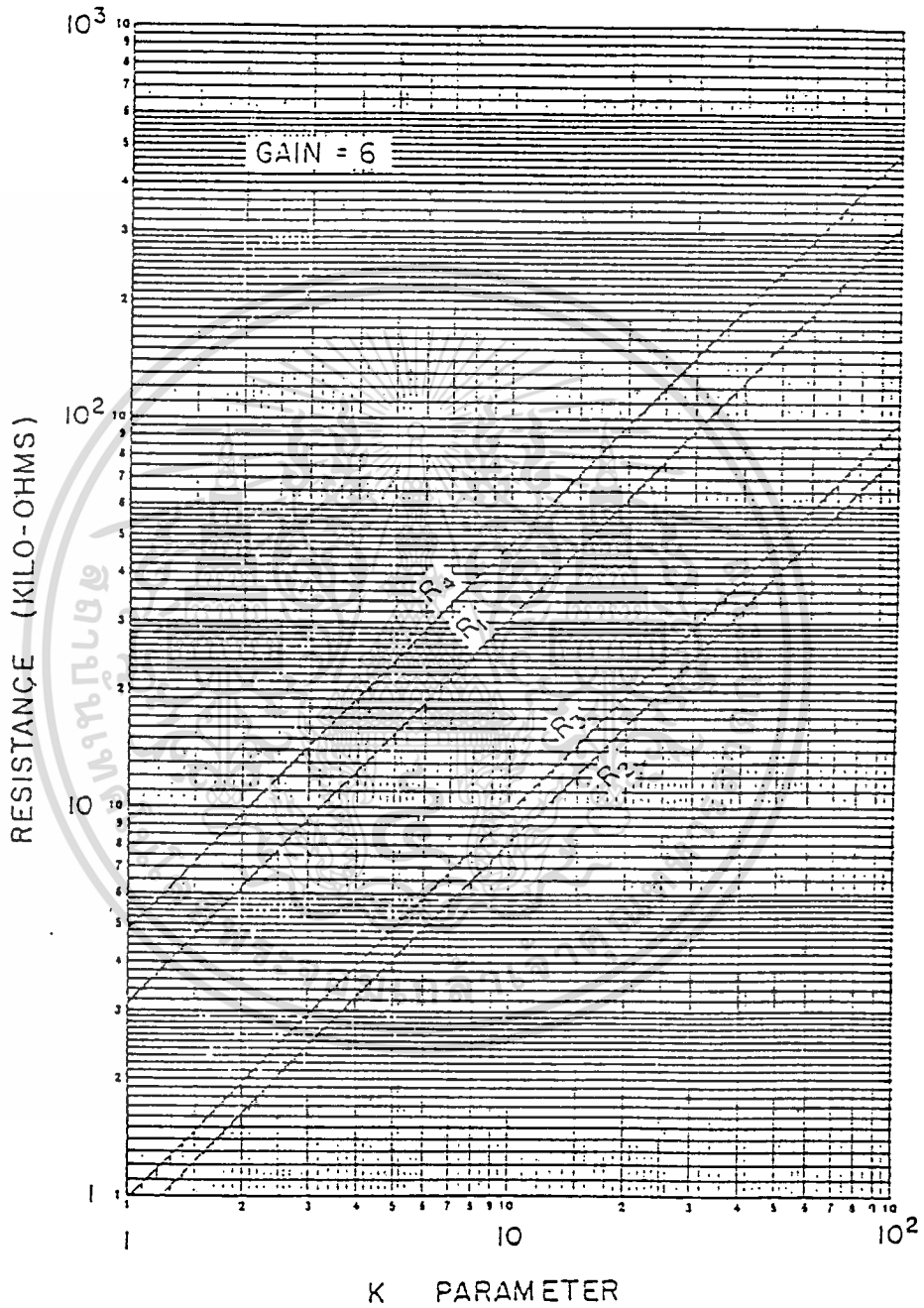


Fig. 3.10. Second-order high-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

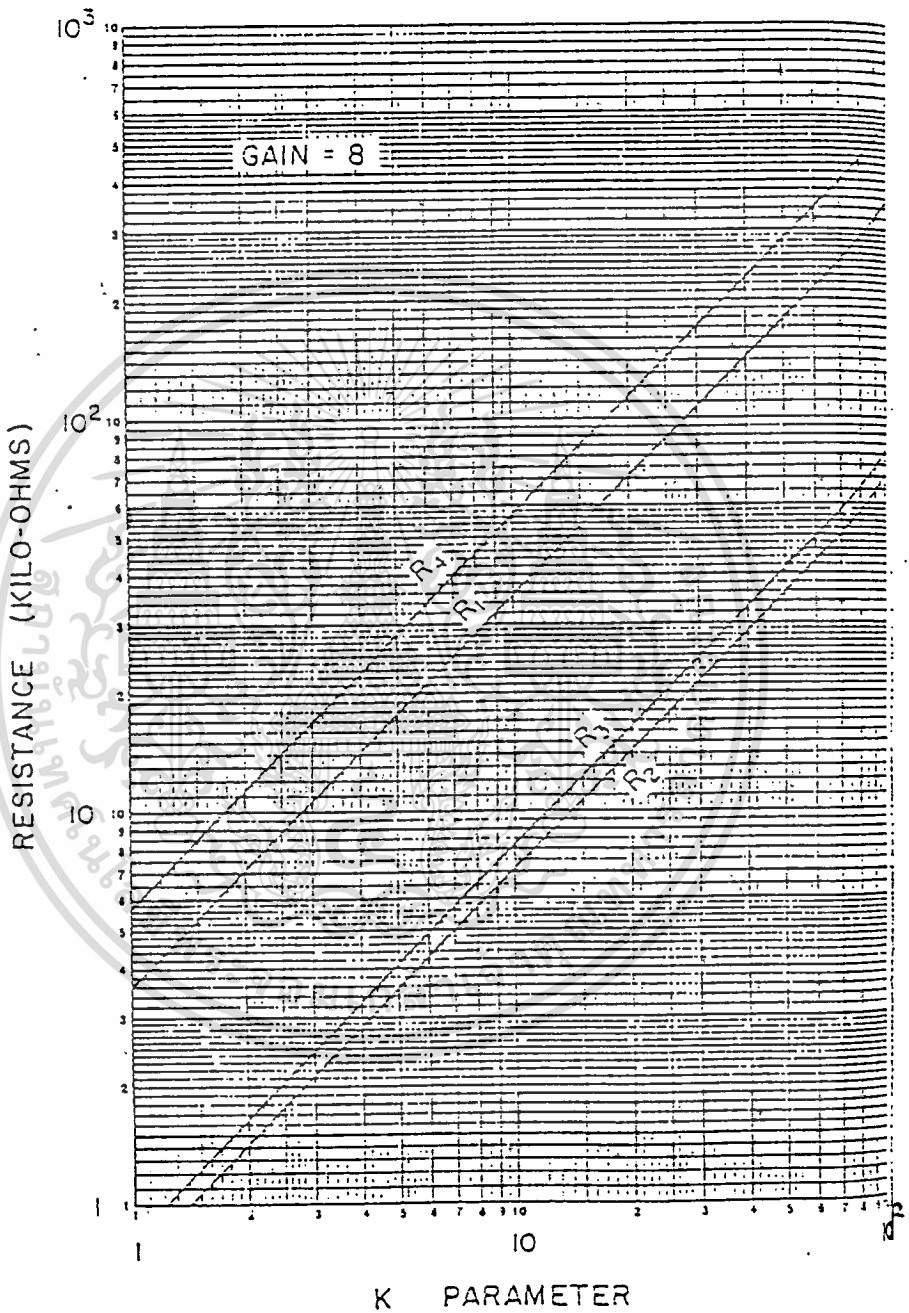


Fig. 3.11. Second-order high-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

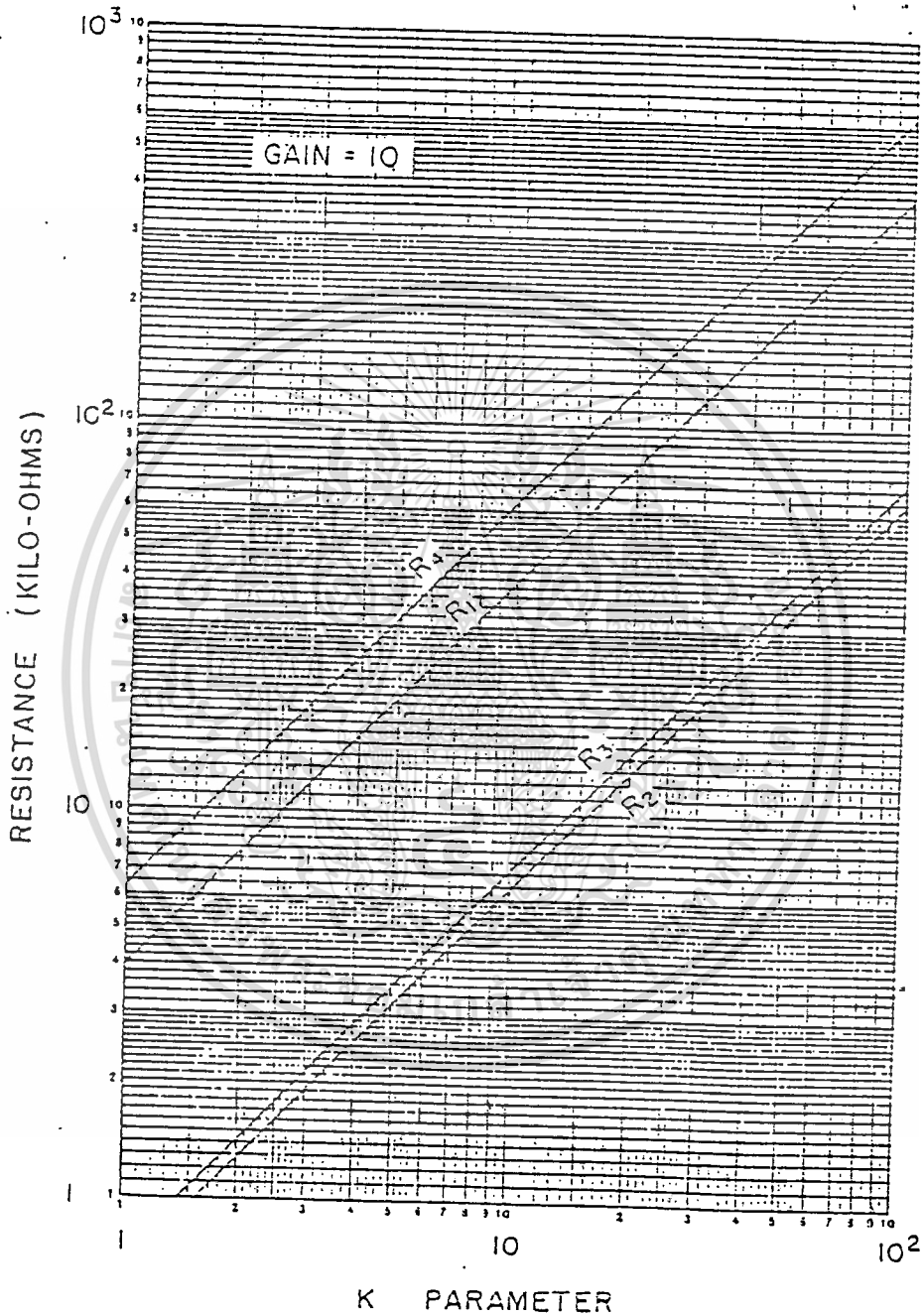


Fig. 3.12. Second-order high-pass Butterworth filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

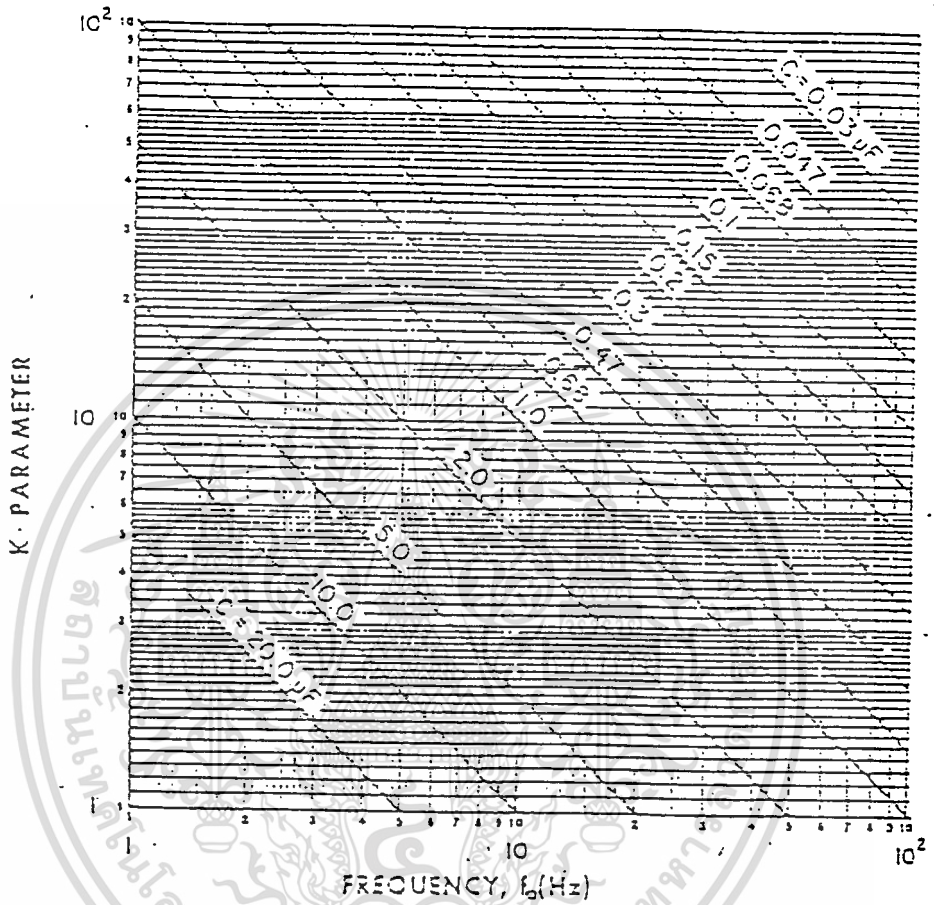


Fig. 6.7. (a) K parameter versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

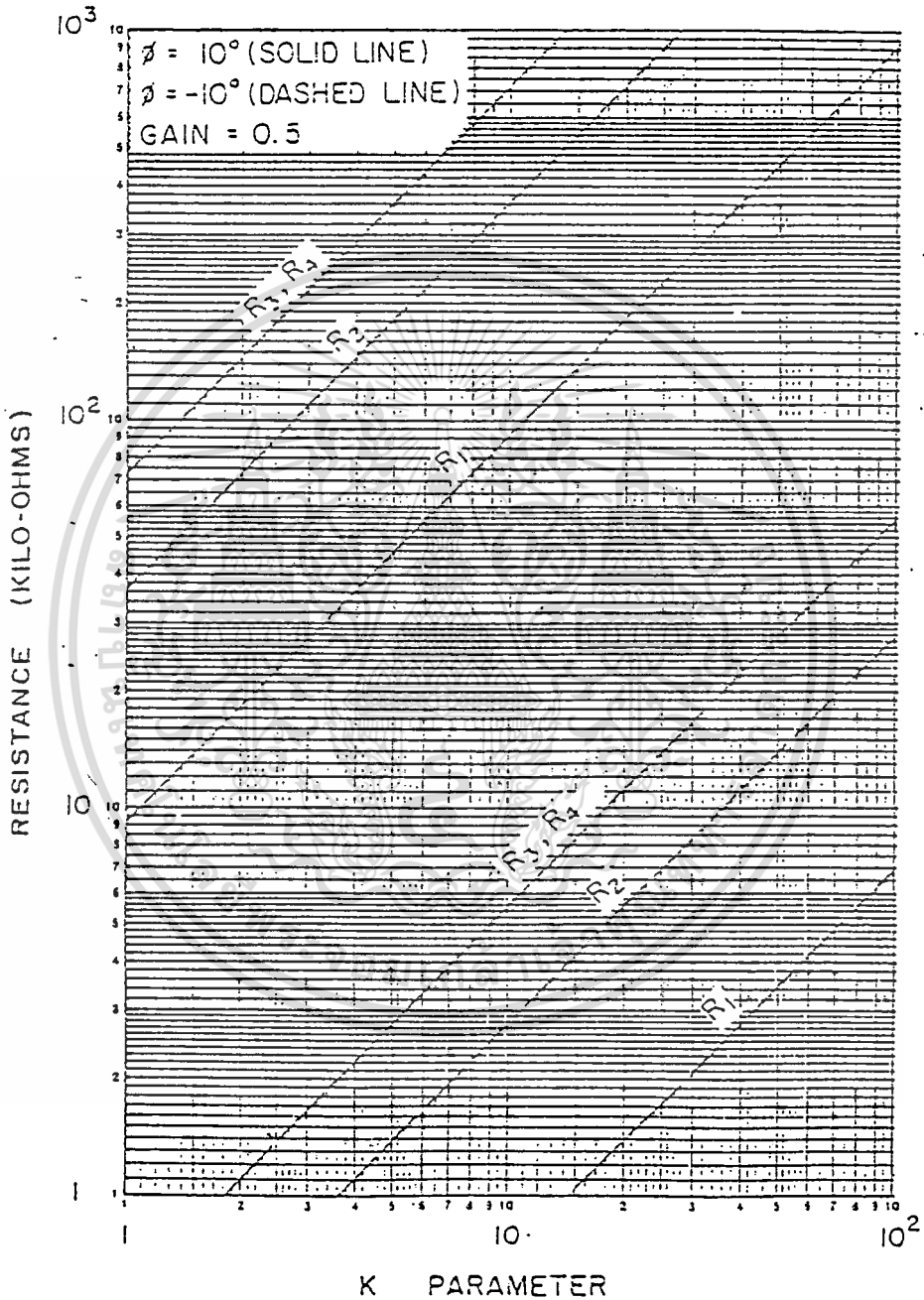


Fig. 6.3. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

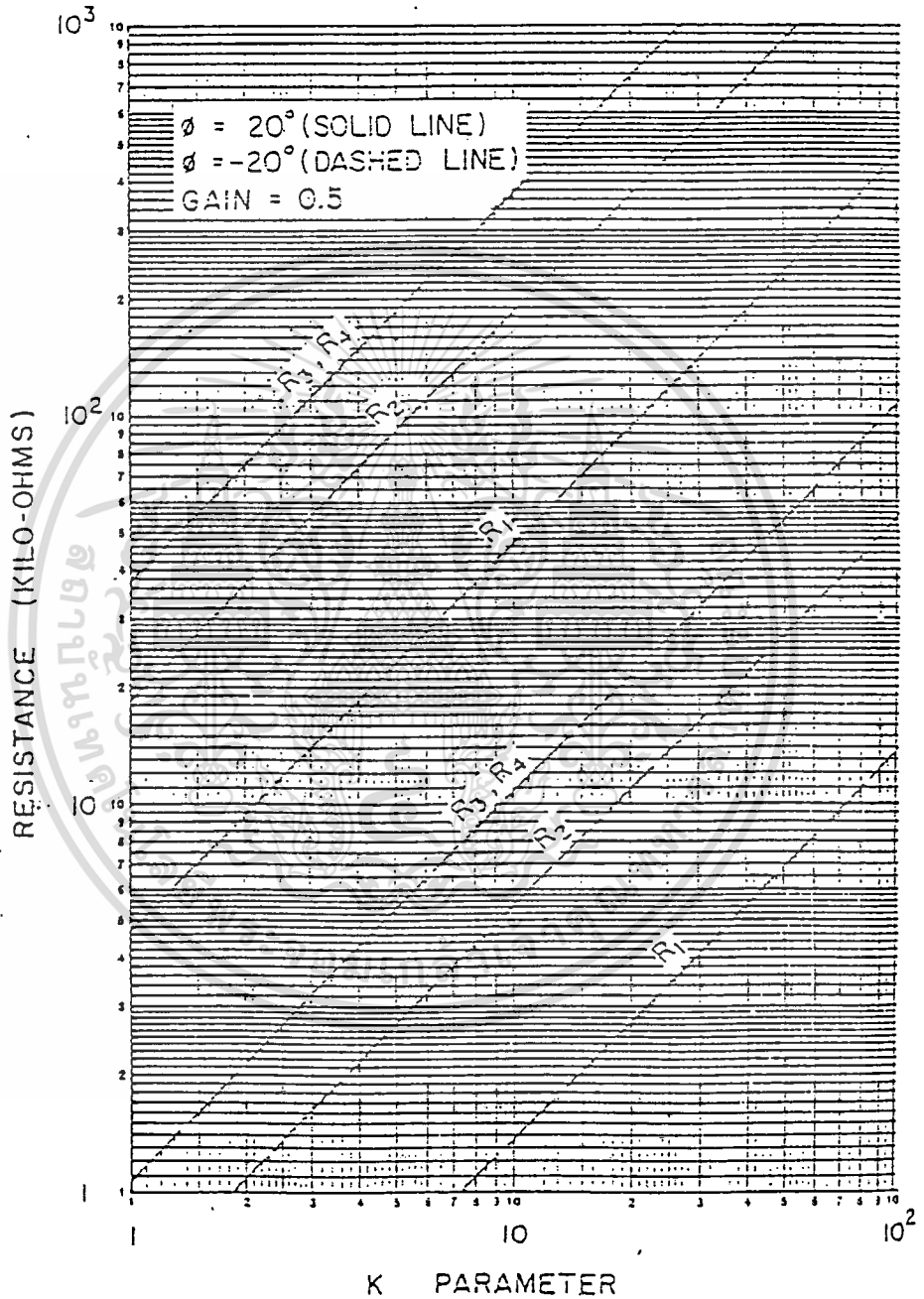


Fig. 6.9. All-pass (phase-shift) filter:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

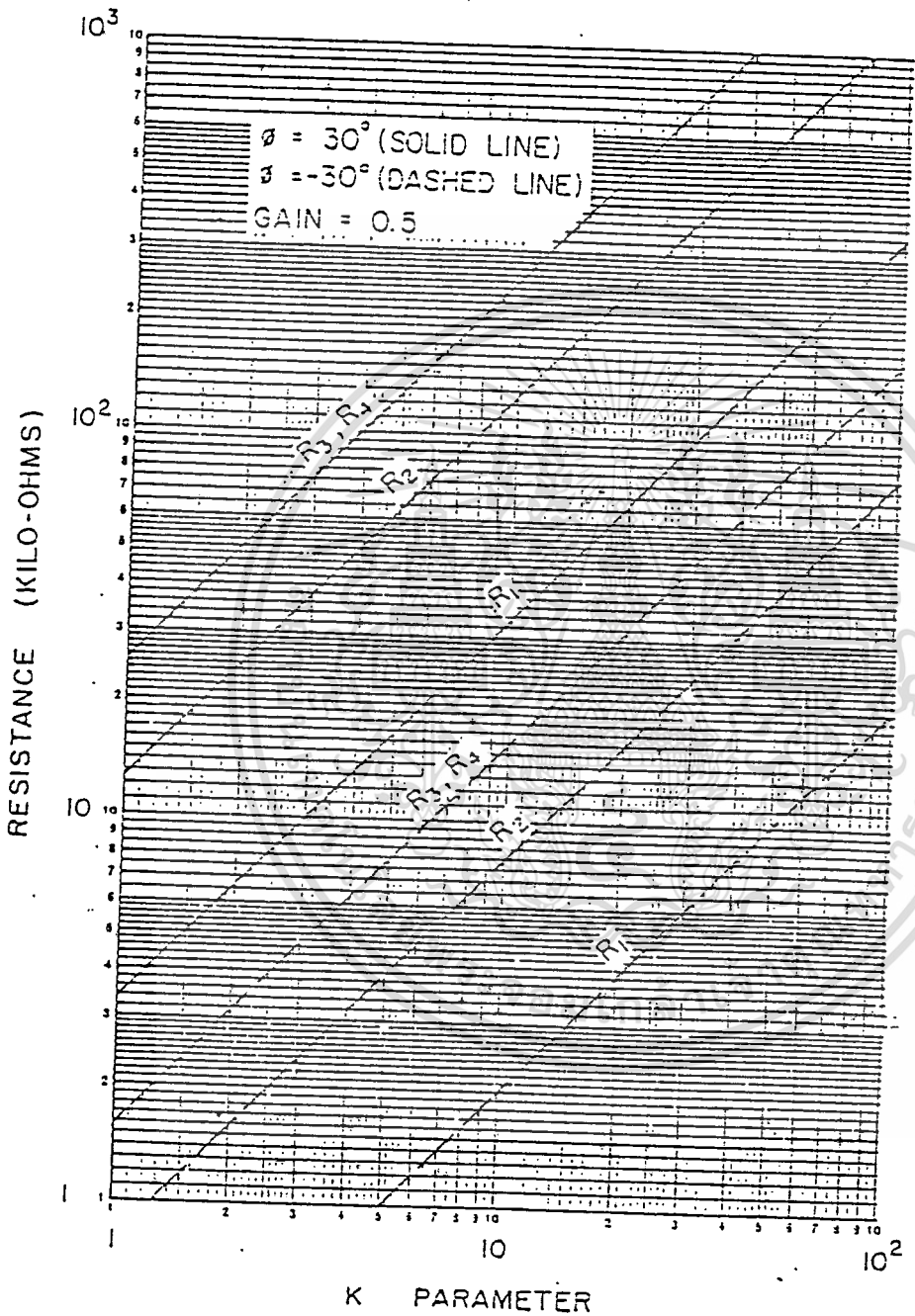


Fig. 6.10. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

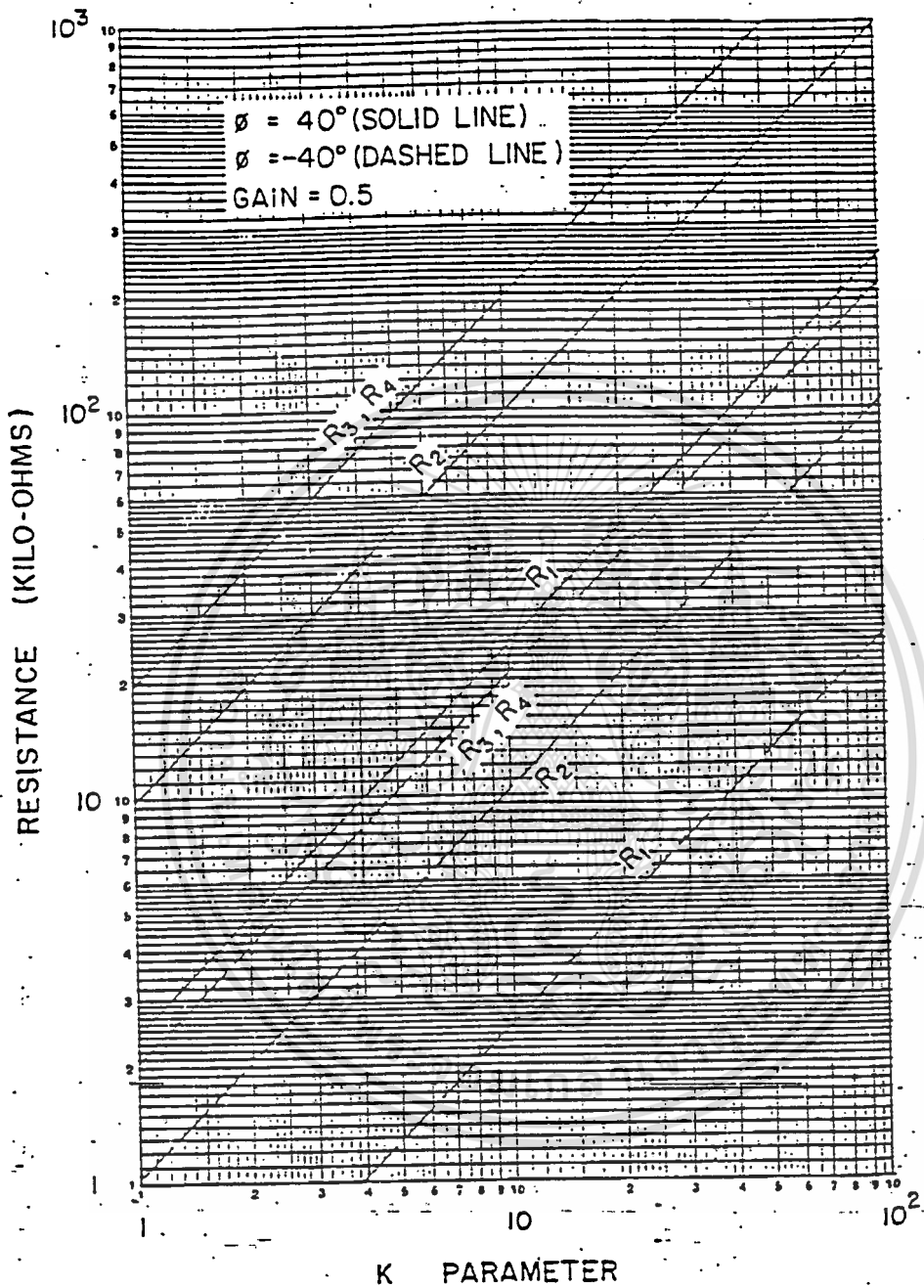


Fig. 6.11. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

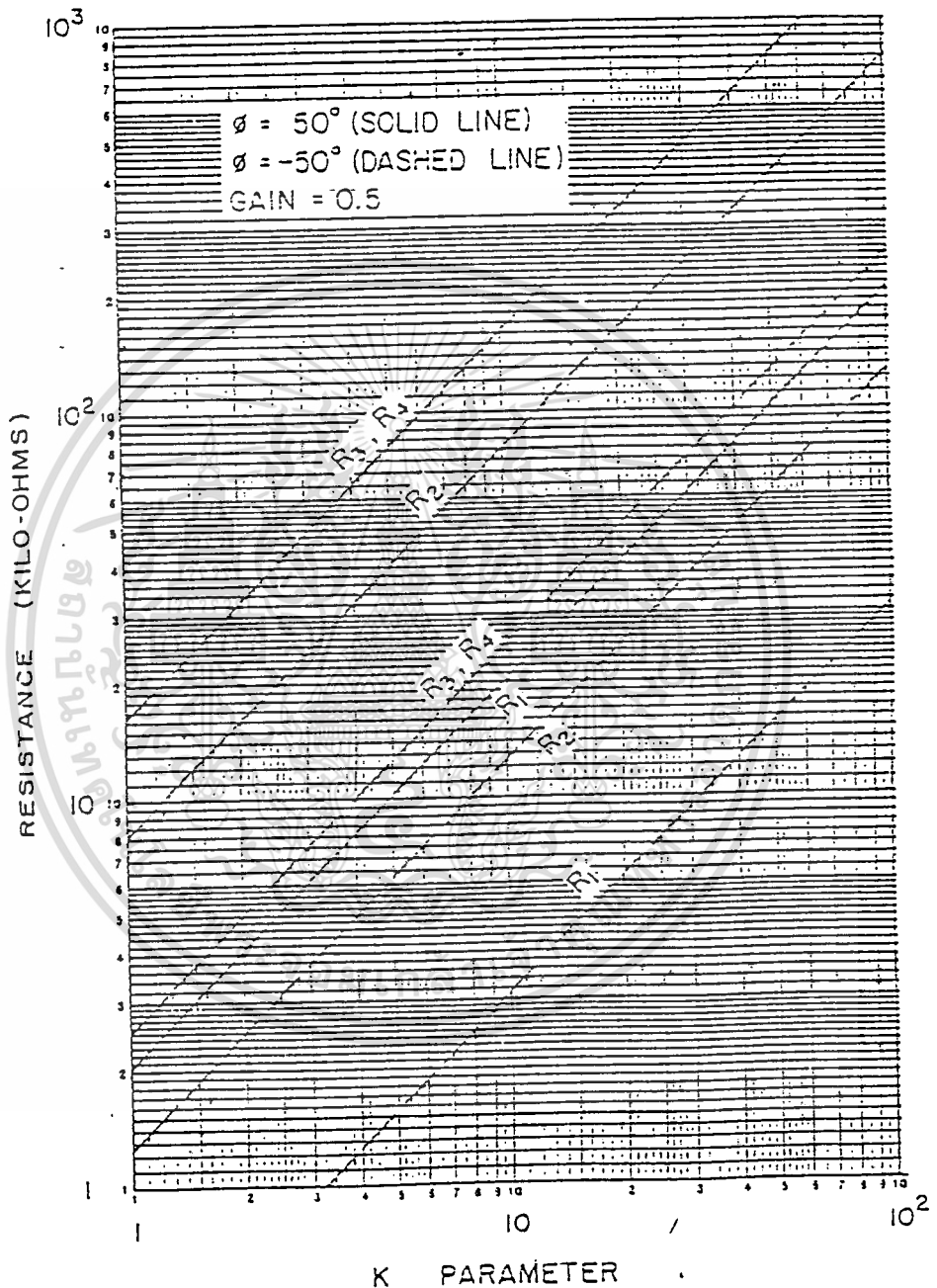


Fig. 6.12. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

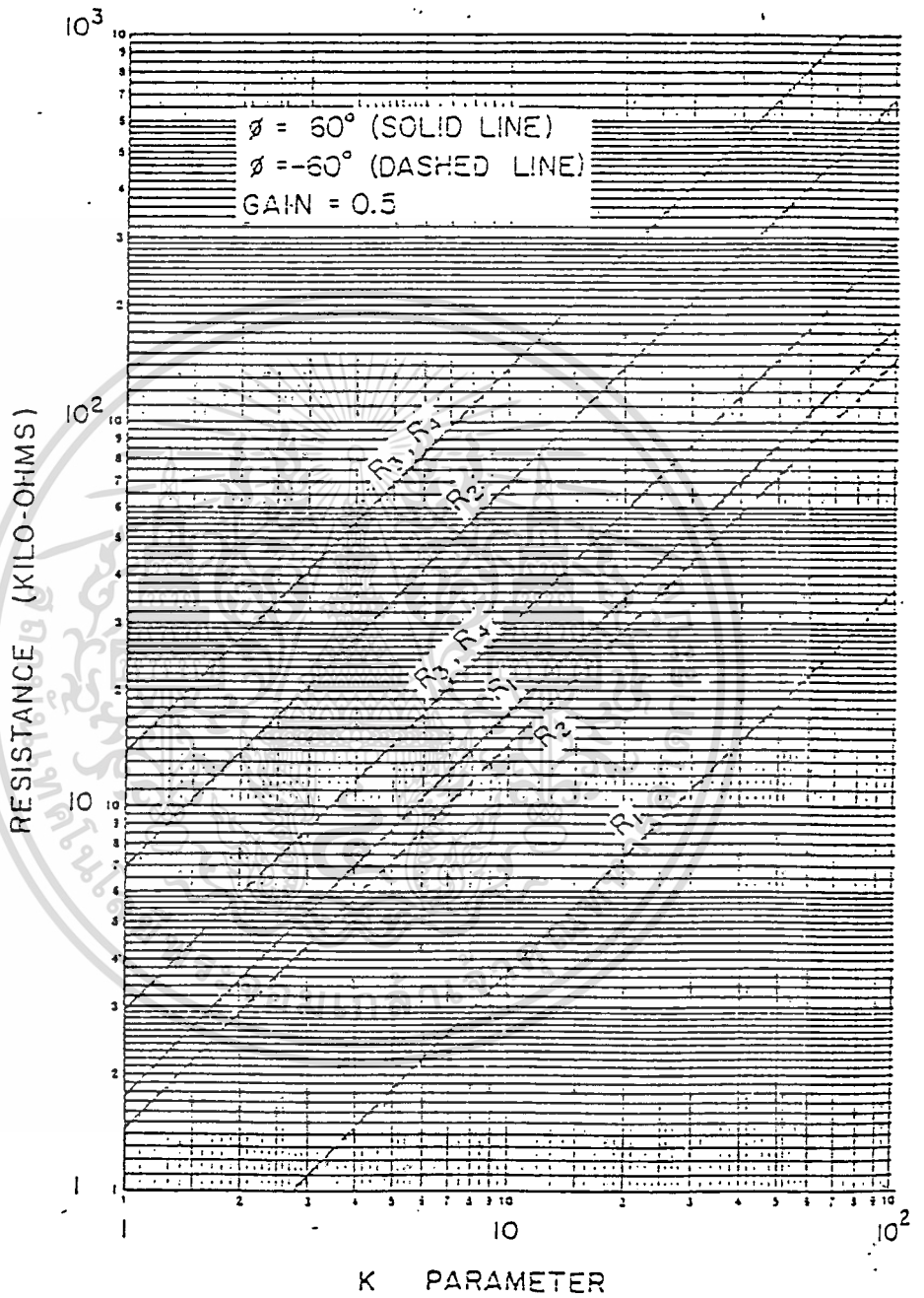


Fig. 6.13. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

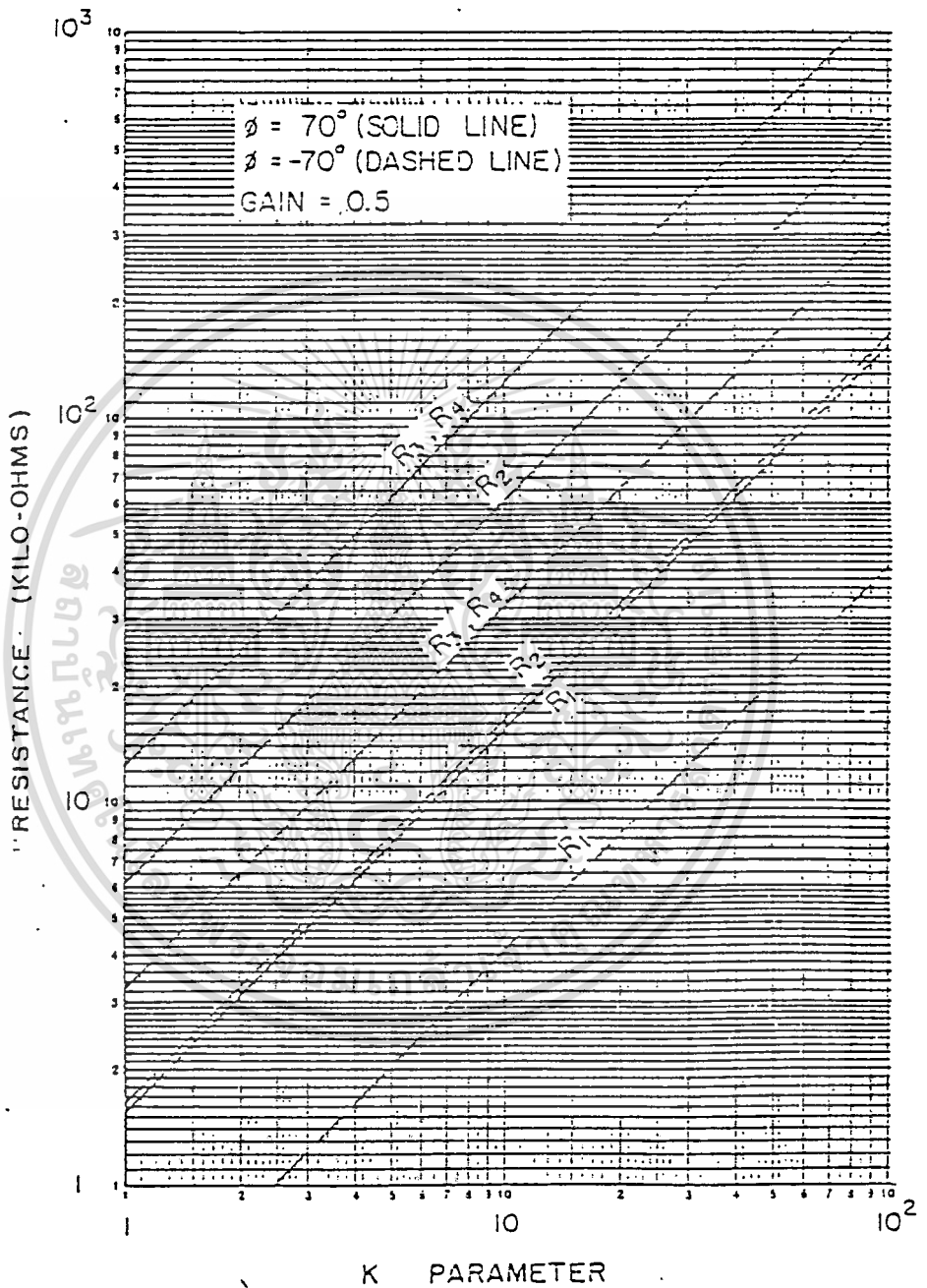


Fig. 6.14. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

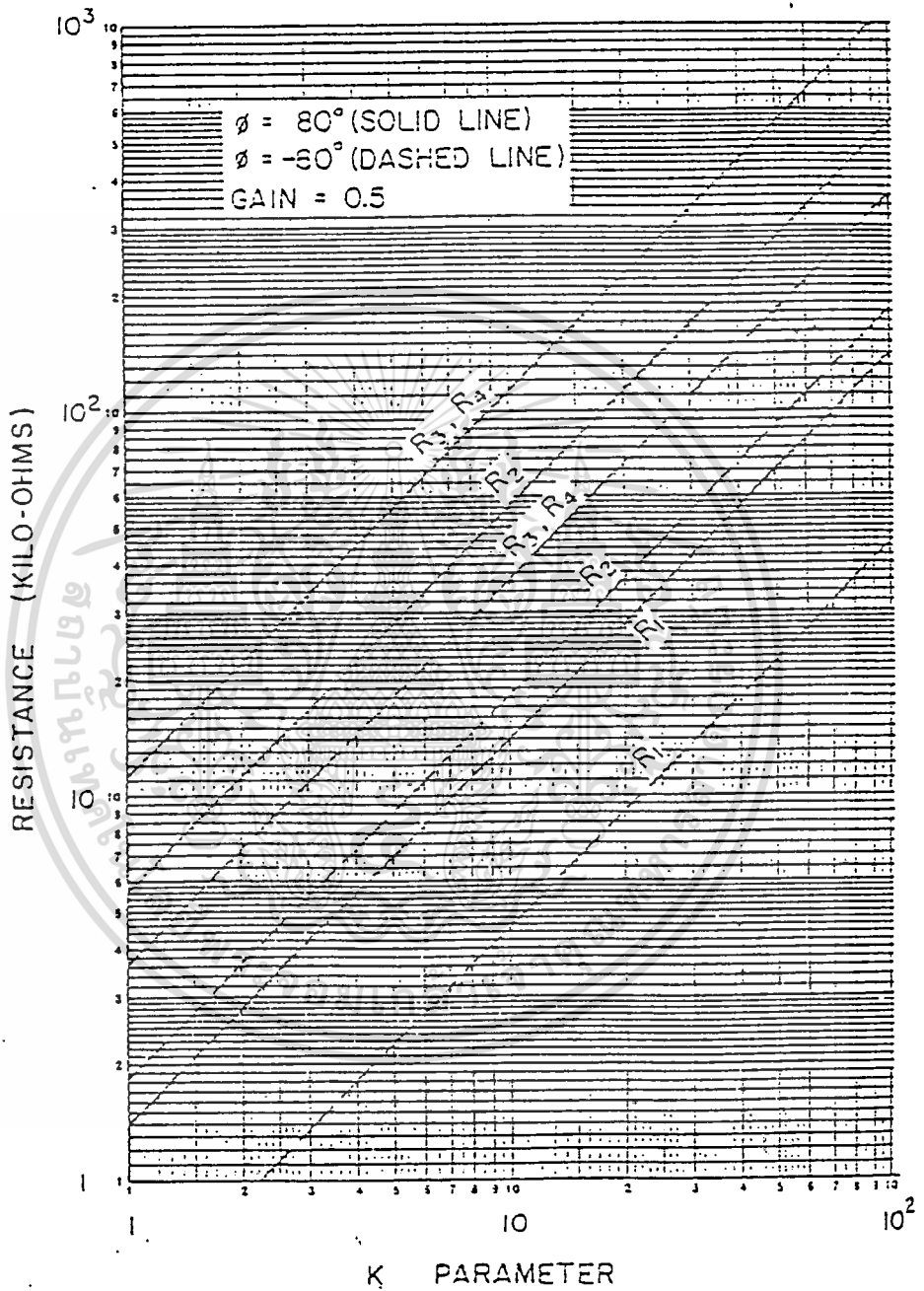


Fig. 6.15. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

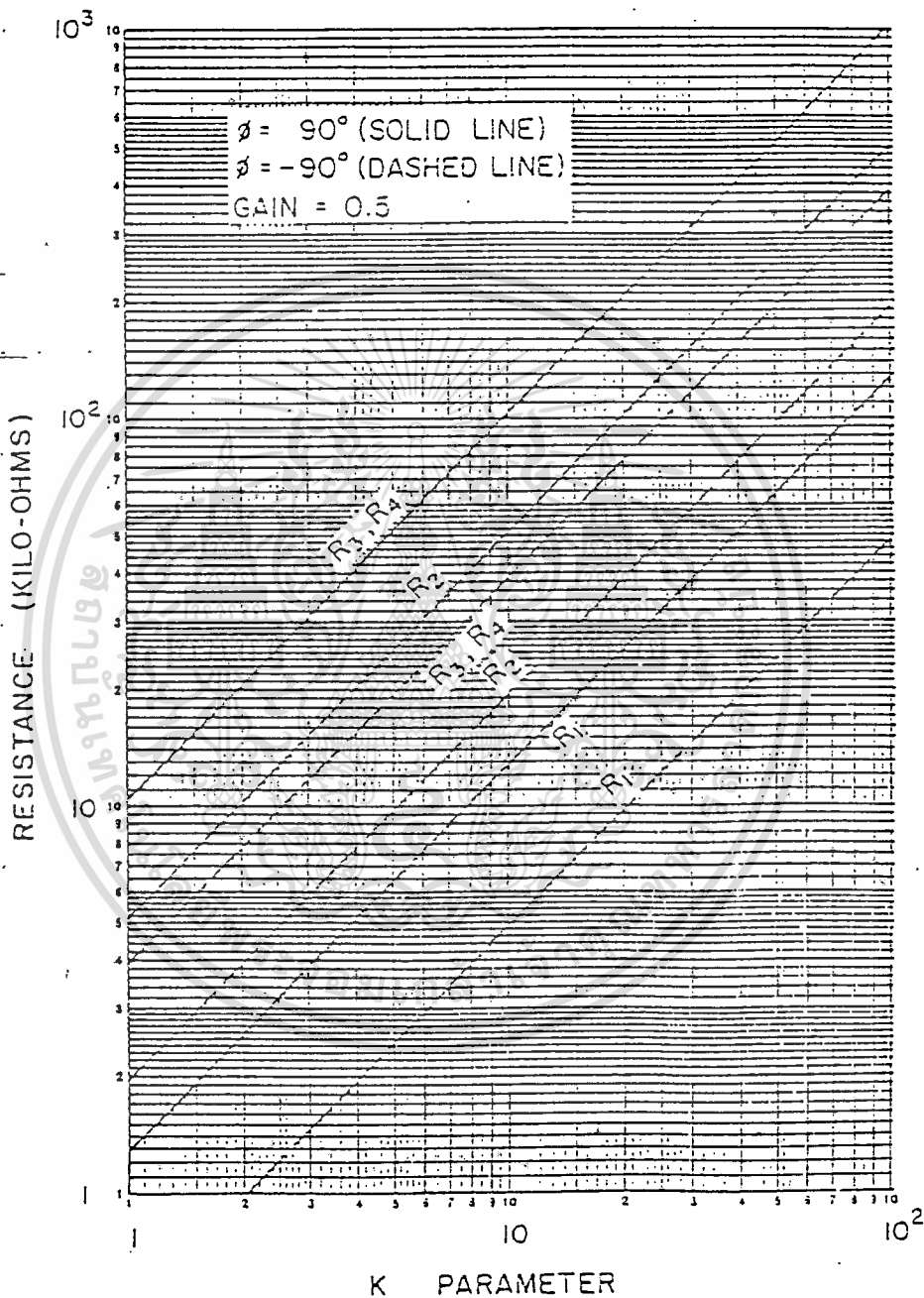


Fig. 6.16. All-pass (phase-shift) filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

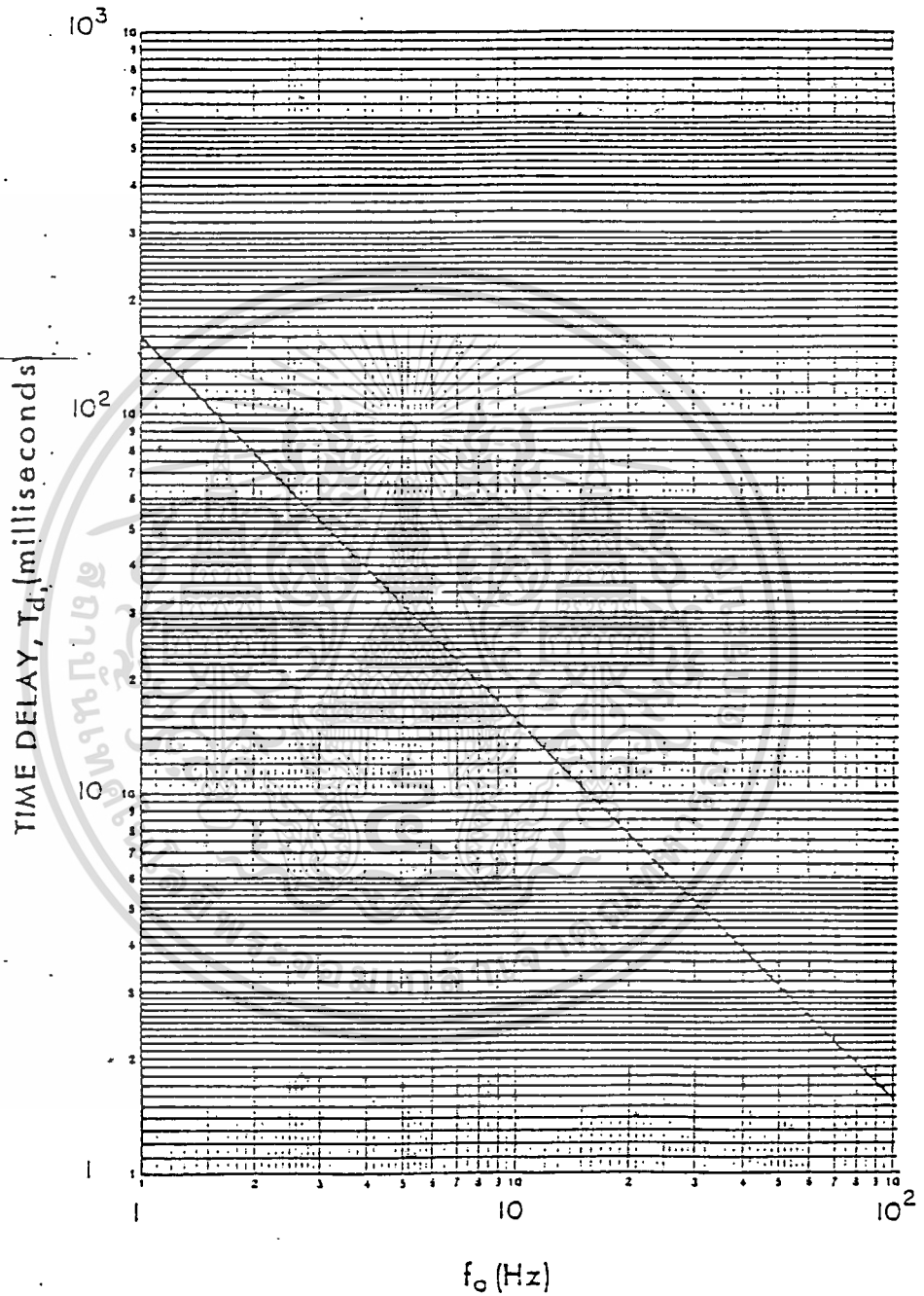


Fig. 6.17. (a) Time delay versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

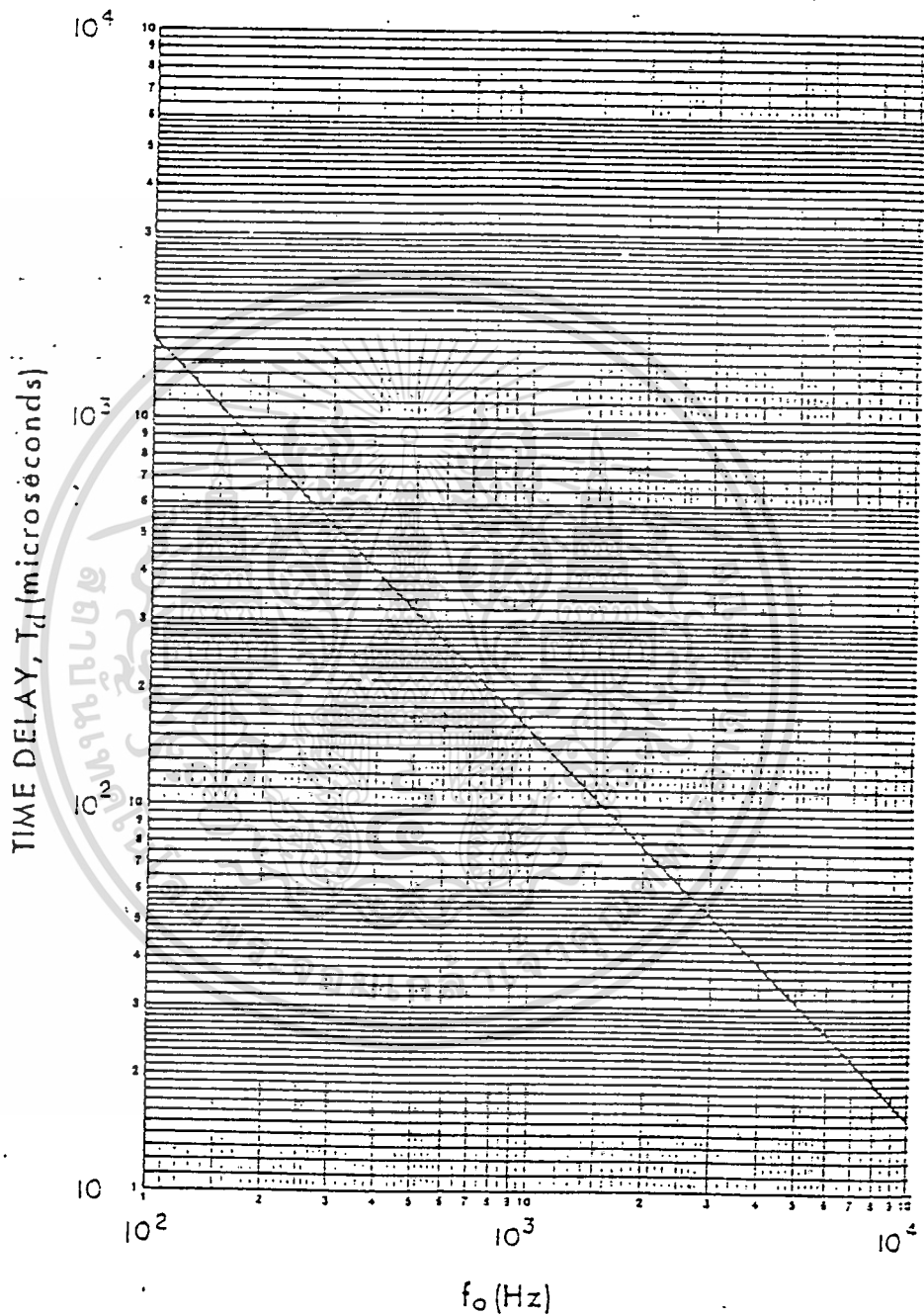


Fig. 6.17. (b) Time delay versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

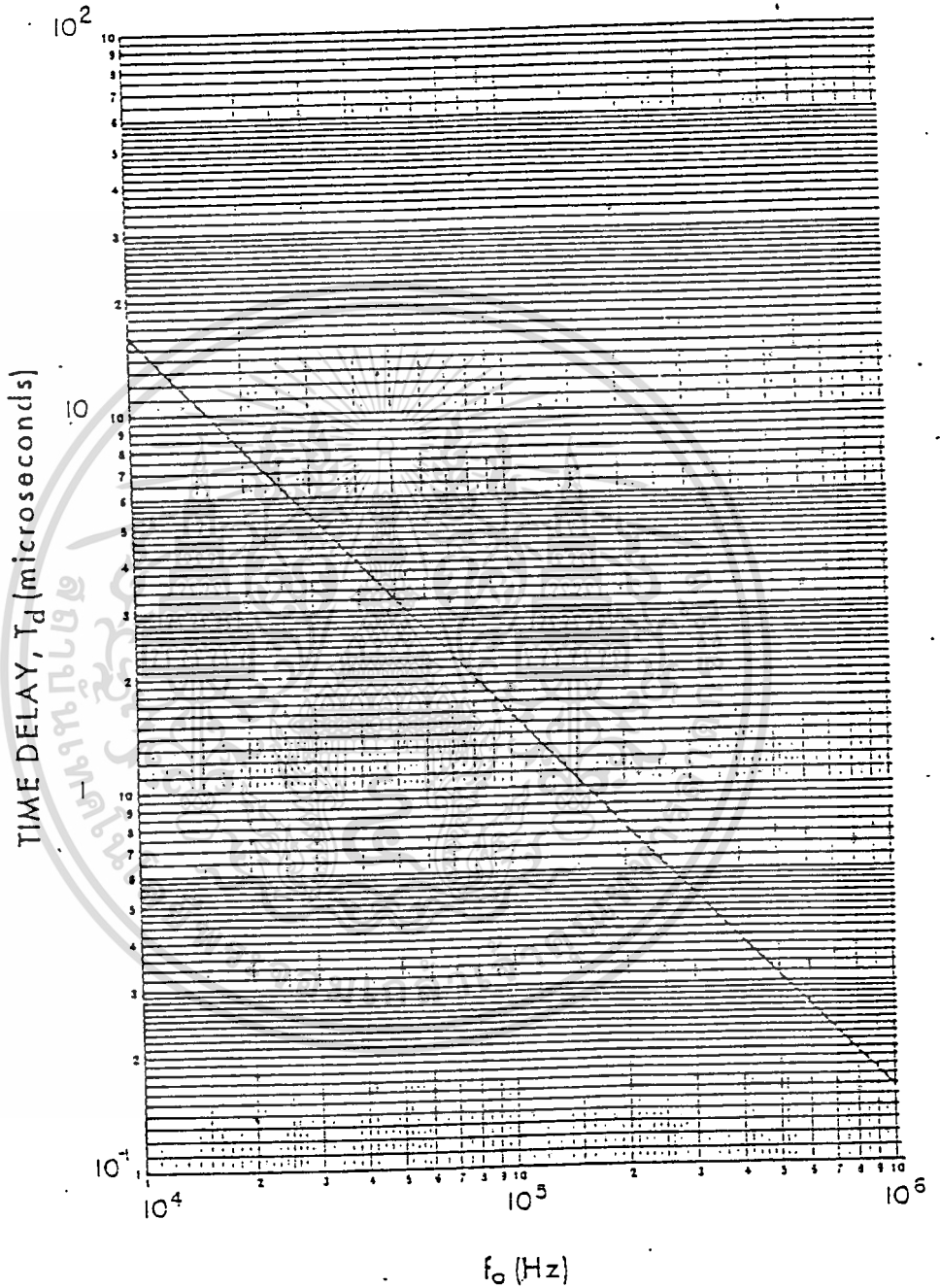


Fig. 6.17. (c) Time delay versus frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้