

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบวงจรฟิลเตอร์โดยใช้ URC

THE DESIGN OF AN ACTIVE FILTER USING UNIFORMLY
DISTRIBUTED RC LINE



โดย
นายบวรยศ กิ่งใบสมบูรณ์ 40012017
นายเรืองเดช พันทองหล่อ 40012028
นายสุรพล แสงจันทร์ 40012036

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน..... 34026
วัน, เดือน, ปี..... 1 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การออกแบบวงจรฟิลเตอร์โดยใช้URC

โดย

นายบวรยศ

กิ่งใบสมบูรณ์

นายเรืองเดช

พันทองหล่อ

นายสุรพล

แสงจันทร์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. กนก

เจนจิระพงศ์เวช

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2541

ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง อนุมัติให้นับปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....

ประธานกรรมการ

(.....)

.....

กรรมการ

(.....)

.....

กรรมการ

(.....)

.....

กรรมการ

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1.วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.2.แนวความคิดและที่มา	2
1.3.เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีไลน์	4
บทที่ 3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์และการออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี	7
3.1. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวท์อาชี	7
3.2 การออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี	19
3.3 ความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity)	20
บทที่ 4 การคำนวณ Transfer Function และ Sensitivity	23
4.1 การคำนวณหา Transfer Function ของวงจร Renz	23
4.2 การคำนวณหา Sensitivity of K ของวงจร Renz	26
4.3 การคำนวณหา Sensitivity ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจร Renz	27
4.3.1 การคำนวณหา Sensitivity of R1	28
4.3.2 การคำนวณหา Sensitivity of C1	31
4.3.3 การคำนวณหา Sensitivity of R2	33
4.3.4 การคำนวณหา Sensitivity of C2	35
4.3.5 การคำนวณหา Sensitivity of R3	37
4.3.6 การคำนวณหา Sensitivity of C3	39
4.4 การคำนวณหา Transfer Function ของวงจร Band Pass Filter	40
4.5 การคำนวณหา Sensitivity of K ของวงจร Band Pass Filter	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

4.6 การคำนวณหา Sensitivity ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจร Band Pass Filter	45
4.6.1 การคำนวณหา Sensitivity of R1	46
4.6.2 การคำนวณหา Sensitivity of C1	48
4.6.3 การคำนวณหา Sensitivity of R2	49
4.6.4 การคำนวณหา Sensitivity of C2	50
4.6.5 การคำนวณหา Sensitivity of R3	52
4.6.6 การคำนวณหา Sensitivity of C3	54
4.7 การคำนวณหา Sensitivity ของ Q เมื่อเทียบกับ K	63
4.8 ผลการออกแบบ	75
บทที่ 5 การใช้โปรแกรม MATLAB และโปรแกรม P-SPICE ในการวิเคราะห์	76
5.1 กล่าวนำ	76
5.2 การใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์วงจร	76
5.2.1 วิเคราะห์วงจร Renz	76
5.2.2 วิเคราะห์วงจร BPF Case1	80
5.2.3 วิเคราะห์วงจร BPF Case2	83
5.3 การจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม P-SPICE	86
5.3.1 วิเคราะห์วงจร Renz	86
5.3.2 วิเคราะห์วงจร BPF Case1	87
5.3.3 วิเคราะห์วงจร BPF Case2	88
5.4 สรุปผลจากการโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม P-SPICE	90
บทที่ 6 การทดลองและการทดสอบวงจรจริง	91
6.1 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบ Renz	92
6.2 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบ BPF Case1	94
6.3 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านแบบ BPF Case2	96
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย	99
ภาคผนวก รายละเอียดของโปรแกรม	100
เอกสารอ้างอิง	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรฟิลเตอร์โดยใช้ URC		
โดย	นาย บวรยศ	กิ่งใบสมบูรณ์	40012017
	นาย เรืองเดช	พันทองหล่อ	40012028
	นาย สุรพล	แสงจันทร์	40012036
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. กนก	เจนจิระพงศ์เวช	

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2541

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่แถบความถี่ผ่าน ซึ่งมีสามแบบที่ทำการนำเสนอคือ (1) วงจรกรองความถี่แบบเร็นต์ (2) วงจรกรองความถี่แบบที่แยกเฉพาะอัลฟาร์(α) (3) วงจรกรองความถี่แบบที่แยกออกมาเป็นอัลฟาร์(α) และเบตต้า(β) ซึ่งวงจรกรองความถี่ทั้งสามแบบนี้ก็จะมีคุณสมบัติต่างๆที่แตกต่างกันออกไป ทั้งในด้านอัตราเกณฑ์การขยาย , ผลตอบสนองทางด้านความถี่ ค่าความไวในย่านความถี่ โดยวงจรกรองความถี่ทั้งสามวงจรถูกประกอบไปด้วย ยูนิฟอร์มอาซีไลท์จำนวนสามตัว และอัตราขยายจำนวนหนึ่งตัว โดยที่ค่าคาปาซิเตอร์ที่ตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีกับฐานรองไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในย่านความถี่สูง

โดยในที่นี้การทดลองการหาผลตอบสนองของความถี่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และทำการ Simulated ด้วยโปรแกรม P-SPICE และไปถึงการจำลองตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีเพื่อทำการต่อวงจรทดลองจริง ปรากฏว่าวงจรทั้งสามแบบให้การตอบสนองทางความถี่ และค่าความไวต่ออัตราขยาย และค่าความไวต่ออุปกรณ์ของวงจรที่แตกต่างกันออกไป แต่ก็สามารถนำไปใช้ในการประมาณสัญญาณได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Design of an Active Filter Using Uniformly Distributed RC Line.		
Name	Mr. Bowornyot Kingbaisomboon	40012017	
	Mr. Rueagdet Puntonglor	40012028	
	Mr. Surapol Sangjan	40012036	
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Kanok Janchitrapongvej		
Level of Study	Bachelor of Industrial Technology (Electronics)		
Academic Year	1998.		

Abstract

This thesis describes the realization of three type using uniformly distributed RC Line . These filters consist of (1) Renz BPF (2) Purposed BPF with α (case1) (3) Purposed BPF with α, β (case2) . There three type of BPF characteristics such as amplitude and phase response including sensitivity are carried out and investigated .

The circuits consist of three uniformly distributed RC lines with equal time constant and a single positive gain amplifier. The bottom plate parasitic capacitors have no effect on the frequency characteristics , so it's suitable for higher frequency range applications. This time the frequency response by using MATLAB and simulated by using P-SPICE including the experimental circuit results.

It is show that the purposed BPF circuit give good narrow band characteristics and low element sensitivity than Renz' BPF circuit.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช และอาจารย์วุฒิพร เลิศวาสนา แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาการแก่ผู้จัดทำ ตลอดจนช่วยแนะนำให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งผลงานวิจัยนี้แล้วเสร็จ ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรมที่มีส่วนช่วยเหลือและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บรรณารักษ์ ห้องสมุดที่ให้อ่านหนังสือเพื่อการค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติมทั้ง ๆ ที่หมดกำหนดเวลายืมแล้ว จนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในการออกแบบวงจรเพื่อให้ได้ผลของการตอบสนองทางขนาดเป็นไปตามที่ต้องการการออกแบบวงจรกรองความถี่ ซึ่งการสังเคราะห์วงจรมันอาจเป็นแบบ พาสซีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R , C และ L หรือแบบ แอกทีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R , C ร่วมกับ ออปแอมป์ แต่สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์ (Synthesis Frequency Principles)

วงจรโดยใช้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์ (Distributed RC) แทนการออกแบบวงจรที่เป็นลัมด์โอลิเมนต์ (Lumped Element) ซึ่งเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาซี มีคุณลักษณะทั่วไปดีกว่า มีขนาดเล็กกว่า เน็ตเวิร์กแบบลัมด์อาซี โดยจะเสนอวงจร กรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน (band pass filter) โดยใช้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี (Active Distributed RC) ที่มีลักษณะเป็นยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซี (Uniform Distributed RC) หรือ URC โดยวงจรมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำ สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็ก โดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ทำให้สามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูง

ซึ่งในปริญญาโทฉบับนี้ ได้มีการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลตอบสนองของทางความถี่, เสถียรภาพของวงจร และรวมไปถึง ค่าความไวของวงจร 3 แบบ อันประกอบไปด้วย วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่าน แบบเร็นต์ (Renz Band Pass Filter) , วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่านแบบมีเฉพาอัลฟ่า (Band Pass Filter Case 1 (α)) และแบบสุดท้ายคือ วงจรกรองสัญญาณแถบความถี่ผ่านแบบมีอัลฟ่า และ เบต้า (Band Pass Filter Case 2 ($\alpha\beta$)) โดยที่วงจรกรองสัญญาณทั้ง 3 แบบนี้เป็นลักษณะวงจรแบบยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซี (Uniform Distributed RC) หรือ URC แต่มีลักษณะการต่อวงจรที่แตกต่างกัน

1.1.วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางคณิตศาสตร์ และนำมาประยุกต์ใช้งานของดิสทริบิวท์อาซีไลน์ฟิลเตอร์
2. เพื่อศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซี (URC) และการนำเอา URC มาต่อเป็นวงจรกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่าน (Active Band Pass Filter)
4. เพื่อศึกษาการประมาณหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชันของวงจรในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์ MATLAB และ โปรแกรม คอมพิวเตอร์ PSPICE ในการ SIMULATED

1.2. แนวความคิดและที่มา

วงจรกรองสัญญาณที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมักจะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) ที่มีอิลิเมนต์ R, C และ L หรือจะเป็นแบบแอกทีฟ ที่ใช้อิลิเมนต์ R, C ต่อกับออปแอมป์ แต่ในส่วนของโครงการนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์วงจรโดยใช้เน็ตเวิร์ก แบบ ดิสทริบิวท์ อาชี ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าและมีขนาดเล็กกว่า

1.3. เนื้อหาของปริญญาณิพนธ์

สำหรับปริญญาณิพนธ์นี้เป็นการนำเอาตัวดิสทริบิวท์อาชีไลน์ฟิลเตอร์ที่เป็นชนิดยูนิฟอร์ม ซึ่งภายในประกอบด้วย ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ จำนวน 3 ตัว ร่วมกับออปแอมป์ 1 ตัว มาใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณแบบเร็นต์ เพื่อที่จะดูว่าผลที่ได้มาทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น ผลตอบสนองทางความถี่, ค่าความไวของวงจรของอุปกรณ์, ค่าอัตราขยาย ของทั้ง 3 แบบ จะเป็นอย่างไร

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงโครงสร้างของดิสทริบิวท์อาชี พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดิสทริบิวท์อาชี โดยการเปลี่ยนสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าไปเป็น สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

ในบทที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ และการออกแบบวงจรดิสทริบิวท์อาชี

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการคำนวณ Transferfunction และ Sensitivity ของวงจรกรองสัญญาณทั้ง 3 แบบ รวมถึงการออกแบบ

ในบทที่ 5 จะเป็นผลที่ได้จากใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และผลจากการ SIMULATED BY P-SPICE ซึ่งก็จะมีผลการตอบสนอง ของวงจรกรองสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบบทที่ 6 จะเป็นผลการทดลอง ที่ได้จากการต่อวงจรใช้งานจริง ของวงจรกรองสัญญาณ

ใบบทที่ 7 ก็จะเป็นการกล่าวถึงสรุปผลของการวิจัย ว่าได้ผลออกมาเป็นอย่างไร ได้ตามทฤษฎีที่ทำการคำนวณหรือไม่

ภาคผนวก เป็นรายละเอียดของโปรแกรมทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงเป็นกราฟ พร้อมทั้งรายละเอียดทั้งหมด โดยสามารถที่จะเลือกแสดงผลได้ 2 ทางคือ 1. จอแสดงผล (Monitor) 2. เครื่องพิมพ์ (Printer)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

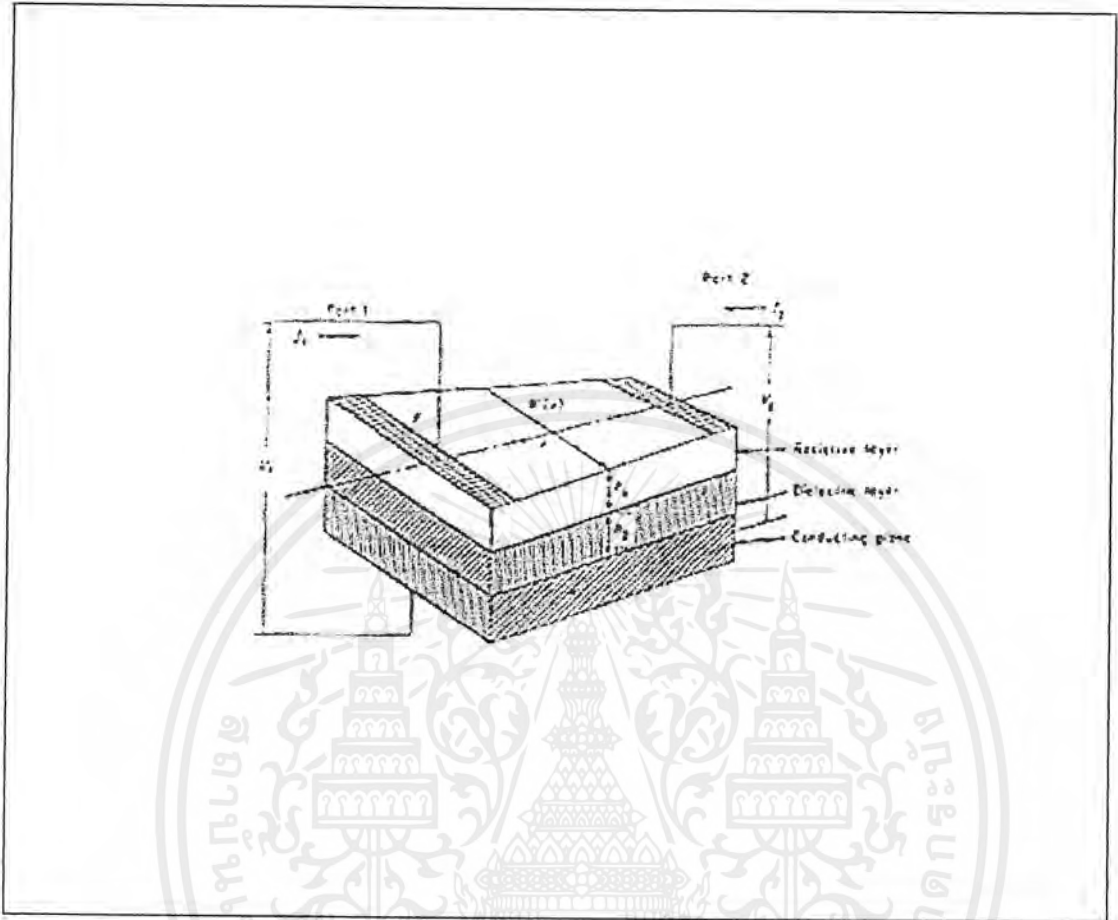
บทที่ 2

โครงสร้างและพารามิเตอร์ของยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีไลน์

Structure and parameter of uniformly distributer RC line

ปริญญาโทฉบับนี้ ได้มีการเสนอการออกแบบวงจร ที่มีส่วนประกอบของเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาซี (Distributed RC) แทนการออกแบบ วงจรที่ใช้ ลัมด์ดิสิเมนต์ (Lumped Element) แบบพาสซีฟ (Passive) หรือ แบบแอคทีฟ (Active) ซึ่งปัจจุบันเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาซีได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยี Thick-Film หรือ Thin-Film ในการผลิตเป็นไอซี (Integrated Circuit) โดยที่เน็ตเวิร์กแบบนี้จะมีลักษณะทั่ว ๆ ไปดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่าเน็ตเวิร์กแบบลัมด์ดิสิเมนต์อาซีซึ่งทำให้การออกแบบวงจรเน็ตเวิร์กดิสทริบิวท์อาซีสามารถนำไปใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาซีจึงถูกสร้างขึ้นมาหลายรูปแบบดังเช่น โครงสร้าง Thin-Film แบบ Multi-Layer ที่มีชั้นของตัวนำ (Conductor) , ความต้านทาน (Resistive) และ ฉนวน (Dielectrics) ประกอบติดเข้าด้วยกันโดยจะมีจุดต่อออกมาด้านข้างของชั้นความต้านทานและตัวนำ หรือมีโครงสร้างในรูปแบบที่เป็น Multi-Contacted P-N Junction ซึ่งตัวต้านทานจะใช้ส่วนประกอบของเซมิคอนดักเตอร์ และตัวเก็บประจุจะใช้ผลของไบแอสที่จังก์ชัน

โครงสร้าง และ พารามิเตอร์ของ ดิสทริบิวท์อาซี โครงสร้างแบบ 2 พอร์ทของดิสทริบิวท์อาซีสามารถ แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ คือ ส่วนบนสุดเป็นชั้นของความต้านทาน (Resistive Layer) รองลงมาเป็นชั้นของฉนวน (Dielectric layer) และ ชั้นของตัวนำ (Conductive layer) โดยมีความหนาของแต่ละชั้นนั้นประมาณ 10^{-5} นิ้ว จึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กมาก (Micro circuits) และสามารถทำให้อยู่ภายในไอซีได้ (Passive Intergrated Circuit) โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ Thin-Film หรือ โครงสร้างแบบ Monolithic



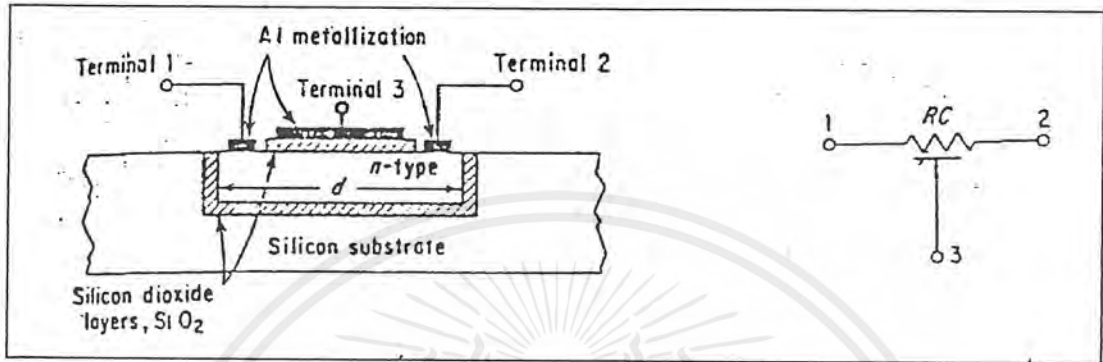
รูปที่ 1.1. แสดงโครงสร้างของ 2 พอร์ตของ Distributed RC

โครงสร้างแบบ Thin-Film ประกอบด้วย ชั้นของวัสดุหลายอย่าง ซึ่งถูกวางอยู่บนตัวกลางที่เหมาะสม (Substrate) ตัวอย่างเช่น แผ่นบาง ๆ ของสาร Dielectric อาจจะถูก Titanate ด้วยแผ่นบางของ Nichrome Resistive Film ซึ่งวางไว้ด้านบนและแผ่น Conductive Copper-Film ที่วางไว้ด้านล่างหุ้มห่อด้วยสาร Dielectric และอยู่บน Passive Substrate ด้วย วิธี Vaporization หรือ Electrochemical Technique

โครงสร้าง Monolithic ประกอบด้วยชั้นของสารเซมิคอนดักเตอร์ถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ เช่น Distributed Resistance ได้มาจาก Lightly Doped เซมิคอนดักเตอร์และ Distributed Capacitance ได้มาจากการป้อนไบแอสกลับข้างของรอยต่อภายใน P-N จังก์ชันตัวอย่างโครงสร้างขอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Uniform Distributed RC ซึ่งอยู่ภายในไอซีแสดงดังรูปที่ 1.2. (a) โดยที่มีสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 1.2 (b)



(a) โครงสร้างของดิสทริบิวต์อาร์ซี

(b) สัญลักษณ์

รูปที่ 1.2. แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของ Uniform Distributed RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

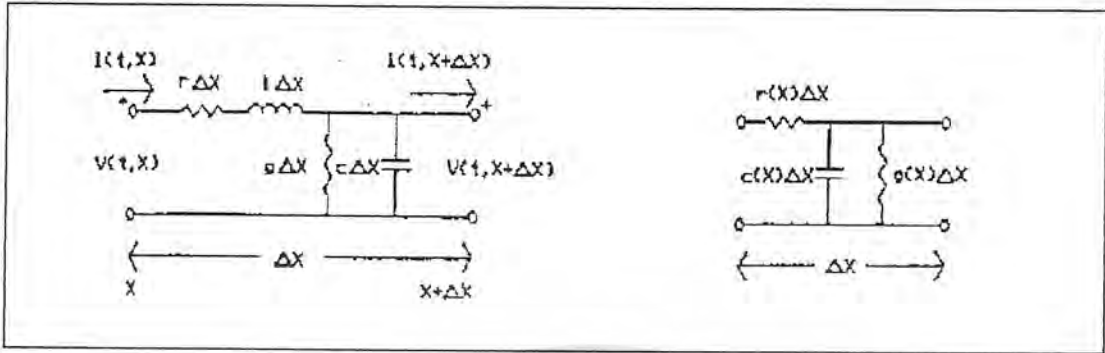
การวิเคราะห์พารามิเตอร์และการออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวต์อาซี

สำหรับในส่วนบทนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง และการออกแบบของวงจรแอกทีฟแบบดิสทริบิวต์อาซี ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์นั้น จะช่วยในการออกแบบวงจรค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวต์อาซีนั่นใช้ หลักการเดียวกันกับของสายส่ง (Transmission Line) ซึ่งเทคโนโลยีสมัยใหม่ไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการออกแบบวงจรโดยใช้ลัมด์อีลิเมนต์ (Lumped Element) แบบพาสซีส (Passive) หรือแบบแอกทีฟ (Active) เท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบวงจรที่มีส่วนประกอบเป็นดิสทริบิวต์อาซี (Distributed Rc) [11,12,14] โดยใช้เทคโนโลยี Thick-Film หรือ Thin-Film ในการผลิตไอซี (Integrated Circuit) เน็ทเวิร์กแบบดิสทริบิวต์อาซียังมีคุณลักษณะทั่ว ๆ ไปที่ดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่า เน็ทเวิร์กแบบลัมด์อาซี ซึ่งทำให้การออกแบบวงจรเน็ทเวิร์กดิสทริบิวต์อาซีสามารถจะนำไปใช้ได้ง่ายและถูกต้องตามหลักเศรษฐศาสตร์

เน็ทเวิร์กแบบดิสทริบิวต์อาซีมีด้วยกันหลายแบบ ตัวอย่างเช่นอาจจะเป็นโครงสร้าง Thin-Film แบบ Multi-Layer ที่มีชั้นของตัวนำ (Conductor) , ความต้านทาน (Resistive) และฉนวน (Dielectrics)ประกอบติดเข้าด้วยกัน โดยชั้นของความต้านทานและตัวนำอาจจะมีจุดต่อออกมาหลายจุดที่ขอบทางด้านข้าง ดิสทริบิวต์อาซีอาจอยู่ในรูปแบบที่เป็น Multi - Contacted P-N Junction ซึ่งตัวความต้านทานจะใช้ส่วนประกอบของเซมิคอนดิสทริบิวต์อาซีใช้หลักการเดียวกันกับของสายส่ง (Transmission Line) พร้อมทั้งเปรียบเทียบโครงสร้างและพารามิเตอร์ระหว่างเน็ทเวิร์กแบบลัมด์และแบบดิสทริบิวต์

3.1. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวต์อาซี

จากรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างของสายส่ง (Transmission Line) ที่มีค่าพารามิเตอร์ อินดักแตนซ์ (L) , คาปาซิแตนซ์ (C) , รีซิสเตอร์ (R) , และ คอนดักแตนซ์ กระจายอยู่ตลอดความยาวสายถ้าค่า พารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีความสัมพันธ์ กับความยาวของสาย เรียกสายส่งชนิดนี้ว่าสายส่งแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Transmission Line)



(ก) โครงสร้างของสายส่ง

(ข) โครงสร้างของ Distributed RC

รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของสายส่ง และดิสทริบิวท์เอซี

จากพิจารณา Network ที่แสดงอยู่ในเทอมของสายส่งที่มีความยาวไม่เกิน x โดยใช้สมการ equilibrium equation ของวงจร โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ

$$v(t, x + \Delta x) - v(t, x) = -R_i(t, x) \Delta x \quad (3.1)$$

$$i(t, x + \Delta x) - i(t, x) = -\Delta x C \partial v(t, x + \Delta x) / \partial t \quad (3.2)$$

ทำการหารสมการ 3.1 ด้วย Δx และ take limite ให้ Δx เข้าใกล้ศูนย์จะทำให้สมการอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\partial v(t, x) / \partial x = -R_i(t, x) \quad (3.3)$$

$$\partial i_{(t,x)} / \partial x = -C \partial v_{(t,x)} / \partial t \quad (3.4)$$

นำสมการ 3.3 ทำการ take laplace โดยเทียบกับเวลา

$$V_{(s,x)} = \ell [v_{(t,x)}] = \int_0^\infty v_{(t,x)} e^{-st} dt \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถที่จะนำสมการ 3.5 มาหาอนุพันธ์ โดยเทียบกับ x

$$\begin{aligned} \frac{L[\partial v_{(t,x)}]}{\partial x} &= \int^{\alpha} \frac{\partial v_{(t,x)} e^{-st}}{\partial x} dt = \int^{\alpha} \frac{\partial v_{(t,x)} e^{-st}}{\partial x} dt \\ &= \partial v_{(s,x)} / \partial x \end{aligned} \quad (3.6)$$

คือการสู่เข้าอย่างมีรูปแบบเมื่อเทียบกับ x ซึ่งทราบกันดีว่าสถานะนี้ เราเรียกว่า Boundary Condition และเทียบกับ t เมื่ออยู่ในสถานะเริ่มต้น ถ้าสถานะเริ่มต้นเราสมมติให้เท่ากับศูนย์สมการทรานส์ฟอร์ม ที่ตอบสนองสมการ (3.3) คือ

$$\frac{\partial v_{(s,x)}}{\partial x} = -R I(s,x) \quad (3.7)$$

เราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของ Ordinary differential equation

$$\frac{d}{dx} V(s,x) = -R I(s,x) \quad (3.8)$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการของกระแส จะได้

$$\frac{d}{dx} I(s,x) = -S C V(s,x) \quad (3.9)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (3.8) เทียบกับ x และ c ไม่ได้เป็นฟังก์ชันของ x โดยให้

$$\frac{d^2}{dx^2} V(s,x) = -R \frac{d}{dx} I(s,x) \quad (3.10)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (3.9) เทียบกับ x เช่นเดียวกับ (3.10)

$$\frac{d^2}{dx^2} I(s,x) = -S C R V = 0 \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายส่งแบบยูนิฟอร์ม ทำการแทน (3.9) ลงใน (3.10) และ (3.8) ลงใน (3.11)

$$\frac{d^2}{dx^2} V - SCR V = 0 \quad (3.12)$$

และ

$$\frac{d^2}{dx^2} I - SCR I = 0 \quad (3.13)$$

สมการ (3.12) อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับที่สองแบบสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่

$$a_0 \frac{d^2 y}{dx^2} + a_1 \frac{dy}{dx} + a_2 y = 0, \quad (a_0 \neq 0)$$

และคำตอบสมการคือ

$$Y = e^{\sigma_1 t} (A \cos w_n t + B \sin w_n t)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\sigma_1 = \frac{-a_1}{2a_0} \text{ และ } w_n = \frac{\sqrt{4a_0 a_2 - a_1^2}}{2a_0} \quad A, B \text{ ใดๆ}$$

เป็นฟังก์ชันของ x และสามารถกำหนดได้จากสมการ boundary conditions (3.12) และ (3.13),

เมื่อ $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = -SCR$ และ $w_n = \frac{-4SCR}{2a_0} = j\sqrt{SCR}$

$$\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$$

$$\cos w_n = \frac{\cos j\sqrt{SCR} = e^{\sqrt{SCR}} + e^{-\sqrt{SCR}}}{2} = \cosh \sqrt{SCR}$$

$$\sin w_n = \sinh \sqrt{SCR}$$

เราสามารถทราบได้จาก

$$V_{(s,x)} = A_1 \cosh \sqrt{SCR} x + A_2 \sinh \sqrt{SCR} x \quad (3.14)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{(s,x)} = B_1 \cosh \sqrt{SCR} x + B_2 \sinh \sqrt{SCR} x \quad (3.15)$$

สำหรับสายส่งที่มีความหมาย d ซึ่งแสดงโดย two port network สภาวะ boundary ที่อินพุท คือ $V_{(s,0)}$, $I_{(s,0)}$ และที่เอาต์พุทคือ $V_{(s,d)}$ และ $I_{(s,d)}$ และที่เอาต์พุทคือ $V_{(s,d)}$ และ $I_{(s,d)}$ จากสมการ (3.14) เมื่อ $x = 0$ เราให้

$$A_1 = V_{(s,0)}, \quad B_2 = I_{(s,0)} \quad (3.16)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล (3.14) เทียบกับ x และใช้สมการ (3.8) และ (3.9) กำหนดค่า $x=0$ จะได้ผล A_2 และ B_2

$$(3.14); \quad \frac{d V_{(s,x)}}{dx} = A_1 \frac{d \cosh \sqrt{SCR} x}{dx} + B_2 \frac{d \sinh \sqrt{SCR} x}{dx}$$

$$\frac{d V_{(s,0)}}{dx} = \left\{ -\sinh \sqrt{SCR} x \left[\sqrt{SCR} + x \frac{d \sqrt{SCR}}{dx} \right] \right\} x = 0$$

$$+ A_2 \left\{ \cosh \sqrt{SCR} x \left[\sqrt{SCR} + x \frac{d \sqrt{SCR}}{dx} \right] \right\} x = 0$$

$$\frac{d V_{(s,0)}}{dx} = \sqrt{SCR} A_2$$

$$A_2 = -\sqrt{\frac{R}{SC}} I_{(s,0)} = -Z_0 I_{(s,0)} \quad (3.17)$$

$$(3.15); \quad \frac{d I_{(s,x)}}{dx} = B_1 \frac{d \cosh \sqrt{SCR} x}{dx} + B_2 \frac{d \sinh \sqrt{SCR} x}{dx}$$

$$\frac{d I_{(s,0)}}{dx} = \sqrt{SCR} B_2$$

$$B_2 = -\sqrt{\frac{SC}{R}} V_{(s,0)} = \frac{-1 V_{(s,0)}}{Z_0} \quad (3.18)$$

ในขณะที่ Z_0 คือค่า characteristic impedance ของ uniform line = $\sqrt{R/SC}$ อินพุทและเอาต์พุทของ two port RC line แสดงอยู่ในสมการ (3.14), (3.16) และ (3.17) แทนสมการ (3.16) และ (3.17) ลงใน (3.14)

$$V_{(s,d)} = V_{(s,0)} \cosh \sqrt{SCR} d - I_{(s,0)} Z_0 \sinh \sqrt{SCR} d \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-I_{(s,o)} = [V_{(s,o)} \cosh \sqrt{SCR} d] / Z_0 - I_{(s,o)} \sinh \sqrt{SCR} d \quad (3.20)$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{(s,d)} \\ -I_{(s,o)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{SCR} d & Z_0 \sinh \sqrt{SCR} d \\ [\sinh \sqrt{SCR} d] / Z_0 & \cosh \sqrt{SCR} d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(s,o)} \\ -I_{(s,o)} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

เราจะแทนค่าต่าง ๆ โดยใช้สัญลักษณ์ AA BB CC DD

$$\begin{aligned} AA &= \cosh \sqrt{SCR} d & BB &= Z_0 \sinh \sqrt{SCR} d \\ CC &= [\sinh \sqrt{SCR} d] / Z_0 & DD &= \cosh \sqrt{SCR} d \end{aligned} \quad (3.22)$$

ซึ่งพารามิเตอร์ AA BB CC DD จะนำไปทำการเปลี่ยนเป็นค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์วงจรเปิด Z_{ij} และค่าแอดมิตแตนซ์ชอร์ตเซอร์กิต Y_{ij} จากการใช้สูตรการเปลี่ยน จากตาราง 1-1

$$\begin{bmatrix} Z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD/CC & 1/CC \\ \Delta AA/CC & AA/CC \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} Y_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA/BB & -1/BB \\ -\Delta AA/BB & DD/BB \end{bmatrix}$$

$$\text{เมื่อ } \Delta AA = AA_{11} AA_{22} - AA_{12} AA_{21}$$

ดังนั้นพารามิเตอร์ของ UNIFORM RC LINE คือ

$$\begin{bmatrix} Y_{ij} \end{bmatrix} = \sqrt{SC/R} \begin{bmatrix} \frac{\cosh \sqrt{SCR} d}{\sinh \sqrt{SCR} d} & \frac{-1}{\sinh \sqrt{SCR} d} \\ -\frac{1}{\sinh \sqrt{SCR} d} & \frac{\cosh \sqrt{SCR} d}{\sinh \sqrt{SCR} d} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sqrt{SCR/R} \sinh \sqrt{SCR} d \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{SCR} d & -1 \\ -1 & \cosh \sqrt{SCR} d \end{bmatrix}$$

$$\left[Z_{ij} \right] = \sqrt{R/SC} \begin{bmatrix} \frac{\cosh \sqrt{SCR} d}{\sinh \sqrt{SCR} d} & \frac{1}{\sinh \sqrt{SCR} d} \\ \frac{1}{\sinh \sqrt{SCR} d} & \frac{\cosh \sqrt{SCR} d}{\sinh \sqrt{SCR} d} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

ถ้าความยาว d เท่ากับ unity ค่าพารามิเตอร์ของ open-circuit impedance และ short-circuit admittance ของ URC คือ

$$\left[Z \right] = R/\sqrt{SCR} \sinh \sqrt{SCR} \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{SCR} & -1 \\ -1 & \cosh \sqrt{SCR} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

และ

$$\left[Y \right] = \sqrt{SCR/R} \sinh \sqrt{SCR} \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{SCR} & -1 \\ -1 & \cosh \sqrt{SCR} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

จากสมการ two - port admittance

$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (3.27)$$

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (3.28)$$

ให้ค่า $I_2 = 0$ เราจะได้ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$V_2/V_1 = -Y_{21}/Y_{22} = 1/\cosh \sqrt{SCR} \quad \text{เมื่อ } I_2 = 0 \quad (3.29)$$

โดยการกระจายอนุกรมกำลังของฟังก์ชัน $\cosh x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \cosh \sqrt{SCR} &= 1 + \frac{(\sqrt{SCR})^2}{2!} + \frac{(\sqrt{SCR})^4}{4!} + \frac{(\sqrt{SCR})^6}{6!} + \frac{(\sqrt{SCR})^8}{8!} + \dots \\ &= 1 + \frac{SCR}{2} + \frac{(SCR)^2}{24} + \frac{(SCR)^3}{720} + \dots \\ &= 1 + SCR/2 = (2 + SCR) / 2 \end{aligned} \tag{3.30}$$

สุดท้ายจะได้

$$\begin{aligned} V_2 / V_1 = -Y_{21} / Y_{22} = 1 / \cosh \sqrt{SCR} = 2 / (2 + SCR) ; \text{ เมื่อ } I_2 = 0 \\ = 2 / (2 + SCR) = 2 / (2 + jwCR) ; \text{ เมื่อ } S = jw \end{aligned} \tag{3.31}$$

จาก $SCR = jwCR$; เมื่อ $s = jw$ จะได้

$$\begin{aligned} \sqrt{SCR} &= \sqrt{jwCR} ; \text{ เมื่อ } S = jw \text{ จะได้} \\ (\sqrt{jwCR}) &= (A + jB)^2 = A^2 - B^2 + j2AB ; \text{ ให้ } A = B \\ &= 0 + jwCR = A^2 - B^2 + j2AB \end{aligned} \tag{3.32}$$

เทียบสัมประสิทธิ์ ; $A^2 - B^2 = 0$

$$\text{และ } 2AB = wCR$$

$$A = wCR/2 = B$$

(3.33)

แทนสมการ (3.33) ลงใน $jwCR$

$$jwCR = wCR/2 + jwCR/2$$

ให้ $t = wCR/2$

$$SCR = jwCR = t + jt$$

ดังนั้น

$$V_2 / V_1 = 1 / \cosh(t + jt) = 1 / [\cosh * \cos t + j \sinh t * \sin t] \tag{3.34}$$

ค่าสัมบูรณ์ (3.34) จะอยู่ในรูป

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \sqrt{\cosh^2 \sqrt{wCR/2} * \cos^2 \sqrt{wCR/2} + \sinh^2 \sqrt{wCR/2} * \sin^2 \sqrt{wCR/2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8 UNIFORMLY DISTRIBUTED SYSTEMS AND PASSIVE INTEGRATED CIRCUITS

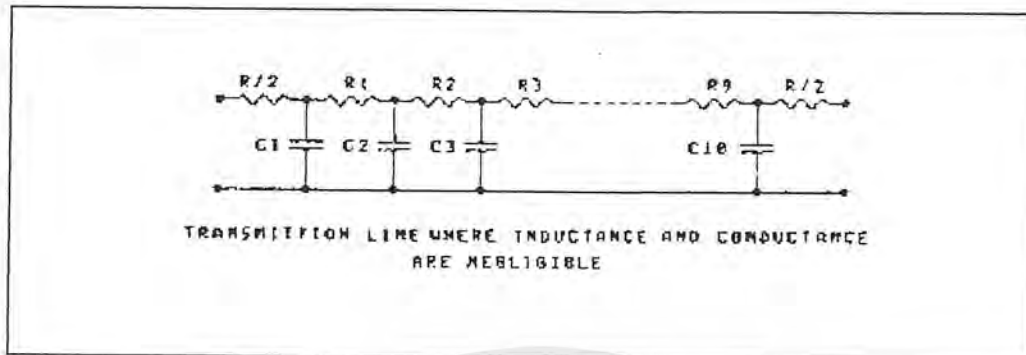
Table 1-1 CONVERSION OF TWO-PORT MATRIX PARAMETERS*

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{A} & \mathcal{B} \\ \mathcal{C} & \mathcal{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

(z_{ij})	z_{11} z_{21}	z_{12} z_{22}	$\frac{z_{22}}{\Delta_z}$ $-\frac{z_{12}}{\Delta_z}$	$-\frac{z_{21}}{\Delta_z}$ $\frac{z_{11}}{\Delta_z}$	$\frac{A}{C}$ $\frac{1}{C}$	$\frac{\Delta_z}{C}$ $\frac{D}{C}$	$\frac{B}{C}$ $\frac{\Delta_z}{C}$	$\frac{1}{C}$ $\frac{D}{C}$
(y_{ij})	$\frac{y_{22}}{\Delta_y}$ $-\frac{y_{12}}{\Delta_y}$	$-\frac{y_{21}}{\Delta_y}$ $\frac{y_{11}}{\Delta_y}$	y_{11} y_{21}	y_{12} y_{22}	$\frac{D}{B}$ $-\frac{1}{B}$	$-\frac{\Delta_y}{B}$ $\frac{A}{B}$	$\frac{A}{B}$ $-\frac{\Delta_y}{B}$	$-\frac{1}{B}$ $\frac{D}{B}$
$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$	$\frac{z_{22}}{z_{11}}$ $\frac{1}{z_{21}}$	$\frac{\Delta_z}{z_{11}}$ $\frac{z_{12}}{z_{11}}$	$-\frac{y_{22}}{y_{11}}$ $-\frac{\Delta_y}{y_{11}}$	$-\frac{1}{y_{11}}$ $-\frac{y_{12}}{y_{11}}$	A C	B D	$\frac{B}{\Delta_z}$ $\frac{C}{\Delta_z}$	$\frac{\Delta_z}{\Delta_z}$ $\frac{A}{\Delta_z}$
$\begin{bmatrix} \mathcal{A} & \mathcal{B} \\ \mathcal{C} & \mathcal{D} \end{bmatrix}$	$\frac{z_{22}}{z_{11}}$ $\frac{1}{z_{21}}$	$\frac{\Delta_z}{z_{11}}$ $\frac{z_{12}}{z_{11}}$	$-\frac{y_{11}}{y_{21}}$ $-\frac{\Delta_y}{y_{21}}$	$-\frac{1}{y_{21}}$ $-\frac{y_{12}}{y_{21}}$	$\frac{D}{\Delta_z}$ $\frac{C}{\Delta_z}$	$\frac{B}{\Delta_z}$ $\frac{A}{\Delta_z}$	\mathcal{A} \mathcal{C}	\mathcal{B} \mathcal{D}

* All matrices appearing in the same row in the table are equivalent; for example, $z_{11} = A/C$. Δ is the matrix determinant; for example, $\Delta_z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$. For a reciprocal network, $z_{12} = z_{21}$, and so forth. For a symmetrical network, $z_{11} = z_{22}$, and so forth.

ในการทำงานเดียวกันจากรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างเน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ตของ Distributed RC โดยมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของสายส่ง รูปที่ 3.1 (ก) ขณะที่ค่าของความนำ g นั้นมีค่าน้อยมาก ๆ จนสามารถตัดทิ้งได้คือให้ค่า g เป็นศูนย์ ก็จะได้เน็ตเวิร์กแบบดิสมิทริบิวท์อาซี ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของดิสรีวิวท์อาชีเมื่อค่าความนำ g มีค่าน้อยมาก ๆ

ถ้าค่าของรีซิสแตนซ์ R และค่าพาซิสแตนซ์ C ไม่แปรเปลี่ยนไปตามความยาวของ x ก็จะเป็นแบบ Uniform Distributed RC เช่นเดียวกันกับสายส่งแต่ถ้าแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของ x ก็จัดเป็นแบบ Nonuniform Distributed RC โดยสัญลักษณ์ทั้งสองแบบนี้แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเส้นโค้งบ่งบอกว่า เป็นเน็ตเวิร์กแบบ Nonuniform Distributed RC ในขณะที่เส้นตรงนั้นจะเป็นเน็ตเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC (URC) ซึ่งในการวิเคราะห์และการออกแบบจะใช้เน็ตเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC Line หรือใช้ชื่อย่อว่า URC แสดงในรูปที่ 3.3 (ข)



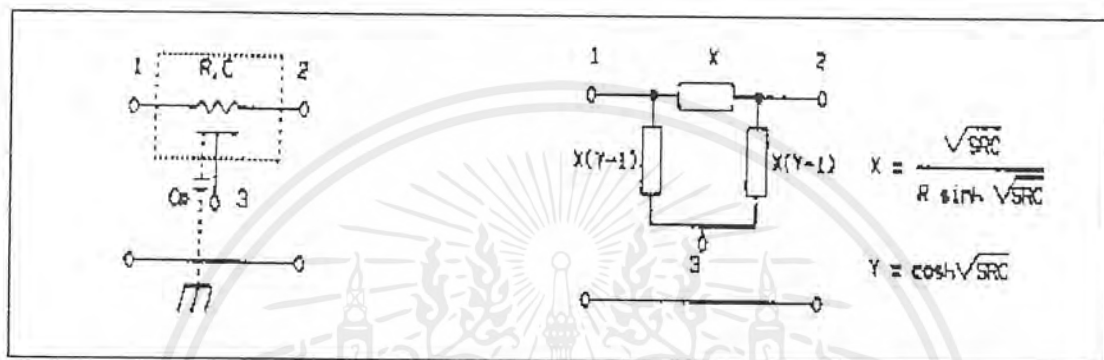
(ก) Nonuniform

(ข) Uniform

รูปที่ 3.3 แสดงสัญลักษณ์ของ Distributed RC

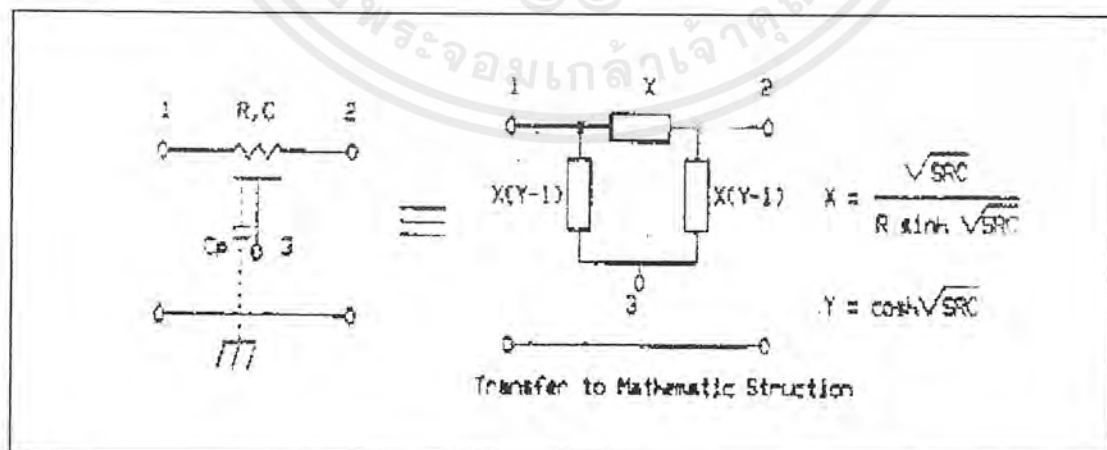
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์เน็ทเวิร์ก แบบดิสทริบิวท์อาชีนั้นจะใช้ตัว ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี (Uniformly Distributed RC ; URC) แบบ 3 พอร์ต มาทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ พิจารณารูปที่ 3.4 (ก) ซึ่งแสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า



(ก) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า (ข) แสดงสัญลักษณ์เพื่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์
รูปที่ 3.4 แสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแบบ 3 port ของ URC

และเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์จะทำ การแปลงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า เป็นสัญลักษณ์ในทางคณิตศาสตร์ดัง ในรูปที่ 3.4 (ข) และอาศัย Floating Matrix ทำการหาค่า Asmittance Parameter $[Y_{ij}]$ ของ URC



รูปที่ 3.5 แสดงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเน็ทเวิร์กยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีโดยใช้ Floating Matrix ทำการหาค่า

Admittance Parameter $[Y_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \\ 0 & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xy & -x & -x(y-1) \\ -x & xy & -x(y-1) \\ -x(y-1) & -x(y-1) & 2x(y-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$= X \begin{bmatrix} y & -1 & -(Y-1) \\ -1 & Y & -(Y-1) \\ -(Y-1) & -(Y-1) & 2(Y-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

เมื่อแทนค่า $X = SRC/R \sinh SRC$ และ $Y = \cosh SRC$

(หมายเหตุ ค่า x และ Y ที่ถูกกำหนดขึ้นนี้มาจากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างแบบลัมต์อีลิเมนต์เช่นเดียวกับสายส่ง) ดังนั้นจะได้ พารามิเตอร์ความนำของเน็ทเวิร์กแบบยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี (Admittance Parameter)

$$[Y_{ij}] = \frac{SRC}{R \sinh SRC} \begin{bmatrix} \cosh SRC & -1 & 1 - \cosh SRC \\ -1 & \cosh SRC & 1 - \cosh SRC \\ 1 - \cosh SRC & 1 - \cosh SRC & 2(\cosh SRC - 1) \end{bmatrix}$$

เมื่อ R และ C นั้นเป็นค่าผลรวมของรีซิสแตนซ์ และ ค่าพิสแตนซ์ ของตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี ตามลำดับ และ S เป็นตัวแปร ความถี่เชิงซ้อน (complex - Frequency Variable) เนื่องจากการแปลงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าในรูปที่ 3.4 (ข) จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และการออกแบบเพื่อที่จะเอาตัว URC ไปใช้งานได้สะดวกมากขึ้น

ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้หลักการดังกล่าวข้างต้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหา ค่าพารามิเตอร์เน็ทเวิร์กของ ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีแบบ 2 พอร์ท ซึ่งจะนำไปในการออกแบบวงจรในบทต่อไปได้ดังนี้

จากรูปเมื่อแปลงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า เป็นสัญลักษณ์เพื่อการวิเคราะห์ทางพีชคณิตแล้ว อาศัยหลักการดังกล่าวจะได้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XY & -X \\ -X & XY \end{bmatrix} \\ = X \begin{bmatrix} Y & -1 \\ -1 & Y \end{bmatrix}$$

เมื่อแทนค่าของ $X = SRC / (R \sinh SRC)$ และ $Y = \cosh SRC$ จะได้ Admittance Parameter

$[Y_{ij}]$

$$[Y] = \frac{SRC}{R \sinh SRC} \begin{bmatrix} \cosh SRC & -1 \\ -1 & \cosh SRC \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

3.2 การออกแบบวงจรแอกทีฟที่พิดิสทริบิวท์อาชี

การสังเคราะห์วงจรแอกทีฟ (Active) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยทั่วไปจะใช้โอปแอมป์ ร่วมกับพาสซีฟอีลิเมนต์ R กับ C เราเรียกวงจรดังกล่าวนี้ว่าแอกทีฟอาชี เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ วงจรพาสซีฟ (Passive) ซึ่งใช้อิเล็กเมนต์ R, C และ L แล้ว จะเห็นได้ว่าวงจรแอกทีฟอาชี มีข้อดีที่ว่า มีน้ำหนักน้อย ไม่ต้องการพื้นที่มาก และสามารถทำเป็นรูปแบบย่อเล็ก ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีของ Integrated Circuit เมื่อทำเป็น Mass- Product แล้วราคาก็ไม่แพงมีขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งวงจรที่มี Inductor (L) ยังต้องทำเป็น Discrete Component ที่ราคายังแพง เมื่อใช้แอกทีฟอาชี เช่น วงจรแบบ Sallen and Key ในการสร้างวงจรกรองความถี่ ถ้าหากนำไปผลิตเป็นไอซีแบบ LSI ที่มีขนาดเล็ก ผลของ Parasitic Capacitors ระหว่างตัวความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) กับ Substrate ของไอซี อาจมีผลทำให้คุณลักษณะของวงจรเปลี่ยนแปลงไป จากที่กล่าวมาแล้วในบทนี้ จะเสนอวิธีการออกแบบ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง และวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โดยใช้ออปแอมป์ ร่วมกับยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี 2 ตัว ซึ่งเรียกวงจรแบบนี้ว่า วงจรแอกทีฟพิดิสทริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิวท์อาซี (Active Distributed RC) โดย วงจรที่ออกแบบได้นั้นนอกจากจะมีข้อดีเหมือนวงจรแอกทีฟอาซีแล้วยังมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ดี สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็กโดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัว ยูนิฟอร์ม ดิสทริบิวท์อาซี กับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูงนอกจากนี้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีที่ออกแบบได้นั้นยังมีค่าพารามิเตอร์ α ซึ่งสามารถกำหนดค่าของผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาหาค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบได้

3.3 ความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity)

การออกแบบวงจรใด ๆ จะต้องพิจารณาถึงค่าอิลิเมนต์แต่ละตัว เพราะค่าอิลิเมนต์ที่ใช้งานจริง ๆ แล้วจะไม่มีค่าตรงตามอุดมคติ ค่าผิดพลาดที่ได้เกิดจากผลรวมของความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่เกิดจากกรรมวิธีในการผลิตเอง และคุณลักษณะทางโครงสร้างของอิลิเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตาม สภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น อุณหภูมิห้อง , ความชื้น , ความเข้ม ของแสงสว่าง และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ เหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของอิลิเมนต์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่อาจเปลี่ยนแปลงไม่ตรงตามคำนวณ

เช่นซิวิตีตีเป็นค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่เอาท์พุทของวงจรซึ่งเป็นผลมาจากการแปรผันของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวต้านทาน (Resistor) , ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) , ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor) , ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์และค่าอัตราขยายของ ออปแอมป์ (Operation Amplifier) ซึ่งแน่นอนว่าวงจรที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซ็นซิวิตีตีมากจะมีการแปรผันของพารามิเตอร์ภายในวงจรมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองทางด้าน เอาท์พุทเกิดความผิดเพี้ยนได้ง่าย ฉะนั้นโครงสร้างของวงจรที่ดีจึงควรมีค่าเซ็นซิวิตีตีแต่ละตัวต่ำ จะทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและยังไม่ ต้องเลือกใช้ค่าของอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

การหาเซ็นซิวิตี้ในวงจรถ้าได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน วงจร โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้

$$S_{x_i}^{T(s)} = \frac{X_i}{T(s)} \frac{\partial T(s)}{\partial X_i} \quad \dots (3.35)$$

เมื่อ X_i แทนค่าของอิลิเมนต์แต่ละตัวในวงจร ถ้าแทน S ด้วย $j\omega$ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $T(s)$ จะได้

$$T(j\omega) = |T(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad \dots(3.36)$$

แทนค่าสมการ (3.36) ลงในสมการ (3.35) ค่าฟังก์ชันของเซ็นซิวิตี้ สามารถเขียนได้เป็น

$$S_{x_i}^{T(j\omega)} = \frac{X_i}{|T(j\omega)| e^{j\phi(\omega)}} \frac{\partial}{\partial X_i} \left[|T(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \right] \quad \dots (3.37)$$

จากสมการ (3.37) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามารถเขียนเป็นจำนวนเชิงซ้อนได้คือ

$$S_{x_i}^{T(j\omega)} = \frac{X_i}{|T(j\omega)|} \cdot \frac{\partial |T(j\omega)|}{\partial X_i} + j X_i \frac{\partial \phi(\omega)}{\partial X_i} \quad \dots(3.38)$$

จากสมการ (3.38) จะได้ว่า

$$S_{x_i}^{|T(j\omega)|} = \text{Re } S_{x_i}^{T(j\omega)} \quad \dots(3.39)$$

$$S_{x_i}^{\phi(\omega)} = \frac{1}{e^{j\phi(\omega)}} \text{Im } S_{x_i}^{T(j\omega)} \quad \dots(3.40)$$

จากสมการ (3.39) จะเป็นฟังก์ชันในการหาเซ็นซิวิตี้ของ Magnitude $|T(j\omega)|$ ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} S_x \left|_{T(\omega)} \right| &= \operatorname{Re} \left[\frac{X_i}{T(s)} \cdot \frac{\partial}{\partial X_i} T(s) \right] \\ &= \operatorname{Re} \left[x_i \left[\frac{N'(s)}{N(s)} - \frac{D'(s)}{S(s)} \right] \right] \end{aligned}$$

เมื่อ $N(s)$ เป็นโพลีโนเมียลเศษของ $T(s)$

$D(s)$ เป็นโพลีโนเมียลส่วนของ $T(s)$



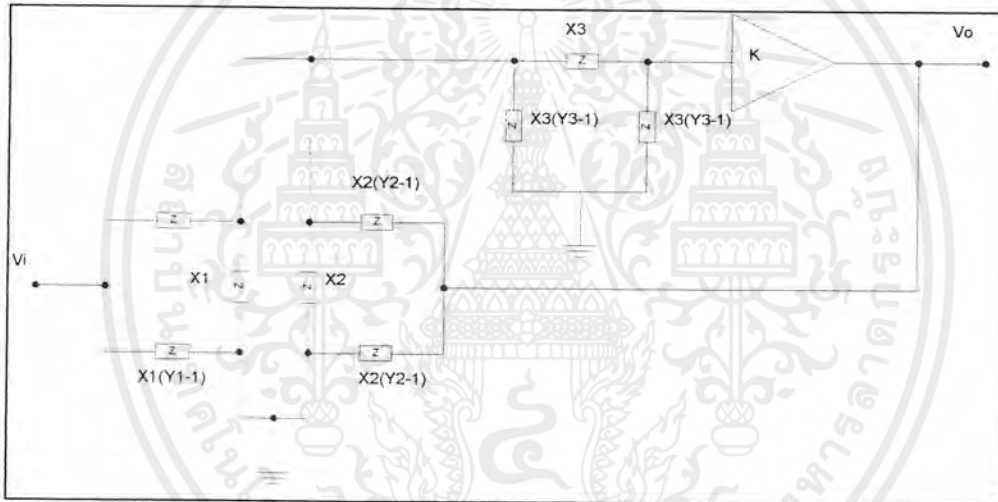
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การคำนวณ Transfer Function และ Sensitivity

ในบทนี้จะเป็นวิธีการคำนวณค่า Transfer function และค่า Sensitivity ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังต่อไปนี้

4.1 การคำนวณหา Transfer function ของวงจร Renz



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกรองความถี่แบบเร็นท์ (Renz Band Pass Filter)

จากวงจรข้างบนสามารถเขียน Matrix ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & -x_1(y_1 - 1) & 0 & 0 \\ -x_1(y_1 - 1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & -x_3 & -x_2(y_2 - 1) \\ 0 & -x_3 & x_3y_3 & 0 \\ 0 & -x_2(y_2 - 1) & 0 & 2x_2(y_2 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียน Matrix ใหม่ โดยนำค่า K มาพิจารณาด้วย

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & -x_1(y_1 - 1) & 0 \\ -x_1(y_1 - 1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & -\{x_3/K + x_2(y_2 - 1)\} \\ 0 & -x_3 & x_3y_3/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

คำนวณ Transfer function จาก

$$\begin{aligned} \frac{V_0}{V_i} &= \frac{V_4}{V_1} = \frac{\Delta_4}{\Delta_1} \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} I_1 & -x_1(y_1 + 1) & 0 \\ 0 & x_1y_1 + x_2y_3 + x_3y_3 & -\{x_3/K + x_2(y_2 - 1)\} \\ 0 & -x_3 & x_3y_3/K \end{vmatrix} \\ &= \left\{ (x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3) \frac{x_3y_3}{k} - x_3 \left(\frac{x_3}{k} + x_2(y_2 - 1) \right) \right\} I_1 \\ \Delta_4 &= \begin{vmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & -x_1(y_1 - 1) & I_1 \\ -x_1(y_1 - 1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & 0 \\ 0 & -x_3 & 0 \end{vmatrix} x_1x_3(y_1 - 1)I_1 \\ \frac{V_0}{V_i} &= \frac{x_1x_3(y_1 - 1)}{\frac{x_3y_3(x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3)}{K} - x_3 \left(\frac{x_3}{K} + x_2(y_2 - 1) \right)} \\ &= \frac{Kx_1x_3(y_1 - 1)}{x_3y_3(x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3) - x_3(x_3 + Kx_2(y_2 - 1))} \\ \frac{V_0}{V_i} &= \frac{Kx_1x_3(y_1 - 1)}{x_1x_3y_1y_3 + x_2x_3y_2y_3 + x_3^2y_3^2 - x_3^2 - Kx_2x_3(y_2 - 1)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป $x_1 = x_2 = x_1$, $y_1 = y_2 = y_1$ จะได้

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{Kx_1x_3(y_1-1)}{x_1x_3y_1y_3 + x_1x_3y_1y_3 + x_3^2y_3^2 + x_3^2 - Kx_1x_3(y_1-1)} \quad (4.1)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{Kx_1(y_1-1)}{2x_1y_1y_3 + x_3(y_3^2-1) - Kx_1(y_1-1)}$$

กำหนดให้ $x_1 = \frac{p_1}{R_1 \sinh p_1}$, $x_3 = \frac{p_3}{R_3 \sinh p_3}$, $y_1 = \cosh p_1$, $y_3 = \cosh p_3$

$$P = \sqrt{SR_1C_1} = \sqrt{SR_3C_3} = \sqrt{SRC}$$

และ $\frac{R_1}{R_3} = \frac{C_3}{C_1} = \alpha$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{K(y_1-1)}{2y_1y_3 + \frac{x_3}{x_1}(y_3^2-1) - K(y_1-1)}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{K(\cosh p_1 - 1)}{2 \cosh p_1 \cosh p_3 + \frac{p_3}{p_1} \frac{R_1 \sinh p_1}{R_3 \sinh p_3} (\cosh^2 p_3 - 1) - K(\cosh p_1 - 1)}$$

$$P_1 = P_3 = P$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{K(\cosh p - 1)}{2 \cosh^2 p + \frac{R_1}{R_3} (\cosh^2 p - 1) - K(\cosh p - 1)}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{K(\cosh p - 1)}{2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cosh 2p\right) + \alpha\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cosh 2p - 1\right) - K(\cosh p - 1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{K(\cosh p - 1)}{1 + \cosh 2p + \alpha \left(\frac{1}{2} \cosh 2p - \frac{1}{2} \right) - K(\cosh p - 1)}$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{2K(\cosh p - 1)}{2 + 2 \cosh 2p + \alpha \cosh 2p - \alpha - 2K(\cosh p - 1)}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{2K(\cosh p - 1)}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha) \cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)} \quad (4.2)$$

4.2 ค่าพหุคูณ Sensitivity of K ของวงจร Renz BPF

จาก Transfer function (4.2) ที่คำนวณได้

$$T(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{2K(\cosh p - 1)}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha) \cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)}$$

$$S_k^{T(p)} = K \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N(p) = 2K(\cosh p - 1)$$

$$N'(p) = 2(\cosh p - 1)$$

$$D(p) = (2 - \alpha) + (2 + \alpha) \cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)$$

$$D'(p) = -2(\cosh p - 1)$$

$$S_k^{T(p)} = K \left\{ \frac{2(\cosh p - 1)}{2K(\cosh p - 1)} + \frac{2(\cosh p - 1)}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha) \cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1 + \frac{2K(\cosh p - 1)}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha)\cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)}$$

$$= \frac{(2 - \alpha) + (2 + \alpha)\cosh 2p - 2K(\cosh p - 1) + 2K(\cosh p - 1)}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha)\cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)}$$

$$S_k^{T(p)} = \frac{(2 - \alpha) + (2 + \alpha)\cosh 2p}{(2 - \alpha) + (2 + \alpha)\cosh 2p - 2K(\cosh p - 1)} \quad (4.3)$$

4.3 การคำนวณ Sensitivity อุปกรณ์ต่างๆของวงจร Renz

จาก Transfer function

$$T(p) = \frac{Kx_1(y_1 - 1)}{x_1y_1y_3 + x_2y_2y_3 + x_3y_3^2 - x_3 - Kx_2(y_2 - 1)}$$

เมื่อ $x_1 = \frac{p_1}{R_1 \sinh p_1}$, $x_2 = \frac{p_2}{R_2 \sinh p_2}$ และ $x_3 = \frac{p_3}{R_3 \sinh p_3}$

$y_1 = \cosh p_1$, $y_2 = \cosh p_2$ และ $y_3 = \cosh p_3$

จะได้

$$T(p) = \frac{K \frac{p_1}{R_1 \sinh p_1} (\cosh p_1 - 1)}{\frac{p_1}{R_1 \sinh p_1} \cosh p_1 \cosh p_3 + \frac{p_2}{R_2 \sinh p_2} \cosh p_2 \cosh p_3 + \frac{p_3}{R_3 \sinh p_3} (\cosh^2 p_3 - 1) - \frac{p_2}{R_2 \sinh p_2} K(\cosh p_2 - 1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่เป็น

$$T_{(p)} = \frac{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{\sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 + \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) - K \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1)}$$

เมื่อ

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{R_1}{R_2} \frac{\sqrt{SC_2 R_2}}{\sqrt{SC_1 R_1}} = \frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} \quad \text{และ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}$$

$$T_{(p)} = \frac{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{\sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 + \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) - \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) K} \quad (4.4)$$

4.3.1 คำนวณหา Sensitivity ของ R_1

$$S_{R_1}^{T_{(p)}} = R_1 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

จาก $N(p) = k \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 - k \sinh p_2 \sinh p_3$

$$\begin{aligned} N'(p) &= \frac{d}{2R_1} k \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 - \frac{d}{2R_1} k \sinh p_2 \sinh p_3 \\ &= \frac{1}{2} \frac{SC_1}{p_1} k \sinh p_2 \sinh p_3 \sinh p_1 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{(p)} = \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 +$$

$$\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) - k \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1)$$

แยกพิจารณาทีละเทอม

$$\frac{d}{2R_1} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 = \frac{1}{2} \frac{SC_1}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3$$

$$\frac{d}{2R_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 = \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dR_1} \sinh p_1 + \right.$$

$$\left. \sinh p_1 \frac{d}{dR_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\}$$

$$= \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{SC_1}{p_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{C_2}{R_2 C_1} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \sinh p_1 \right\}$$

$$\frac{d}{dR_1} \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 = \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left\{ \frac{1}{2} \frac{SC_1}{p_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh p_1 + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} \left(\frac{C_3}{R_3 C_1} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \sinh p_1 \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dR_1} k \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 = k \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) \left\{ \frac{1}{2} \frac{SC_1}{p_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_1 + \frac{1}{2} \frac{C_2}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \sinh p_1 \right\}$$

เมื่อ $p_1 = p_2 = p_3 = p$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_1, \quad C_1 = C_2 = C_3 = C_1 \quad \text{และ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{C_3}{C_1} = \alpha$$

$$\frac{R_1 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{kp_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3}{k \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} \frac{p \sinh p}{(\cosh p - 1)}$$

$$R_1 D'(p) = \frac{1}{2} \left\{ p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3 + \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left(p_1 \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \cosh p_1 + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \right) + \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) (p_1 \cosh p_1 + \sinh p_1) - K \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) (p_1 \cosh p_1 + \sinh p_1) \right\}$$

จากคุณสมบัติของ Hyperbolic function

$$\sinh^2 p = \cosh^2 p - 1$$

$$\begin{aligned} \frac{R_1 D'(p)}{D(p)} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh^3 p \cosh p + (p \cosh p + \sinh p) [\sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - 1)] - K \sinh^2 p (\cosh p - 1)}{2 \sinh^2 p \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p (\cosh^2 p - 1) - K \sinh^2 p (\cosh p - 1)} \right. \\ &\quad \left. \frac{K \sinh p (\cosh p - 1)}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh^2 p \cosh p + (p \cosh p + \sinh p) [\cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K (\cosh p - 1)]}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{R_1}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{psinh p}{\cosh p - 1} - \frac{p \sinh^2 p \cosh p + (p \cosh p + \sinh p) [\cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K(\cosh p - 1)]}{\sinh p (2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K \cosh p + K)} \right\} \quad (4.5)$$

4.3.2 คำนวณหา Sensitivity ของ C_1

$$S_{C_1}^{T(p)} = C_1 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_1} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{KSR_1}{1p_1} \sinh p_2 \sinh p_3 \sinh p_1$$

$$\frac{C_1 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{Kp_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{p \sinh p}{2(\cosh p - 1)}$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกพิจารณาทีละเทอม

$$\frac{d}{dC_1} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 = \frac{1}{2} \frac{SR_1}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 &= \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dC_1} \sinh p_1 + \right. \\ &\quad \left. \sinh p_1 \frac{d}{dC_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \\ &= \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left\{ \frac{SR_1}{2R_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_1 - \frac{1}{2C_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dC_1} \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 = \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left\{ \frac{1}{2} \frac{SR_1}{p_1} \cosh p_1 - \frac{1}{2C_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \right\}$$

$$\frac{d}{dC_1} = K \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 = K \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) \left\{ \frac{1}{2} \frac{SR_1}{p_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \right\}$$

$$\begin{aligned} C_1 D'_{(p)} &= \frac{1}{2} \left\{ p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3 + \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 \left(\frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} p_1 \cosh p_1 - \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \right) + \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) (p_1 \cosh p_1 - \sinh p_1) - K \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) (p_1 \cosh p_1 - \sinh p_1) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ p \sinh^3 p \cosh p + \sinh p \cosh^2 p (p \cosh p - \sinh p) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - 1) (p \cosh p - \sinh p) - K \sinh p (\cosh p - 1) (p \cosh p - \sinh p) \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{C_1 D'_{(p)}}{D_{(p)}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh^2 p \cosh p + (p \cosh p - \sinh p) [\cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K (\cosh p - 1)]}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\}$$

$$S_{C_1}^{T_{(p)}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh p}{\cosh p} - \frac{p \sinh^2 p \cosh p + (p \cosh p - \sinh p) [\cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K (\cosh p - 1)]}{\sinh p (2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K \cosh p + K)} \right\} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 คำนวณหา Sensitivity ของ R_2

$$S_{R_2}^{T(p)} = R_2 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dR_2} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{K}{2} \frac{SC_2}{p_2} \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)$$

โพลีโนเมียลของส่วนแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dR_2} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 = \frac{1}{2} \frac{SC_2}{p_2} \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_2 \cosh p_3$$

$$\frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 = \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dR_1} \cosh p_2 + \cosh p_2 \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\}$$

$$= \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{SC_2}{p_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_2 - \frac{1}{2R_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_2 \right\}$$

$$\frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 (\cosh^2 p_3 - 1) \frac{d}{dR_2} \sinh p_2$$

$$= \frac{1}{2} \frac{SC_2}{p_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_2} K \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) &= K \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dR_2} \cosh p_2 + \right. \\ &\quad \left. \cosh p_2 \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} - \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \\ &= K \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{SC_2}{p_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_2 - \frac{1}{2R_2} \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_2 + \frac{1}{2R_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{R_2 N'(\rho)}{N(\rho)} = \frac{1}{2} \frac{K p_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{p_2 \cosh p_2}{2 \sinh p_2}$$

$$\begin{aligned} R_2 D'(\rho) &= \frac{1}{2} \left\{ p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_2 \cosh p_3 + \frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 (p_2 \sinh p_2 - \right. \\ &\quad \left. \cosh p_2) + p_2 \frac{R_1 p_3}{R_3 p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) - K \frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 \right. \\ &\quad \left. (p_2 \sinh p_2 - \cosh p_2) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ p \sinh p \cosh^3 p + \sinh^2 p \cosh p (p \sinh p - \cosh p) + p \alpha \sinh p \cosh p (\cosh^2 p - 1) \right. \\ &\quad \left. - K \sinh^2 p (p \sinh p - \cosh p) - K \sinh^2 p \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{R_2 D'(\rho)}{D(\rho)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \cosh^3 p + \sinh p (p \sinh p - \cosh p) (\cosh p - K) + p \alpha \sinh p \cosh p (\cosh^2 p - 1) - K \sinh p}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} - \frac{K \sinh p}{K \sinh p} \right\}$$

$$S_{R_2}^{T(\rho)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh^3 p + \sinh p [(p \sinh p - \cosh p) (\cosh p - K) + p \alpha \sinh p \cosh p - K]}{\sinh p (2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - \cosh p + 1)} \right\} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 คำนวณหา Sensitivity ของ C_2

$$S_{C_2}^{T(p)} = C_2 \left\{ \frac{N'(p)}{D(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_2} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{KSR_2}{2} \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)$$

โพลีโนเมียลของส่วนแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dC_2} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 = \frac{1}{2} \frac{SR_2}{p_2} \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_2 \cosh p_3$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 &= \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dC_2} \cosh p_2 + \right. \\ &\quad \left. \cosh p_2 \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \\ &= \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{SR_2}{p_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \cosh p_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \frac{1}{2} \frac{SR_2}{p_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1)$$

$$\frac{d}{dC_2} K \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) = K \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dC_2} \cosh p_2 + \cosh p_2 \right.$$

$$\left. \frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} - \frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= K \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \frac{1}{2} \frac{SR_2}{p_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh p_2 + \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_2}} \cosh p_2 - \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{R_2 C_1}} \right\}$$

$$\frac{C_2 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{p \cosh p_2}{2 \sinh p_2} = \frac{1}{2} p \coth p$$

$$\begin{aligned} C_2 D'(p) &= \frac{1}{2} \left\{ p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_2 \cosh p_3 + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_3 (p_2 \sinh p_2 + \cosh p_2) \right. \\ &\quad \left. + p_2 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) - K \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 (p_2 \sinh p_2 + \cosh p_2 - 1) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ p \sinh p \cosh^3 p + \sinh^2 p \cosh p (p \sinh p + \cosh p) + \alpha p \sinh p \cosh p (\cosh^2 p - 1) - K \sinh^2 p (p \sinh p + \cosh p) + K \sinh^2 p \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{C_2 D'(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \cosh^3 p + \sinh p (p \sinh p + \cosh p) (\cosh p - K) + p \alpha \sinh p \cosh p (\cosh^2 p - 1) + K \sinh p}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\}$$

$$S_{C_2}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh^3 p + \sinh p [(p \sinh p + \cosh p) (\cosh p - K) + p \alpha \sinh p \cosh p - K]}{\sinh p (2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - \cosh p + 1)} \right\} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 คำนวณหา Sensitivity ของ R_3

$$S_{R_3}^{J(p)} = R_3 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dR_3} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_3} KSC_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_3} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 &= \sinh p_2 \cosh p_1 \left\{ \sinh p_3 \frac{d}{dR_3} \cosh p_3 + \cosh p_3 \right. \\ &\quad \left. \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 \right\} \\ &= \sinh p_2 \cosh p_1 \left\{ \frac{1}{2p_3} SC_3 \sinh p_3 \sinh p_3 + \frac{1}{2p_3} SC_3 \right. \\ &\quad \left. \cosh p_3 \cosh p_3 \right\} \end{aligned}$$

จากเอกลักษณ์ของ hyperbolic function

$$\sinh^2 p_3 + \cosh^2 p_3 = \cosh 2p_3 = \frac{1}{2p_3} SC_3 \sinh p_2 \cosh p_1 \cosh 2p_3$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 &= \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 \left\{ \sinh p_3 \frac{d}{dR_3} \cosh p_3 + \right. \\ &\quad \left. \cosh p_3 \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 \right\} \\ &= \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} SC_3 \sinh p_3 \sinh p_3 + \frac{1}{2p_3} SC_3 \cosh p_3 \cosh p_3 \right\} \\ &= \frac{1}{2p_3} SC_3 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 \cosh 2p_3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) &= \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \frac{d}{dR_3} \cosh^2 p_3 + \cosh^2 p_3 \right. \\ &\quad \left. \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} - \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \right\} \\ &= \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} SC_3 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} 2 \cosh p_3 \sinh p_3 - \frac{1}{2R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh^2 p_3 + \frac{1}{2R_3} \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} K \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) = \frac{KSC_3}{2p_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_3 (\cosh p_2 - 1)$$

$$R_3 D'_{(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p_3 \sinh p_2 \cosh p_1 \cosh 2p_3 + p_3 \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 \cosh 2p_3 + \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \right.$$

$$\left. \sinh p_2 (p \sinh 2p - \cosh^2 p_3 + 1) - Kp_3 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \cosh p_3 (\cosh p_2 - 1) \right\}$$

$$\frac{R_3 N'_{(p)}}{N_{(p)}} = \frac{1}{2} \frac{Kp_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} \frac{p \cosh p_3}{\sinh p_3} = \frac{1}{2} p \coth p$$

$$\frac{R_3 D'_{(p)}}{D_{(p)}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2p \cosh p \cosh 2p + \alpha \sinh p [p \sinh 2p - (\cosh^2 p - 1)] - Kp \cosh p (\cosh p - 1)}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\}$$

$$S_{R_3}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh p [2 \cosh 2p - K(\cosh p - 1)] + \alpha \sinh p (p \sinh 2p - \sinh^2 p)}{\sinh p [2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - K(\cosh p - 1)]} \right\} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 คำนวณหา Sensitivity ของ C_3

$$S_{C_3}^{T(p)} = C_3 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_3} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_3} KSR_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)$$

$$\frac{C_3 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{p_3 K \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} p \coth p$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_3} \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_1 \cosh p_3 &= \sinh p_2 \cosh p_1 \left\{ \frac{1}{2p_3} SR_3 \sinh p_3 \sinh p_3 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2p_3} SR_3 \cosh p_3 \cosh p_3 \right\} \\ &= \frac{1}{2p_3} SR_3 \sinh p_2 \cosh p_1 \cosh 2p_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 \cosh p_2 \cosh p_3 &= \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} SR_3 \sinh p_3 \sinh p_3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2p_3} SR_3 \cosh p_3 \cosh p_3 \right\} \\ &= \frac{1}{2p_3} SR_3 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 \cosh 2p_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) &= \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} SR_3 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} 2 \cosh p_3 \sinh p_3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_3 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \cosh^2 p_3 - \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_3 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

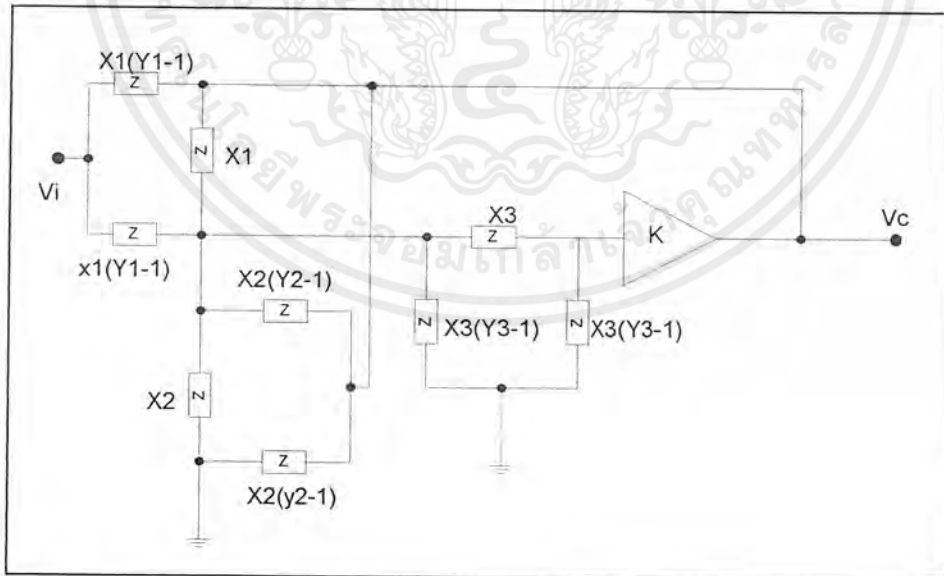
$$\frac{d}{dC_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} K \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 - 1) = \frac{K S R_3}{2 p_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_3 (\cosh p_2 - 1)$$

$$C_3 D'(p) = \frac{1}{2} \left\{ p_3 \sinh p_2 \cosh p_1 \cosh 2p_3 + p_3 \frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 \cosh 2p_3 + \frac{R_1 p_3}{R_3 p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 (p_3 \sinh 2p_3 + \cosh^2 p_3 - 1) - K p_3 \frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} \sinh p_1 \cosh p_3 (\cosh p_2 - 1) \right\}$$

$$\frac{C_3 D'(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2p \cosh p \cosh 2p + \alpha \sinh p (p \sinh 2p + \sinh^2 p) - K p \cosh p (\cosh p - 1)}{2 \sinh p \cosh^2 p + \alpha \sinh^3 p - K \sinh p (\cosh p - 1)} \right\}$$

$$S_{C_3}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh p [2 \cosh 2p - K (\cosh p - 1)] + \alpha \sinh p (p \sinh 2p + \sinh^2 p)}{\sinh p (2 \cosh^2 p + \alpha \sinh^2 p - \cosh p + 1)} \right\} \quad (4.10)$$

4.4 การคำนวณหา Transfer function ของวงจร Band Pass filter



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 สามารถเขียน Matrix ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & x_1(1 - y_1) & 0 & x_1(1 - y_1) \\ \alpha_1(1 - y_1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & -x_3 & x_2(1 - y_2) + x_1 \\ 0 & -x_3 & x_3y_3 & 0 \\ x_1(1 - y_1) & x_2(1 - y_2) - x_1 & 0 & x_1y_1 + 2x_2(y_2 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

เขียน Matrix ใหม่โดยนำค่า K มาพิจารณาด้วย

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & x_1(1 - y_1) & x_1(1 - y_1) \\ x_1(1 - y_1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & x_2(1 - y_2) + x_1 - x_3/K \\ 0 & -x_3 & x_3y_3/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

คำนวณ Transfer function จาก

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{V_4}{V_1} = \frac{\Delta_4}{\Delta_1}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} I_1 & x_1(1 - y_1) & x_1(1 - y_1) \\ 0 & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & x_2(1 - y_2) + x_1 - x_3/K \\ 0 & -x_3 & x_3y_3/K \end{vmatrix}$$

$$= I_1 \left\{ \frac{(x_3y_3)}{K} (x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3) + x_3 \left(x_2(1 - y_2) + x_1 - \frac{x_3}{K} \right) \right\}$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 2x_1(y_1 - 1) & x_1(1 - y_1) & I_1 \\ x_1(1 - y_1) & x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 & 0 \\ 0 & -x_3 & 0 \end{vmatrix} = -x_3x_1(1 - y_1) = x_1x_3(y_1 - 1)$$

$$\frac{\Delta_4}{\Delta_1} = \frac{Kx_1(y_1 - 1)}{x_1y_1y_1 + x_2y_2y_2 + x_3y_3^2 + Kx_2 - Kx_2y_2 + Kx_1 - x_3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Kx_1(y_1 - 1)}{x_3y_3^2 + x_2y_2(y_3 - K) + K(x_2 + x_1) + x_1y_1y_3 - x_3} \quad (4.11)$$

Case 1

เมื่อ $x_1 = x_2 = x_3$ และ $y_1 = y_2 = y_3 = y$

$$R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3$$

จาก Transfer function ที่คำนวณได้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{K(y-1)}{3y^2 + (2-y)K - 1}$$

เมื่อ $y = \cosh p$ และ $p = \sqrt{SRC}$

$$T(p) = \frac{K(\cosh p - 1)}{3 \cosh^2 p + (2 - \cosh p)K - 1}$$

จากเอกลักษณ์ของ hyperbolic function

$$\cosh^2 p = \frac{1}{2}(\cosh 2p + 1)$$

$$T(p) = \frac{2K(\cosh p - 1)}{3 \cosh 2p + 2K(2 - \cosh p) + 1} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 2

เมื่อ $y_1 = y_2 = y_3 = y$
 $x_i = \frac{p_i}{R_i \sinh p_i}$, $\frac{R_1}{R_2} = \alpha$, $\frac{R_1}{R_3} = \beta$, $R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3$

จาก Transfer function

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Kx_1(y-1)}{(x_3+x_1+x_2)y^2 + (x_1+x_2-x_2y)K - x_3}$$

$$= \frac{K(y-1)}{\left(\frac{x_3}{x_1} + 1 + \frac{x_2}{x_1}\right)y^2 + \left(1 + \frac{x_2}{x_1} - \frac{x_2}{x_1}y\right)K - \frac{x_3}{x_1}}$$

เมื่อ $\frac{x_3}{x_1} = \frac{R_3 \sinh \sqrt{SR_3 C_3}}{R_1 \sinh \sqrt{SR_1 C_1}} = \frac{R_1}{R_3}$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$T(p) = \frac{K(\cosh p - 1)}{(1 + \alpha + \beta) \cosh^2 p + K[1 - \alpha(\cosh p - 1)] + (1 + \alpha - \beta)}$$

$$= \frac{2K(\cosh p - 1)}{(1 + \alpha + \beta) \cosh 2p + 2K[1 - \alpha(\cosh p - 1)] + (1 + \alpha - \beta)} \tag{4.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 คำนวณหา Sensitivity of K ของวงจร Band pass filter

Case 1

$$S_K^{T(p)} = K \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dK} 2K(\cosh p - 1) = 2(\cosh p - 1)$$

$$D'(p) = \frac{d}{dK} 3 \cosh 2p + 2K(2 - \cosh p + 1) = 2(2 - \cosh p)$$

$$\begin{aligned} S_K^{T(p)} &= 1 - \frac{2K(2 - \cosh p)}{3 \cosh 2p + 2K(2 - \cosh p) + 1} \\ &= \frac{3 \cosh 2p - 1}{3 \cosh 2p + 2K(2 - \cosh p) + 1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Case 2

$$N'(p) = \frac{d}{dK} 2K(\cosh p - 1) = 2(\cosh p - 1)$$

$$\begin{aligned} D'(p) &= \frac{d}{dK} (1 + \alpha + \beta) \cosh 2p + 2K[1 - \alpha(\cosh p - 1)] + (1 + \alpha - \beta) \\ &= 2\{1 - \alpha(\cosh p - 1)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_K^{T(p)} &= 1 - \frac{2K\{1 - \alpha(\cosh p - 1)\}}{(1 + \alpha + \beta) \cosh 2p + 2K\{1 - \alpha(\cosh p - 1)\} + (1 + \alpha - \beta)} \\ &= \frac{(1 + \alpha + \beta) \cosh 2p + (1 + \alpha - \beta)}{(1 + \alpha + \beta) \cosh 2p + 2K\{1 - \alpha(\cosh p - 1)\} + (1 + \alpha - \beta)} \end{aligned} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 คำนวณหา Sensitivity ของวงจร Band pass filter

จาก Transfer function

$$\frac{V_O}{V_i} = \frac{Kx_1(y_1 - 1)}{x_3y_3^2 + x_2y_2y_3 - Kx_2y_3 + (x_1 + x_2)K + x_1y_1y_3 - x_3}$$

$$= \frac{Kx_1(y_1 - 1)}{x_3(y_3^2 - 1) + x_2(y_2y_3 - Ky_2 + K) + x_1(y_1y_2 + K)}$$

$$T(p) = \frac{K \frac{p_1}{R_1 \sinh p_1} (\cosh p_1 - 1)}{\frac{p_3}{R_3 \sinh p_3} (\cosh^2 p_3 - 1) + \frac{p_2}{R_2 \sinh p_2} (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) + \frac{p_1}{R_1 \sinh p_1} (\cosh p_1 \cosh p_3 + K)}$$

จัดรูปสมการใหม่

$$T(p) = \frac{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{\frac{R_1 p_3}{R_3 p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) + \frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - \cosh p_2 K + K) + \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K)}$$

เมื่อ $\frac{R_1 p_3}{R_3 p_1} = \frac{R_1 \sqrt{SR_3 C_3}}{R_3 \sqrt{SR_1 C_1}} = \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}$ และ $\frac{R_1 p_2}{R_2 p_1} = \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}$

$$T(p) = \frac{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - \cosh p_2 K + K) + \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K)} \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 จาก Transfer function ที่ได้นำมาคำนวณหา Sensitivity ของ R_1

$$S_{R_1}^{T(p)} = R_1 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dR_1} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_1} K S C_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3$$

$$\frac{R_1 N'(p)}{N(p)} = \frac{K p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3}{2K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} \frac{p \sinh p}{(\cosh p - 1)}$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกพิจารณาทีละเทอม

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) &= \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \frac{d}{dR_1} \sinh p_1 + \right. \\ &\quad \left. \sinh p_1 \frac{d}{dR_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \right\} \\ &= \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left\{ \frac{1}{2p_1} S C_1 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh p_1 + \frac{1}{2} \frac{C_3}{R_3 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \sinh p_1 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \\ = \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dR_1} \sinh p_1 + \sinh p_2 \right. \\ \left. \frac{d}{dR_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{SC_1}{2p_1} \cosh p_1 + \frac{1}{2} \frac{C_2}{R_2 C_1} \right. \\ \left. \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \sinh p_1 \right\}$$

$$\frac{d}{dR_1} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \frac{1}{2p_1} SC_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3$$

$$R_1 D'_{(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left(p_1 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \cosh p_1 + \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \right) + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_3 \right. \\ \left. (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_3 + K) (p_1 \cosh p_1 + \sinh p_1) + p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \right. \\ \left. \sinh p_3 \cosh p_3 \right\}$$

เมื่อ

$$p_1 = p_2 = p_3 = p, \quad \frac{R_1}{R_2} = \alpha \quad \text{และ} \quad \frac{R_1}{R_3} = \beta$$

$$\frac{R_1 D'_{(p)}}{D_{(p)}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sinh p (\cosh^2 p - 1) (\beta p \cosh p + \beta \sinh p) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K)}{\beta \sinh^2 p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh^2 p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh^2 p (\cosh^2 p + K)} \right. \\ \left. \frac{(p \cosh p + \sinh p) + p \sinh^3 p \cosh p}{\beta \sinh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh p (\cosh^2 p + K)} \right\}$$

$$S_{R_1}^{J(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh p}{\cosh p - 1} - \frac{(p \cosh p + \sinh p) [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p - K \cosh p + K)]}{\sinh p [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K]} \right. \\ \left. + p \sinh^2 p \cosh p \right\} \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 คำนวณหา Sensitivity ของ C_1

$$S_{C_1}^{T(p)} = C_1 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_1} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{K}{2p_1} SR_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3$$

$$\frac{C_1 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} \frac{p \sinh p}{(\cosh p - 1)}$$

พิจารณาโพลิโนเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dC_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left\{ \frac{1}{2p_1} SR_1 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh p_1 - \frac{1}{2C_1} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dC_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \\ = \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \left\{ \frac{SR_1}{2p_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_1 - \frac{1}{2C_1} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dC_1} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \frac{1}{2p_1} SR_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \sinh p_3 \cosh p_3$$

$$\begin{aligned} C_1 D'(p) = \frac{1}{2} \left\{ \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) \left(p_1 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \cosh p_1 - \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \right) + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_3 \right. \\ \left. (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) (p_1 \cosh p_1 - \sinh p_1) + p_1 \sinh p_1 \sinh p_2 \right. \\ \left. \sinh p_3 \cosh p_3 \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_1 D'(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(p \cosh p - \sinh p) [\beta (\cosh^2 p - 1) + \alpha (\cosh^2 p - K \cosh p + K)] + p \sinh^2 p \cosh p}{\beta \sinh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh p (\cosh^2 p + K)} \right\}$$

$$S_{C_1}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p \sinh p}{\cosh p - 1} - \frac{(p \cosh p - \sinh p) [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K)] + p \sinh^2 p \cosh p}{\sinh p [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K]} \right\} \quad (4.18)$$

4.6.3 คำนวณหา Sensitivity ของ R_2

$$S_{R_2}^{T(p)} = R_2 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dR_2} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_2} K S C_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)$$

$$\frac{R_2 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{p \cosh p}{2 \sinh p} = \frac{1}{2} p \coth p$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \frac{1}{2p_2} S C_2 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1)$$

$$\frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K)$$

$$= \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_3 \frac{d}{dR_2} \cosh p_2 + \cosh p_2 \cosh p_3 \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right.$$

$$\left. - K \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \frac{d}{dR_2} \cosh p_2 - K \cosh p_2 \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} + K \frac{d}{dR_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \frac{1}{2p_2} SC_2 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_3 \sinh p_2 - \frac{1}{2R_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_2 \cosh p_3 \right. \\ \left. - \frac{K}{2p_2} SC_2 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_2 + \frac{1}{2R_2} K \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_2 - \frac{K}{2R_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right\} \\ \frac{d}{dR_2} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \frac{1}{2p_2} SC_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K)$$

$$R_2 D'(p) = \frac{1}{2} \left\{ p_2 \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) + \frac{R_1}{R_2} \frac{C_2}{C_1} \sinh p_1 \sinh p_3 (p_2 \cosh p_3 \right. \\ \left. \sinh p_2 - \cosh p_2 \cosh p_3 - K p_2 \sinh p_2 + K \cosh p_2 - K) + p_2 \sinh p_3 \cosh p_2 \right. \\ \left. (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) \right\}$$

$$\frac{R_2 D'(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p\beta \cosh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (p \cosh p \sinh p - \cosh^2 p - K p \sinh p + \right. \\ \left. \beta \sinh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh p (\cosh^2 p + K) \right. \\ \left. K \cosh p - K) + p \sinh p \cosh p (\cosh^2 p + K) \right\}$$

$$S_{R_2}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh p [\sinh p (\alpha + \beta) + (\cosh^2 p + K)] - \alpha (\cosh^2 p + K p \sinh p - \right. \\ \left. \beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K \right. \\ \left. K \cosh p + K) \right\} \quad (4.19)$$

4.6.4 คำนวณหา Sensitivity ของ C_2

$$S_{C_2}^{T(p)} = C_2 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_2} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_2} SR_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 - 1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_2 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_2 \sinh p_3 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} p \coth p$$

พิจารณาพหุนามเมียบลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \frac{1}{2 p_2} S R_2 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dC_2} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \\ &= \sinh p_1 \sinh p_3 \left\{ \frac{1}{2 p_2} S R_2 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \cosh p_3 \sinh p_2 + \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \right. \\ & \quad \left. \cosh p_2 \cosh p_3 - \frac{K}{2 p_2} S R_2 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_2 - \frac{K}{2} \frac{R_1}{R_2 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \cosh p_2 \right. \\ & \quad \left. + \frac{K}{2} \frac{R_1}{R_2 C_2} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dC_2} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \frac{1}{2} S R_2 \sinh p_3 \cosh p_2 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K)$$

$$\begin{aligned} C_2 D(p) &= \frac{1}{2} \left\{ p_2 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \cosh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) + \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_3 (p_2 \cosh p_3 \right. \\ & \quad \left. \cosh p_2 + \cosh p_2 \cosh p_3 - K p_2 \sinh p_2 - K \cosh p_2 + K) + p_2 \sinh p_3 \cosh p_2 \right. \\ & \quad \left. (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_2 D'(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{p\beta \cosh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (p \cosh p \sinh p + \cosh^2 p - Kp \sinh p - K \cosh p}{\beta \sinh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh p (\cosh^2 p + K)} \right.$$

$$\left. \frac{+ K) + p \sinh p \cosh p (\cosh^2 p + K)}{\right\}$$

$$S_{C_2}^{T(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{p \cosh p [\sinh p (\alpha + \beta) + (\cosh^2 p + K)] + \alpha (\cosh^2 p - Kp \sinh p - K \cosh p + K)}{\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K} \right\} \quad (4.20)$$

4.6.5 ค่าความหนา Sensitivity ของ R_3

$$N'(p) = \frac{d}{dR_3} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_3} K S C_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)$$

$$\frac{R_3 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} p \coth p$$

พิจารณาโพลีโนเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \frac{d}{dR_3} \cosh^2 p_3 + \cosh^2 p_3 \right.$$

$$\left. \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} - \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \right\}$$

$$= \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} 2 S C_3 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh p_3 \sinh p_3 - \frac{1}{2R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \cosh^2 p_3 + \frac{1}{2R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_3} \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K) \\ = \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \left\{ \sinh p_3 \cosh p_2 \frac{d}{dR_3} \cosh p_3 + \cosh p_2 \cosh p_3 \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 \right. \\ \left. - K \cosh p_2 \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 + K \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} = \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \left\{ \frac{1}{2p_3} SC_3 \sinh^2 p_3 \cosh p_2 + \frac{1}{2p_3} SC_3 \cosh p_2 \cosh^2 p_3 - \frac{1}{2p_3} KSC_3 \right. \\ \left. \cosh p_2 \cosh p_3 + \frac{1}{2p_3} KSC_3 \cosh p_3 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dR_3} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \sinh p_2 \left\{ \sinh p_3 \cosh p_1 \frac{d}{dR_3} \cosh p_3 + \cosh p_1 \right. \\ \left. \cosh p_3 \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 + K \frac{d}{dR_3} \sinh p_3 \right\} \\ = \frac{1}{2p_2} SC_3 \sinh p_3 \left\{ \sinh^2 p_3 \cosh p_1 + \cosh p_1 \cosh^2 p_3 + K \cosh p_3 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3 D'(\rho) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 (2p_3 \cosh p_3 \sinh p_3 - \cosh^2 p_3 + 1) + p_3 \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \right. \\ \left. \sinh p_1 (\sinh^2 p_3 \cosh p_1 + \cosh p_2 \cosh^2 p_3 - K \cosh p_2 \cosh p_3 + K \cosh p_3) \right. \\ \left. + p_3 \sinh p_3 (\sinh^2 p_3 \cosh p_1 + \cosh p_1 \cosh^2 p_3 + K \cosh p_3) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{R_3 D'(\rho)}{D(\rho)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\beta \sinh p [2p \cosh p \sinh p - (\cosh^2 p - 1)] + p \alpha \cosh p (\sinh^2 p + \cosh^2 p -} \right. \\ \left. \frac{\beta \sinh p (\cosh^2 p - 1) + \alpha \sinh p (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \sinh p}{K \cosh p + K} + p \cosh p (\sinh^2 p + \cosh^2 p + K) \right\} \\ \left. \frac{1}{(\cosh^2 p + K)} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติของ hyperbolic function

$$\cosh^2 p - \sinh^2 p = 1$$

$$\cosh^2 p + \sinh^2 p = \cosh 2p$$

$$2 \sinh p \cosh p = \sinh 2p$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} \frac{R_3 D'(p)}{D(p)} &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\beta \sinh p (p \sinh 2p - \sinh^2 p) + p \cosh p [(\alpha + 1)(\cosh 2p + K) - \alpha K \cosh p]}{\sinh p [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K]} \right\} \\ S_{R_3}^{T(p)} &= \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{\beta (p \sinh 2p - \sinh^2 p) + p \coth p [(\alpha + 1)(\cosh 2p + K) - \alpha K \cosh p]}{\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p - K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K} \right\} \quad (4.21) \end{aligned}$$

4.6.6 คำนวณหา Sensitivity ของ C_3

$$S_{C_3}^{T(p)} = C_3 \left\{ \frac{N'(p)}{N(p)} - \frac{D'(p)}{D(p)} \right\}$$

$$N'(p) = \frac{d}{dC_3} K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1) = \frac{1}{2p_3} K S R_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)$$

$$\frac{C_3 N'(p)}{N(p)} = \frac{1}{2} \frac{K p_3 \sinh p_2 \cosh p_3 (\cosh p_1 - 1)}{K \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 - 1)} = \frac{1}{2} p \coth p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโพลินอเมียลของส่วนโดยแยกคิดทีละเทอม

$$\frac{d}{dC_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_2 (\cosh^2 p_3 - 1) = \sinh p_1 \sinh p_2 \left\{ \frac{1}{2p_3} SR_3 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} 2 \cosh p_3 \sinh p_3 + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_3 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \cosh^2 p_3 - \frac{1}{2} \frac{R_1}{R_3 C_1} \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}}} \right\}$$

$$\frac{d}{dC_3} \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_3 C_1}} \sinh p_1 \sinh p_3 (\cosh p_2 \cosh p_3 - K \cosh p_2 + K)$$

$$= \frac{1}{2p_3} SR_3 \sqrt{\frac{R_1 C_3}{R_2 C_1}} \sinh p_1 \left\{ \sinh^2 p_3 \cosh p_2 + \cosh p_2 \cosh^2 p_3 - K \cosh p_2 \right.$$

$$\left. \cosh p_3 + K \cosh p_3 \right\}$$

$$\frac{d}{dC_3} \sinh p_2 \sinh p_3 (\cosh p_1 \cosh p_3 + K) = \frac{1}{2p_3} SR_3 \sinh p_3 \left\{ \sinh^2 p_3 \cosh p_1 + \cosh p_1 \right.$$

$$\left. \cosh^2 p_3 + K \cosh p_3 \right\}$$

$$C_3 D(p) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{R_1}{R_3} \frac{p_3}{p_1} \sinh p_1 \sinh p_2 (2p_3 \cosh p_3 \sinh p_3 + \cosh^2 p_3 - 1) + p_3 \frac{R_1}{R_2} \frac{p_2}{p_1} \sinh p_1 \right.$$

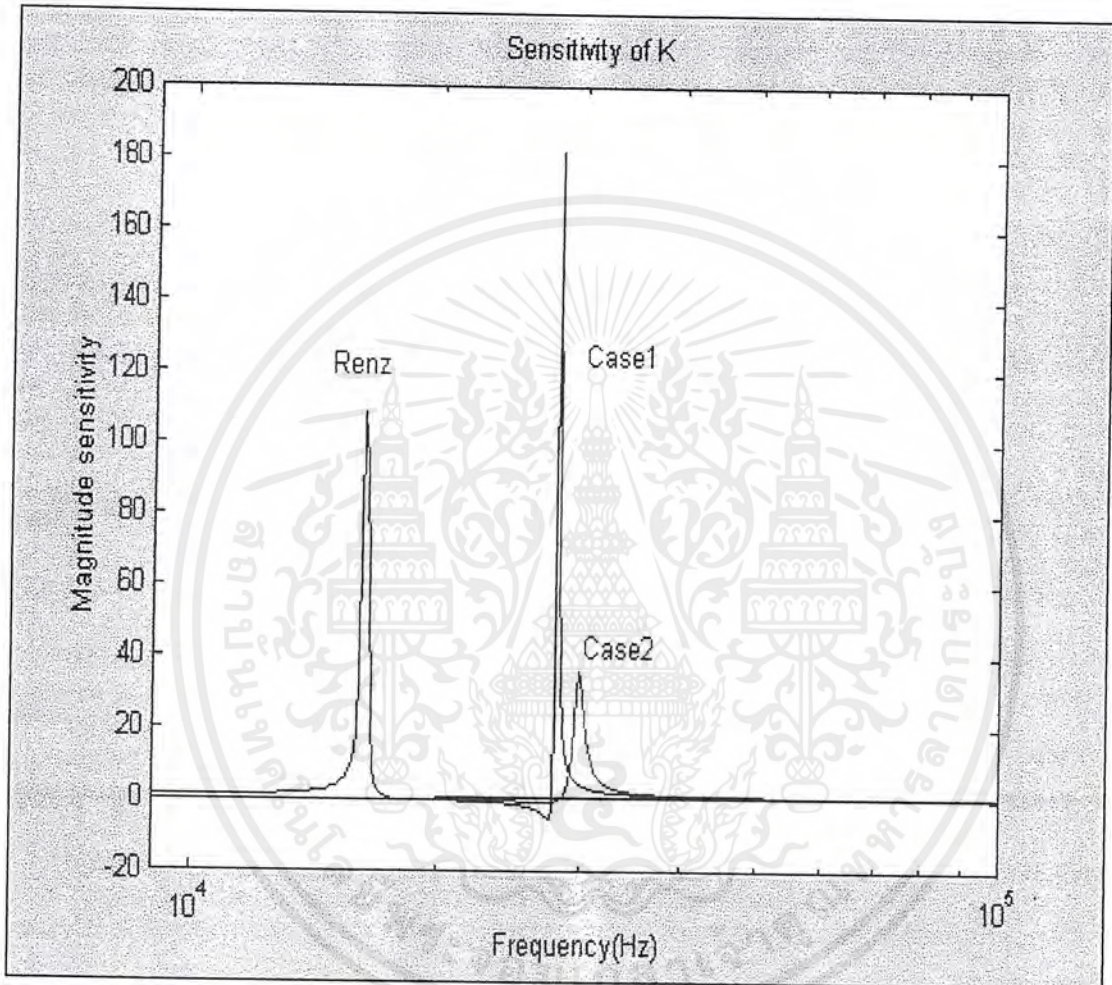
$$\left. (\sinh^2 p_3 \cosh p_2 + \cosh p_2 \cosh^2 p_3 - K \cosh p_2 \cosh p_3 + K \cosh p_3) + p_3 \sinh p_3 \right.$$

$$\left. (\sinh^2 p_3 \cosh p_1 + \cosh p_1 \cosh^2 p_3 + K \cosh p_3) \right\}$$

$$\frac{C_3 D(p)}{D(p)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\beta \sinh p (p \sinh 2p + \sinh^2 p) + p \cosh p [(\alpha + 1)(\cosh 2p + K) - \alpha K \cosh p]}{\sinh p [\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K]} \right\}$$

$$S_{C_3}^{I(p)} = \frac{1}{2} \left\{ p \coth p - \frac{\beta (p \sinh 2p - \sinh^2 p) + p \coth p [(\alpha + 1)(\cosh 2p + K) - \alpha K \cosh p]}{\beta \sinh^2 p + \alpha (\cosh^2 p + K \cosh p + K) + \cosh^2 p + K} \right\} \quad (4.22)$$

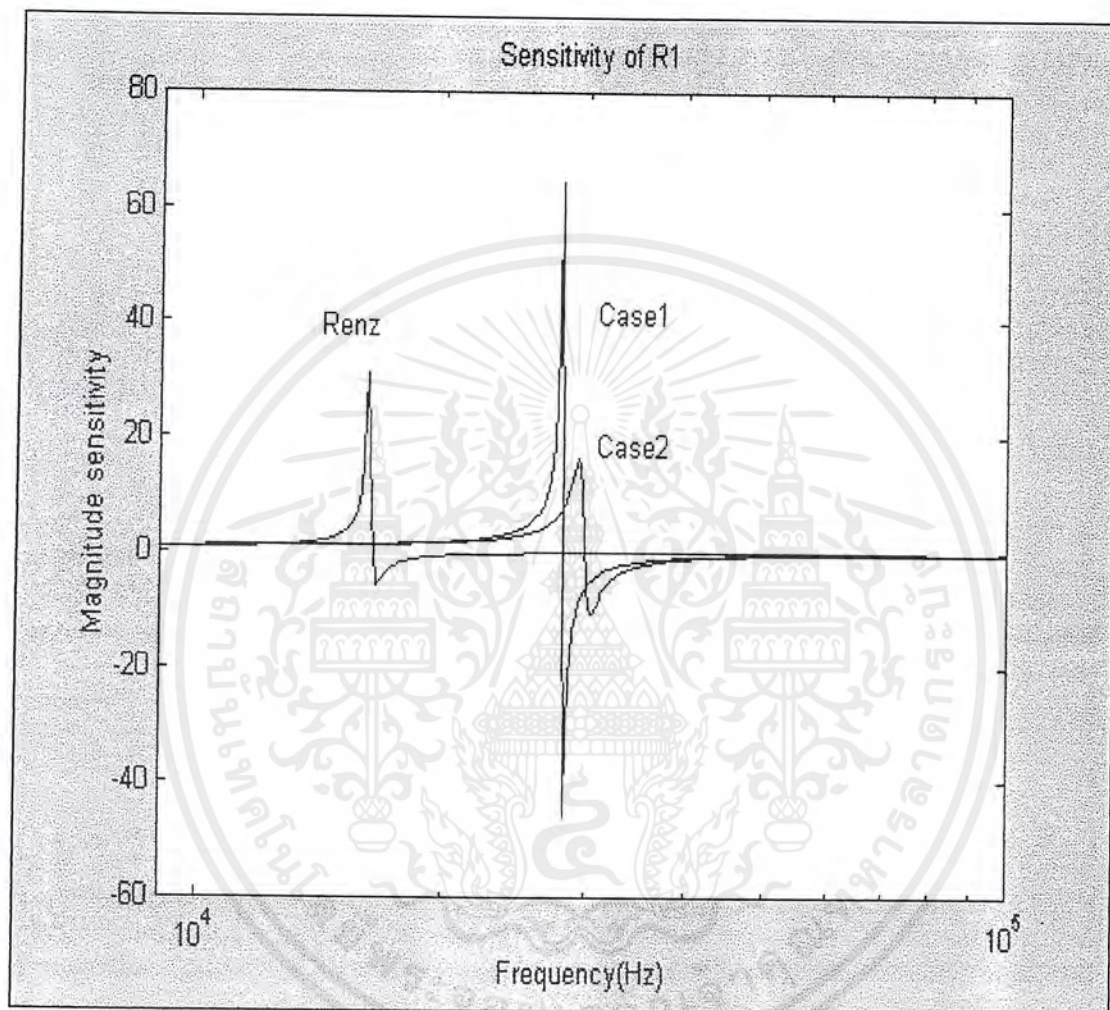
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Gain(k) ของทั้ง 3 วงจร

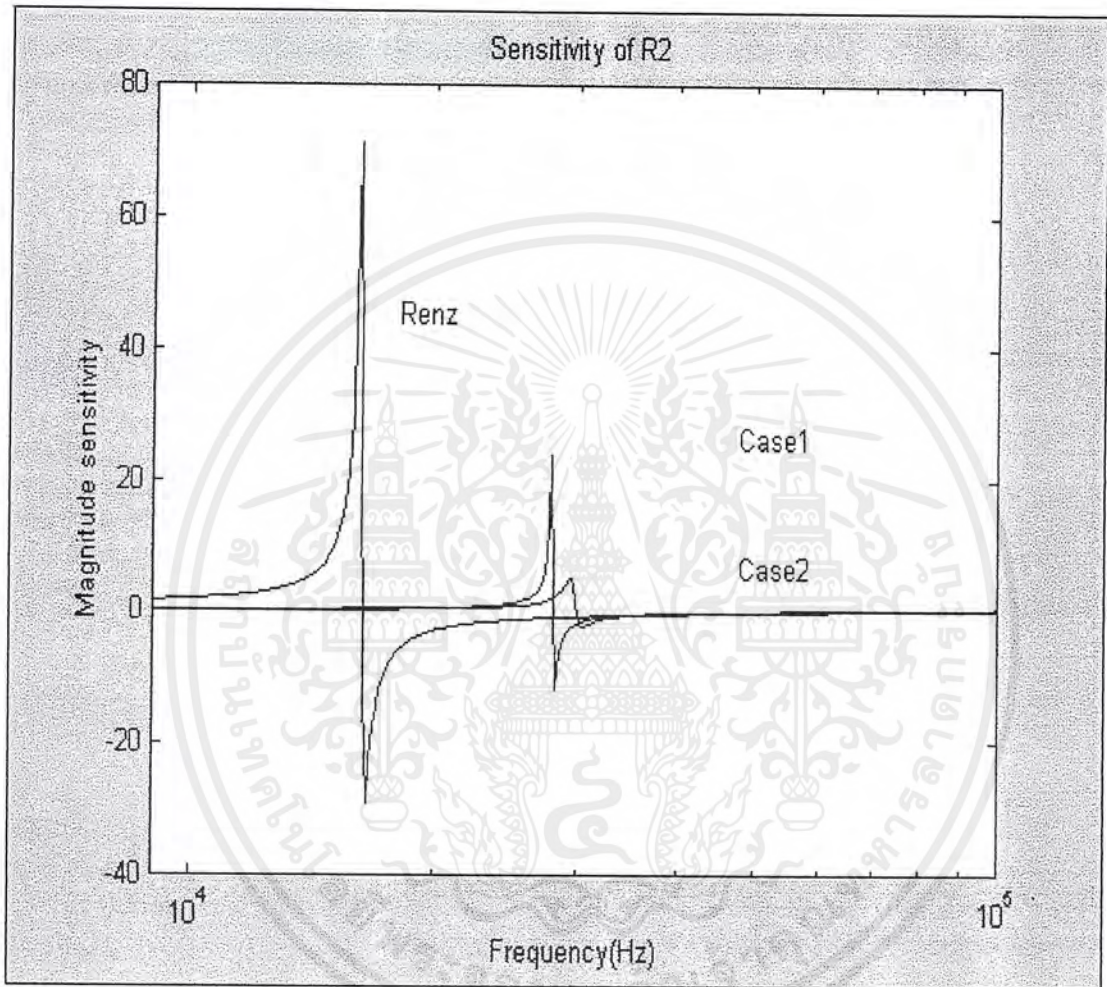
โดยที่ วงจรเร็นท์ (Renz BPF)	Gain(k) = 5.3 (max)
วงจรกรองความถี่ Case1 (BPF case1)	Gain(k) = 4 (Max)
วงจรกรองความถี่ Case2 (BPF case2)	Gain(k) = 3.9 (Max)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



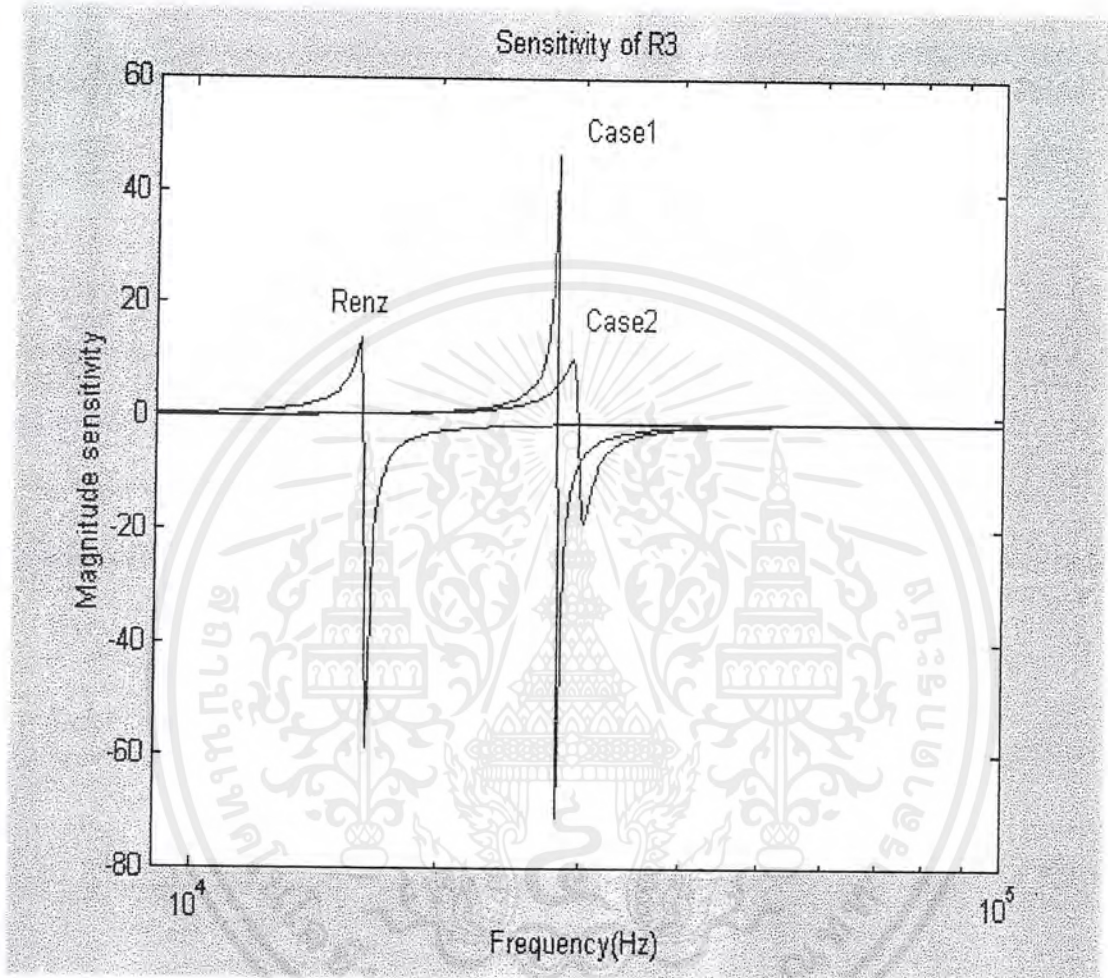
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R1 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



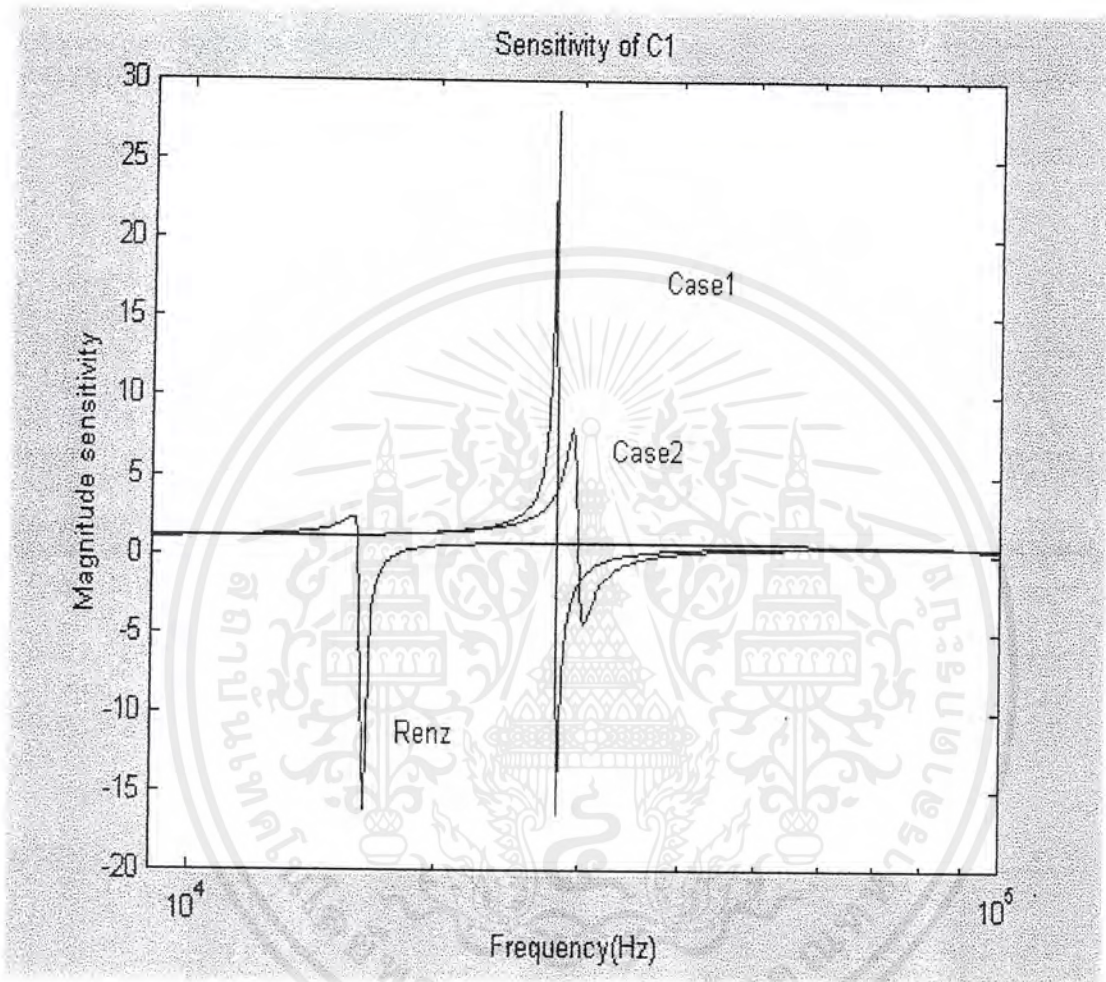
รูปที่ 4.5 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R2 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



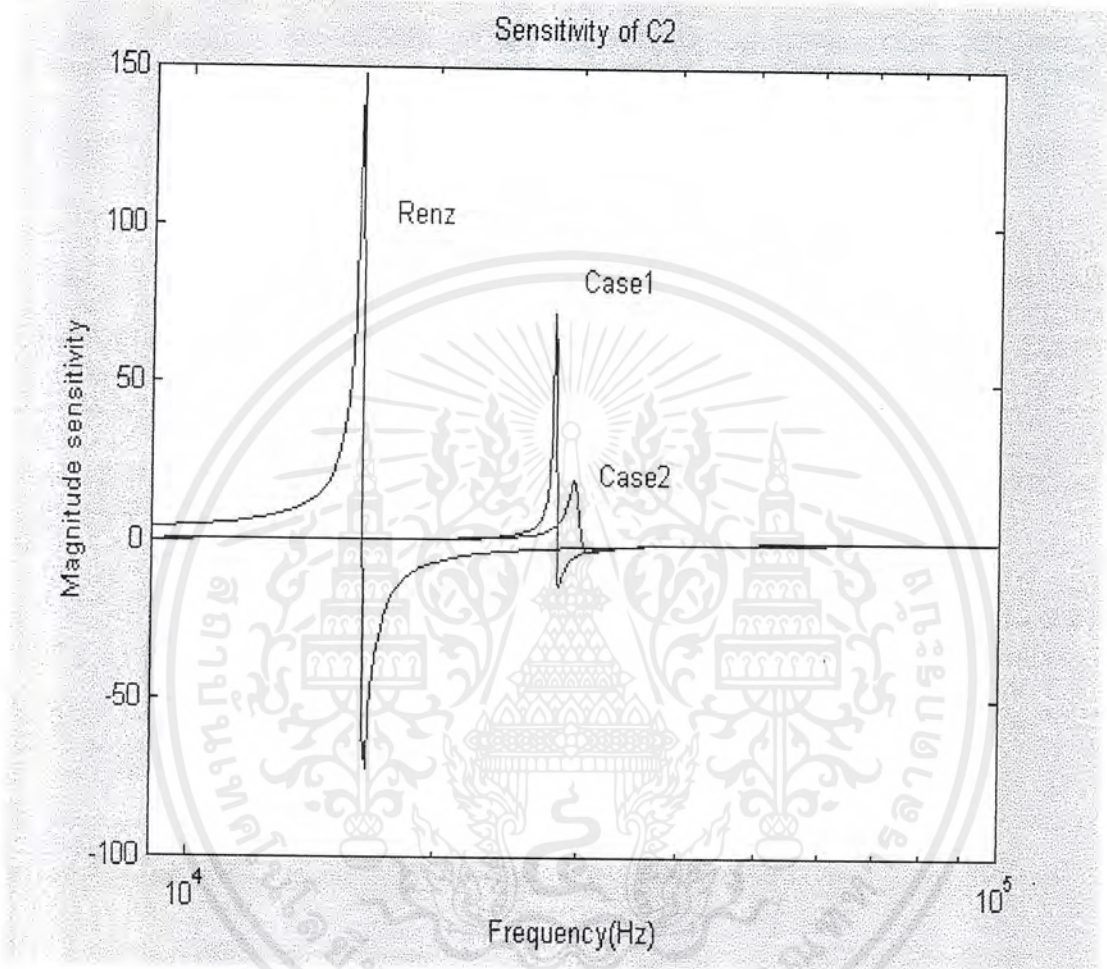
รูปที่ 4.6 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R3 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



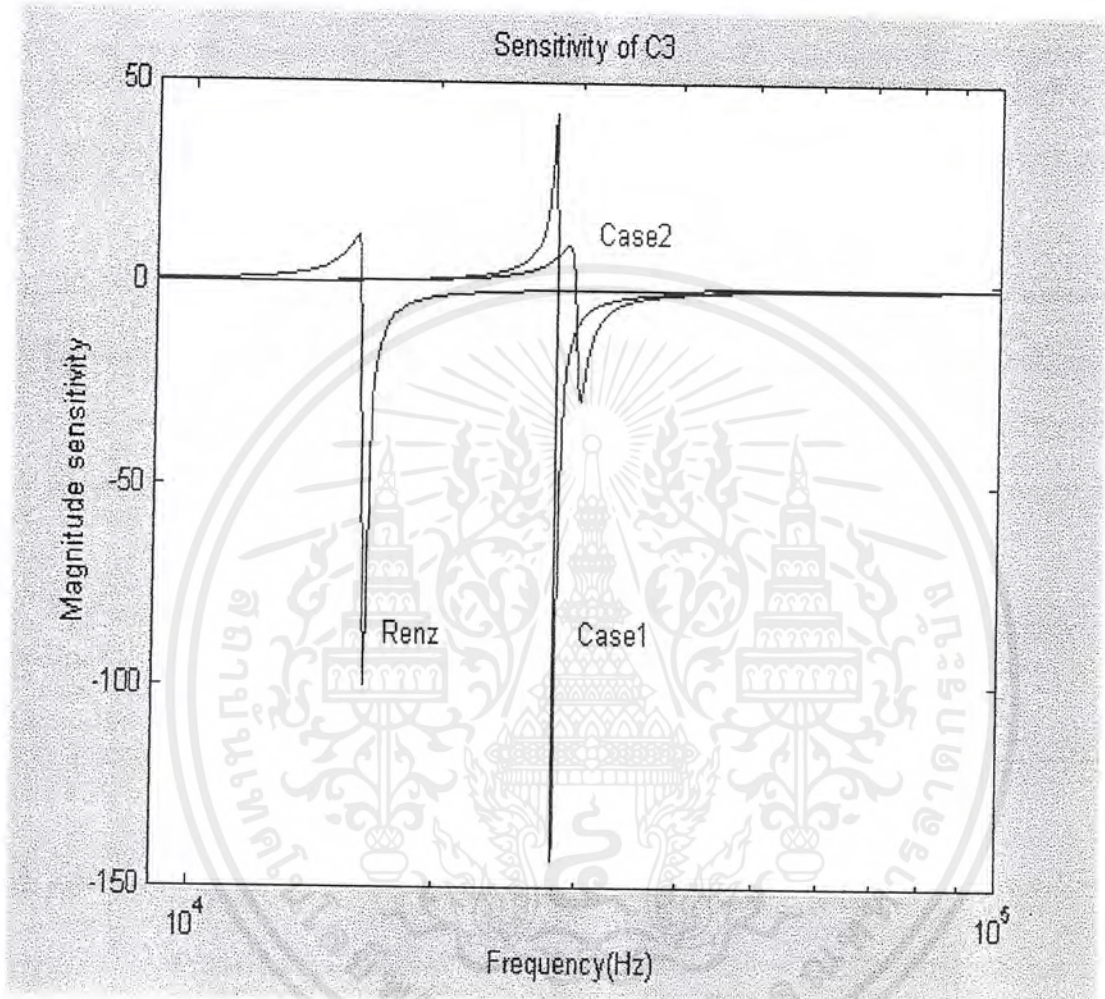
รูปที่ 4.7 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C1 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C2 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงค่า Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C3 ของทั้ง 3 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การคำนวณหา Sensitivity ของ Q เมื่อเทียบกับ K

$$S_k^Q = \frac{dQ/Q}{dK/K}$$

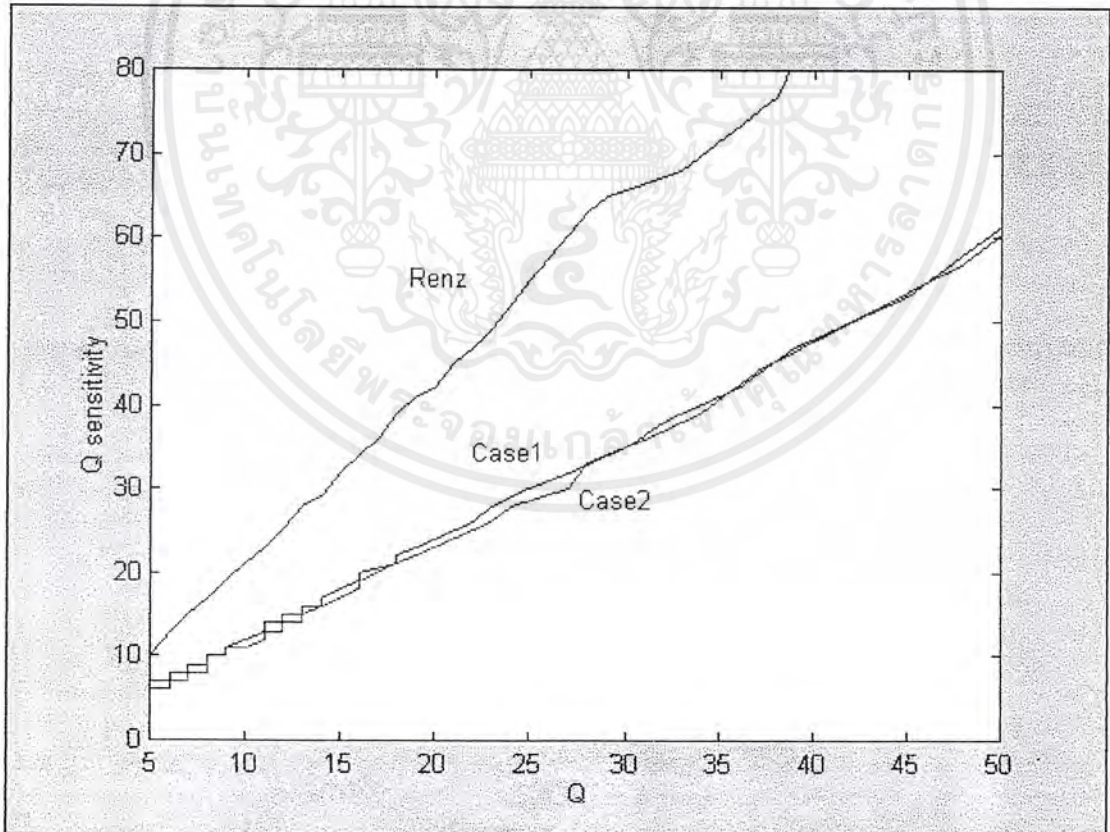
$$Q = \frac{f_o}{BW}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{|(f_o/BW_1) - (f_o/BW_2)|}{f_o/BW}$$

$$= BW |(1/BW_1) - (1/BW_2)|$$

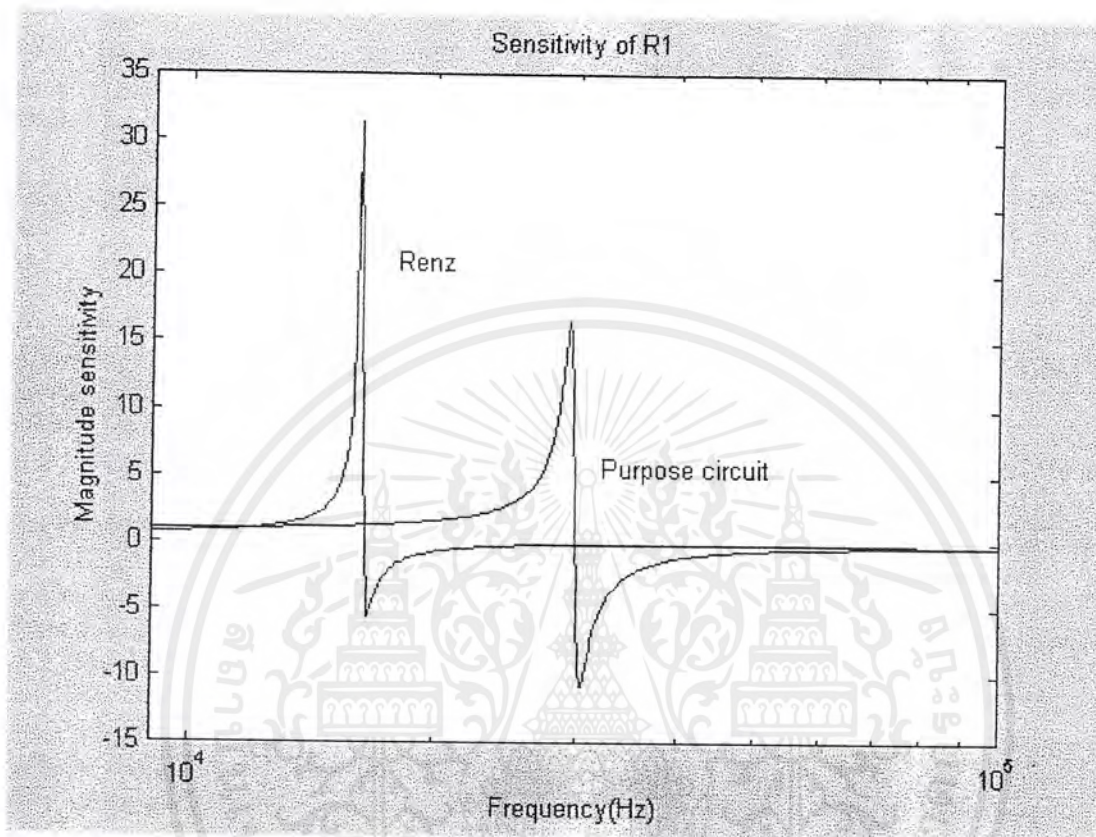
$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{|K_1 - K_2|}{K}$$

$$S_k^Q = \frac{K \times BW |(1/BW_1) - (1/BW_2)|}{|K_1 - K_2|} \tag{4.23}$$



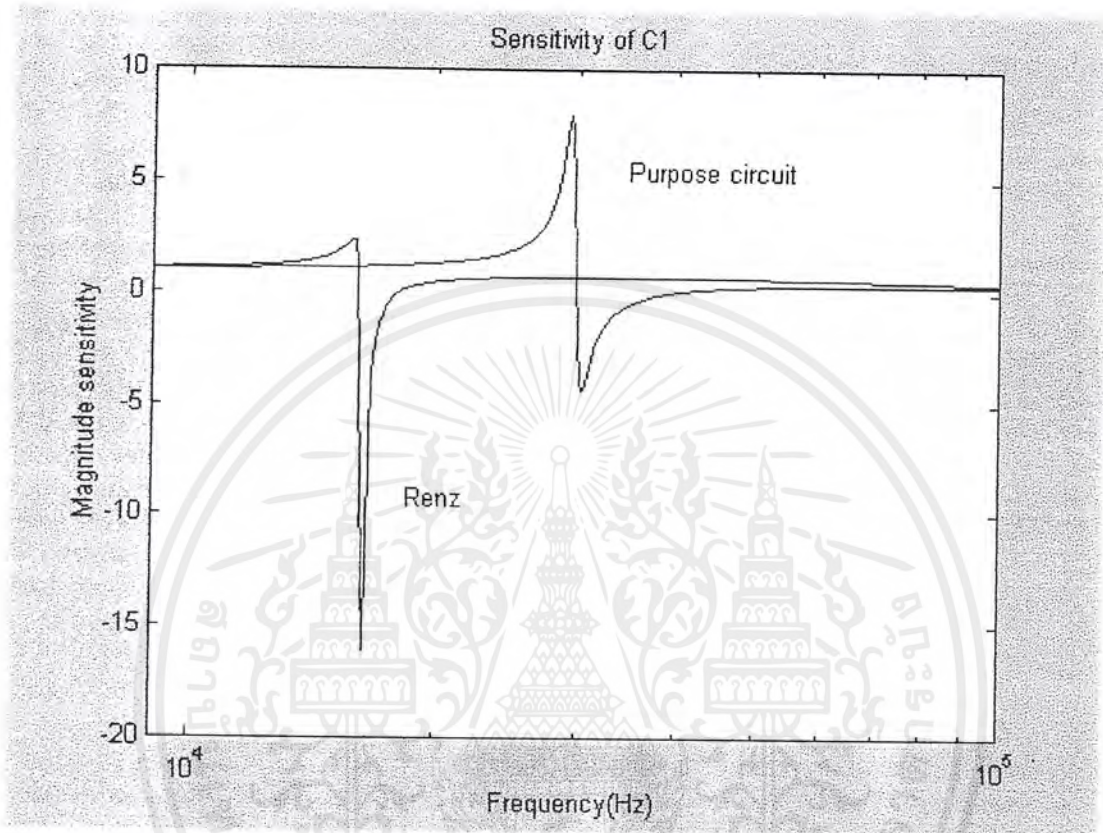
รูปที่ 4.10 Q sensitivity characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



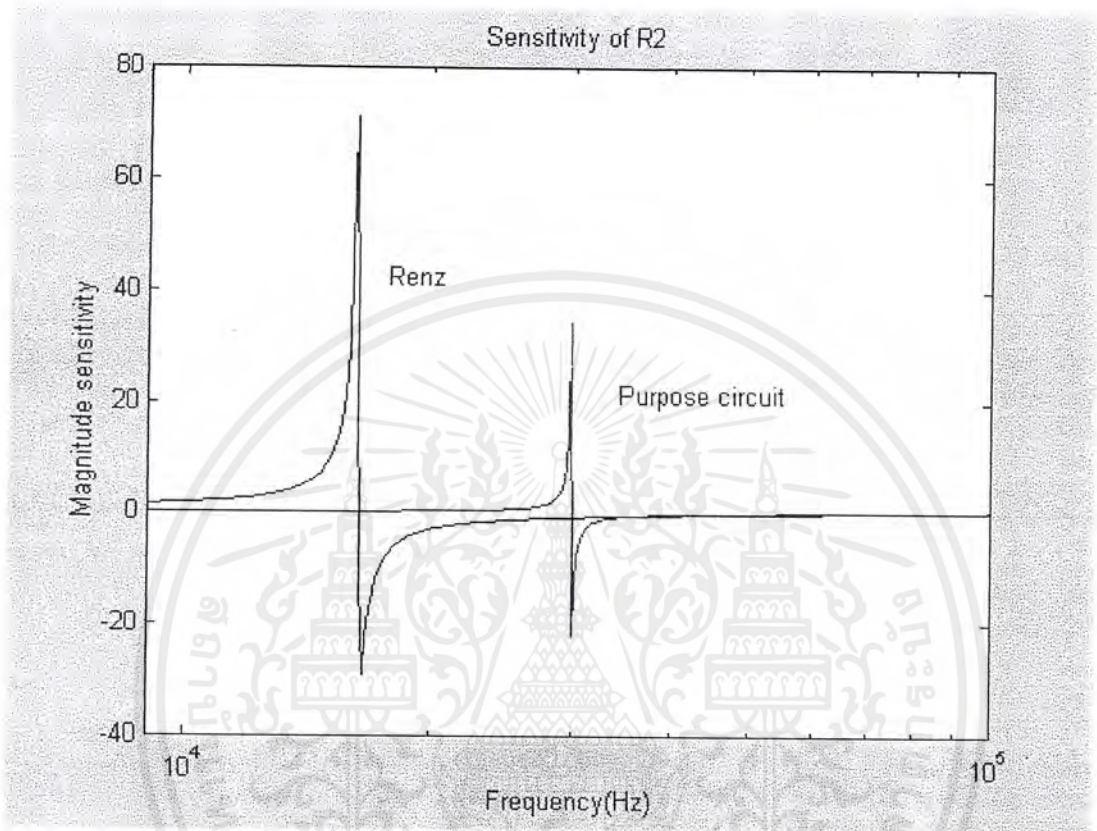
รูปที่ 4.11 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R1 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



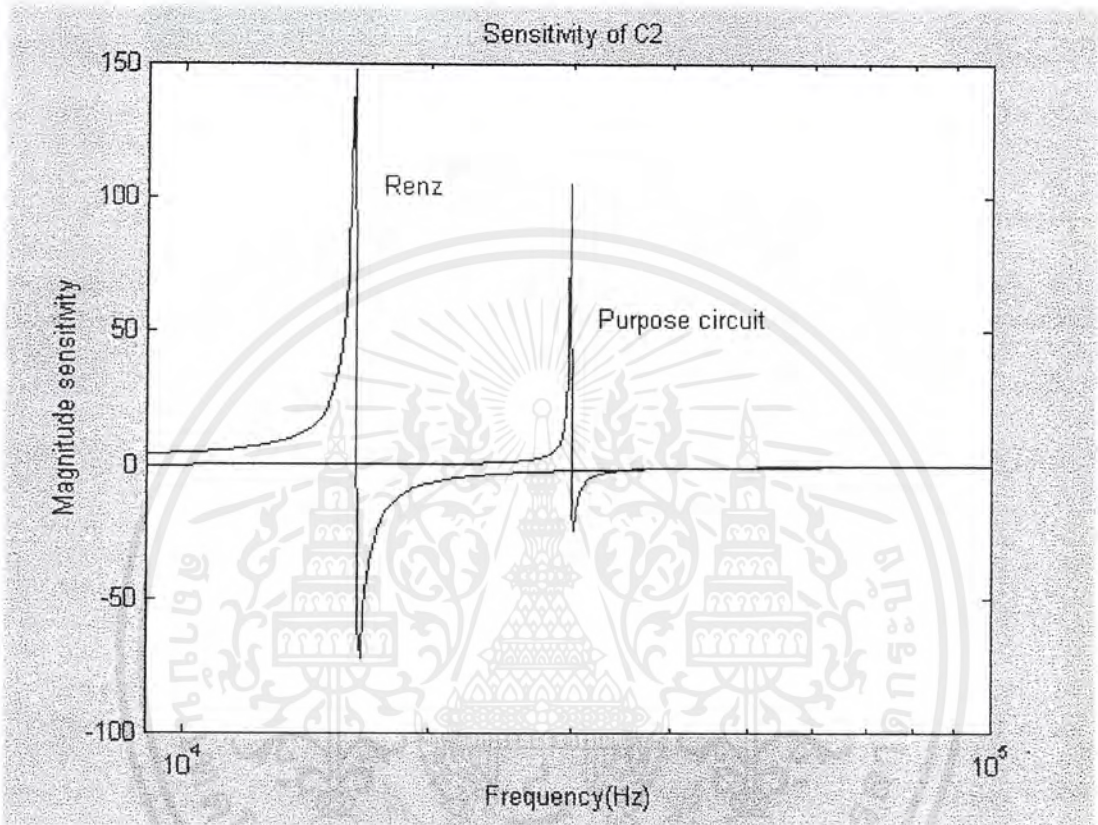
รูปที่ 4.12 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C1 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



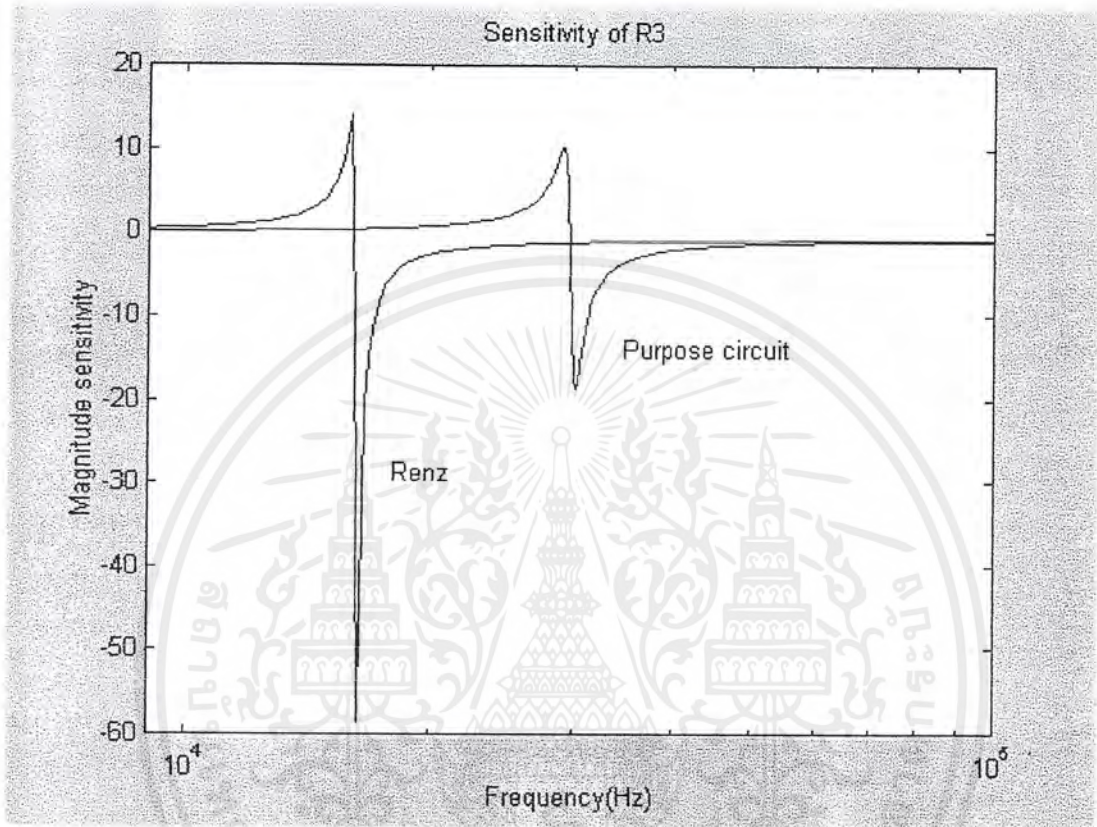
รูปที่ 4.13 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R2 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



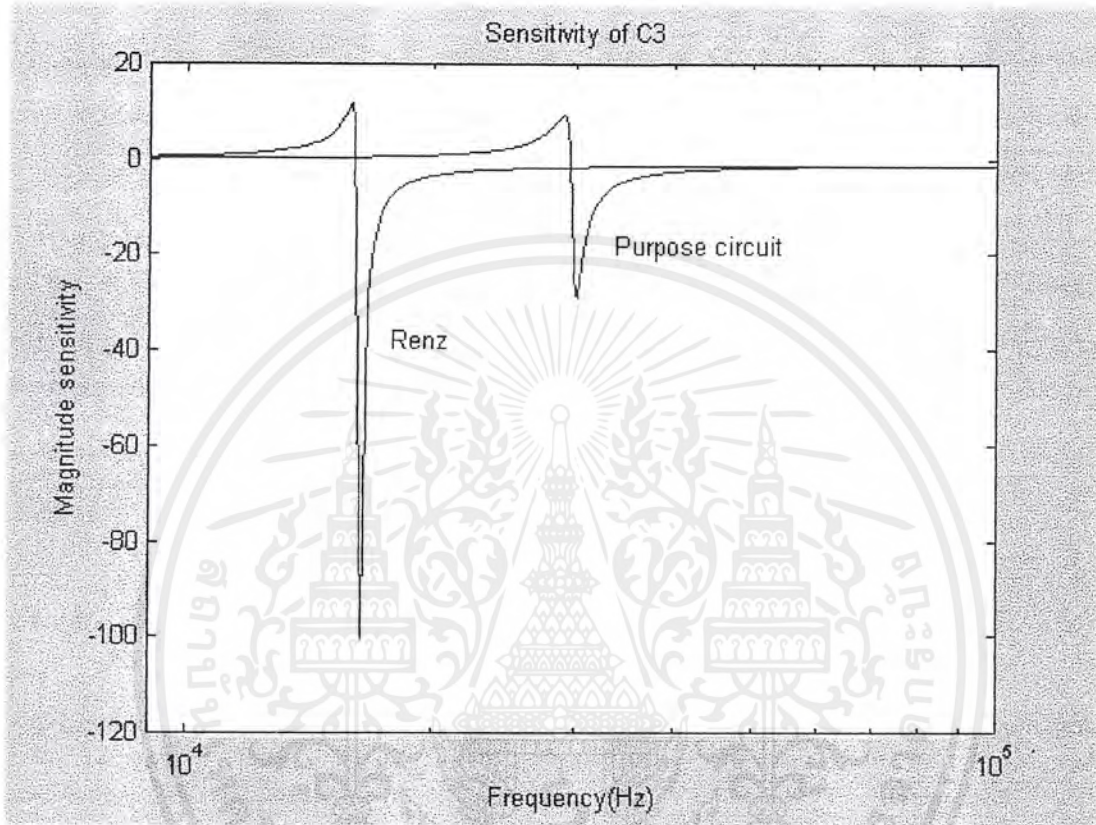
รูปที่ 4.14 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C2 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



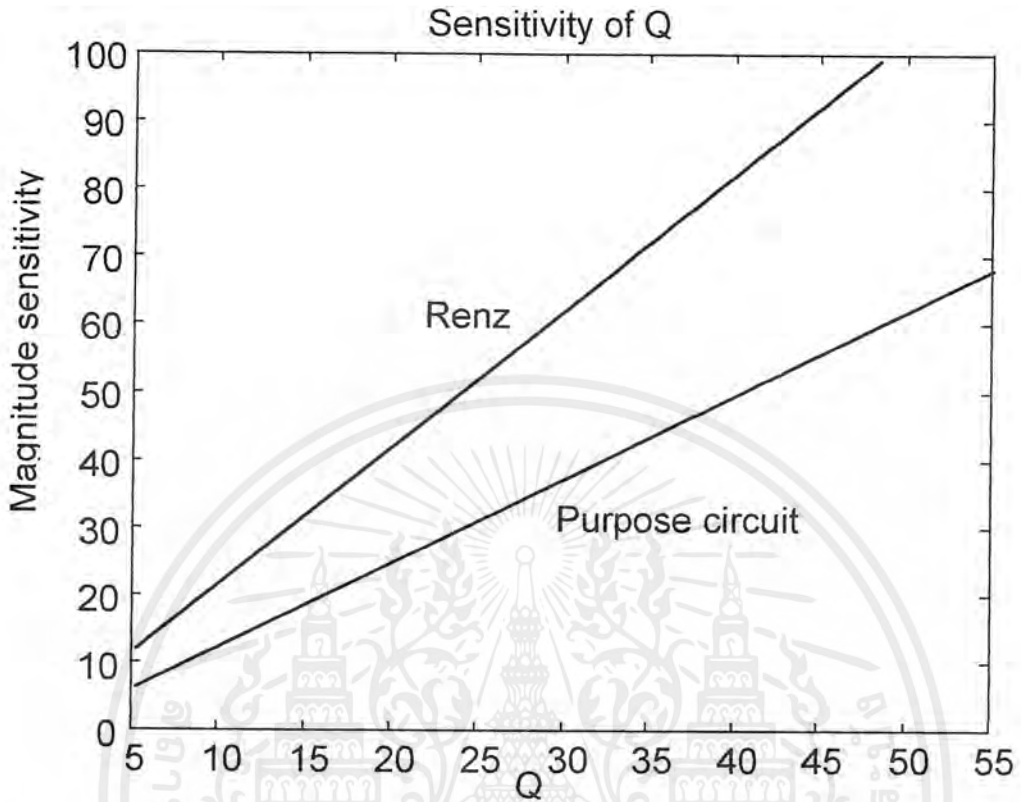
รูปที่ 4.15 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element R3 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดง Sensitivity เมื่อเทียบกับ Element C3 ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดง Sensitivity of Q เมื่อเทียบระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหาค่า Q ของวงจร Renz

k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
4.700000	4.02	8.313725	4058.451049	16599.860564	17.442893
4.710000	4.12	8.441903	3962.958083	16583.945070	17.598753
4.720000	4.15	8.582996	3931.127094	16583.945070	17.756852
4.730000	4.22	8.724280	3867.465117	16583.945070	17.917151
4.740000	4.29	8.870293	3803.803140	16583.945070	18.079720
4.750000	4.36	9.021277	3740.141163	16568.029576	18.244794
4.760000	4.44	9.177489	3676.479185	16568.029576	18.412312
4.770000	4.52	9.339207	3612.817208	16568.029576	18.582348
4.780000	4.60	9.506726	3549.155231	16552.114082	18.755112
4.790000	4.68	9.680365	3485.493254	16552.114082	18.930650
4.800000	4.72	9.867281	3453.662265	16552.114082	19.108998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
4.810000	4.86	10.047393	3358.169299	16536.198587	19.290325
4.820000	4.95	10.241546	3294.507322	16536.198587	19.474824
4.830000	5.00	10.451479	3262.676333	16536.198587	19.662474
4.840000	5.10	10.661908	3199.014356	16536.198587	19.853398
4.850000	5.26	10.871795	3103.521390	16520.283093	20.047967
4.860000	5.31	11.109279	3071.690402	16520.283093	20.246097
4.870000	5.42	11.347361	3008.028424	16520.283093	20.447934
4.880000	5.60	11.584699	2912.535459	16504.367599	20.653809
4.890000	5.66	11.855545	2880.704470	16504.367599	20.863831
4.900000	5.79	12.127119	2817.042493	16504.367599	21.078083
4.910000	5.99	12.397661	2721.549527	16488.452104	21.296840
4.920000	6.07	12.709436	2689.718538	16488.452104	21.520468
4.930000	6.21	13.022113	2626.056561	16488.452104	21.748966
4.940000	6.37	13.350587	2562.394584	16488.452104	21.982569
4.950000	6.61	13.677419	2466.901618	16472.536610	22.221870
4.960000	6.70	14.059977	2435.070629	16472.536610	22.466878
4.970000	6.88	14.443767	2371.408652	16472.536610	22.717849
4.980000	7.17	14.825175	2275.915686	16456.621116	22.975318
4.990000	7.27	15.277968	2244.084698	16456.621116	23.239681
5.000000	7.48	15.732360	2180.422720	16456.621116	23.511096
5.010000	7.82	16.183206	2084.929755	16440.705621	23.790010
5.020000	7.95	16.727575	2053.098766	16440.705621	24.077369
5.030000	8.20	17.274074	1989.436789	16440.705621	24.373196
5.040000	8.47	17.857597	1925.774811	16440.705621	24.678033
5.050000	8.91	18.434783	1830.281846	16424.790127	24.992917
5.060000	9.07	19.151917	1798.450857	16424.790127	25.318394
5.070000	9.40	19.872357	1734.788880	16424.790127	25.654963
5.080000	9.95	20.582524	1639.295914	16408.874633	26.003602
5.090000	10.15	21.489863	1607.464925	16408.874633	26.365844
5.100000	10.57	22.402062	1543.802948	16408.874633	26.742070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.110000	11.02	23.395586	1480.140971	16408.874633	27.133444
5.120000	11.78	24.367816	1384.648005	16392.959138	27.542150
5.130000	12.06	25.674740	1352.817016	16392.959138	27.969338
k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
5.140000	12.65	26.990741	1289.155039	16392.959138	28.416434
5.150000	13.67	28.266667	1193.662073	16377.043644	28.885820
5.160000	14.44	29.859155	1130.000096	16377.043644	29.380886
5.170000	14.86	31.906355	1098.169107	16377.043644	29.903270
5.180000	15.77	33.974359	1034.507130	16377.043644	30.456221
5.190000	17.37	35.932203	939.014164	16361.128150	31.045536
5.200000	18.64	38.545455	875.352187	16361.128150	31.675241
5.210000	19.34	42.222222	843.521198	16361.128150	32.350549
5.220000	21.81	45.106383	748.028233	16345.212656	33.079551
5.230000	23.84	49.302326	684.366255	16345.212656	33.874504
5.240000	26.28	54.358974	620.704278	16345.212656	34.744687
5.250000	27.70	63.027027	588.873289	16345.212656	35.705842
5.260000	33.06	68.387097	493.380324	16329.297161	36.785684
5.270000	37.96	78.518518	429.718346	16329.297161	38.014793
5.280000	44.57	92.173913	366.056369	16329.297161	39.436864
5.290000	53.95	111.578947	302.394392	16313.381667	41.126340
5.300000	68.33	111.578947	238.732415	16313.381667	43.236182

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหาค่า Q ของวงจร Band pass filter Purpose Circuit

k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
3.200000	4.924282	5.498695	6095.634320	28886.622171	12.287516
3.210000	5.002653	5.577211	6000.141355	28902.537665	12.437789
3.220000	5.083558	5.657999	5904.648389	28918.453160	12.589738
3.230000	5.138965	5.741592	5840.986411	28934.368654	12.743415
3.240000	5.224377	5.827248	5745.493446	28950.284148	12.898874
3.250000	5.312676	5.915493	5650.000480	28966.199643	13.056171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.260000	5.404011	6.006447	5554.507514	28982.115137	13.215365
3.270000	5.466667	6.100759	5490.845537	28998.030631	13.376518
3.280000	5.530792	6.198089	5427.183559	29029.861620	13.539712
3.290000	5.629851	6.298018	5331.690594	29045.777114	13.704998
3.300000	5.732523	6.401216	5236.197628	29061.692609	13.872447
3.310000	5.803077	6.508475	5172.535650	29077.608103	14.042134
3.320000	5.912226	6.618744	5077.042685	29093.523597	14.214136
3.330000	6.025559	6.732806	4981.549719	29109.439092	14.388536
3.340000	6.143322	6.850861	4886.056753	29125.354586	14.565420
3.350000	6.224422	6.973897	4822.394776	29141.270080	14.744878
3.360000	6.350168	7.100636	4726.901810	29157.185574	14.927007
3.370000	6.481100	7.232056	4631.408844	29173.101069	15.111907
3.380000	6.617544	7.368421	4535.915878	29189.016563	15.299685
3.390000	6.711744	7.510990	4472.253901	29204.932057	15.490454
3.400000	6.858182	7.658182	4376.760935	29220.847552	15.684333
3.410000	7.011152	7.811243	4281.267969	29236.763046	15.881447
3.420000	7.116981	7.971698	4217.605992	29252.678540	16.081931
k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
3.430000	7.281853	8.137682	4122.113026	29268.594035	16.285926
3.440000	7.454545	8.310706	4026.620060	29284.509529	16.493584
3.450000	7.635628	8.491228	3931.127094	29300.425023	16.705064
3.460000	7.761317	8.681257	3867.465117	29316.340518	16.920537
3.470000	7.957806	8.878422	3771.972151	29332.256012	17.140187
3.480000	8.164502	9.084725	3676.479185	29348.171506	17.364207
3.490000	8.308370	9.302675	3612.817208	29380.002495	17.592821
3.500000	8.457399	9.531390	3549.155231	29395.917989	17.826242
3.510000	8.691244	9.769585	3453.662265	29411.833483	18.064708
3.520000	8.938389	10.019955	3358.169299	29427.748978	18.308475
3.530000	9.111111	10.285938	3294.507322	29443.664472	18.557821
3.540000	9.383085	10.563847	3199.014356	29459.579966	18.813047
3.550000	9.671795	10.857143	3103.521390	29475.495461	19.074478

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.560000	9.978836	11.167134	3008.028424	29491.410955	19.342465
3.570000	10.194595	11.498771	2944.366447	29507.326449	19.617390
3.580000	10.536313	11.847067	2848.873481	29523.241944	19.899670
3.590000	10.901734	12.217043	2753.380515	29539.157438	20.189758
3.600000	11.159763	12.615385	2689.718538	29555.072932	20.488153
3.610000	11.570552	13.035752	2594.225572	29570.988426	20.795400
3.620000	12.012739	13.484986	2498.732607	29586.903921	21.112100
3.630000	12.326797	13.972404	2435.070629	29602.819415	21.438917
3.640000	12.829932	14.489796	2339.577663	29618.734909	21.776586
3.650000	13.375887	15.046809	2244.084698	29634.650404	22.125924
3.660000	13.970370	15.648148	2148.591732	29650.565898	22.487847
3.670000	14.396947	16.309326	2084.929755	29666.481392	22.863378
3.680000	15.088000	17.018182	1989.436789	29682.396887	23.253670
3.690000	15.848739	17.791116	1893.943823	29698.312381	23.660031
3.700000	16.400000	18.652174	1830.281846	29714.227875	24.083948
3.710000	17.302752	19.584742	1734.788880	29730.143370	24.527122
3.720000	18.310680	20.614887	1639.295914	29746.058864	24.991515
3.730000	19.050505	21.782531	1575.633937	29761.974358	25.479404
3.740000	20.279570	23.064516	1480.140971	29777.889852	25.993450
k	q	sq	bwn(Hz)	wn(Hz)	gain(dB)
3.750000	21.678161	24.505747	1384.648005	29793.805347	26.536792
3.760000	22.722892	26.179002	1320.986028	29809.720841	27.113171
3.770000	24.493506	28.051948	1225.493062	29825.636335	27.727089
3.780000	26.563380	30.211268	1130.000096	29841.551830	28.384034
3.790000	28.149254	32.808684	1066.338119	29857.467324	29.090792
3.800000	30.918033	35.803279	970.845153	29873.382818	29.855888
3.810000	34.290909	39.393939	875.352187	29889.298313	30.690236
3.820000	36.980392	43.970588	811.690210	29905.213807	31.608131
3.830000	41.911111	49.523809	716.197244	29921.129301	32.628797
3.840000	48.358974	56.666667	620.704278	29937.044796	33.778953
3.850000	53.885714	66.857143	557.042301	29952.960290	35.097303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.860000, 65.034483, 80.689655, 461.549335, 29968.875784, 36.642960
3.870000, 82.000000, 101.739130, 366.056369, 29984.791279, 38.512896
3.880000, 99.263158, 143.684210, 302.394392, 30000.706773, 40.883151
3.890000, 145.076923, 239.999999, 206.901426, 30016.622267, 44.127399
3.900000, 377.200000, 239.999999, 79.577472, 30016.622267, 49.305056

หมายเหตุ

1. Renz หมายถึง วงจรฟิลเตอร์ Renz Band Pass Filter
2. Purpose Ciucuit หมายถึง วงจรฟิลเตอร์ Band Pass filter Case2

ซึ่งจากการพิจารณาคุณสมบัติหลาย ๆ ด้านจะดีกว่า Band Pass filter Case1 จึงได้นำมาทำเป็น Purpose ciucuit .

4.8 ผลการออกแบบ

จากการออกแบบในบทนี้ เป็นการออกแบบโดยเปรียบเทียบกันระหว่าง วงจร Band pass filter Case1, Case2 กับ วงจร Renz โดยใช้โปรแกรม Matlab simulation ค่าความไวต่ออัตราขยายซึ่งแสดงในรูปที่ ค่าความไวของ วงจร BPF Case2 จะดีกว่า Case1 และ Renz ส่วนความไวต่ออุปกรณ์ R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 และ C_3 ในย่านความถี่ผ่าน ค่าความไวของ BPF Case2 จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า Case1 และ Renz จากรูปที่แสดงไว้จะเห็นได้ชัดว่าวงจร Band pass filter ที่ออกแบบ Case2 เมื่อเปรียบเทียบกับวงจร Renz band pass filter จะมีความไวที่ดีกว่า

บทที่ 5

การใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์ และการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม P-Spice

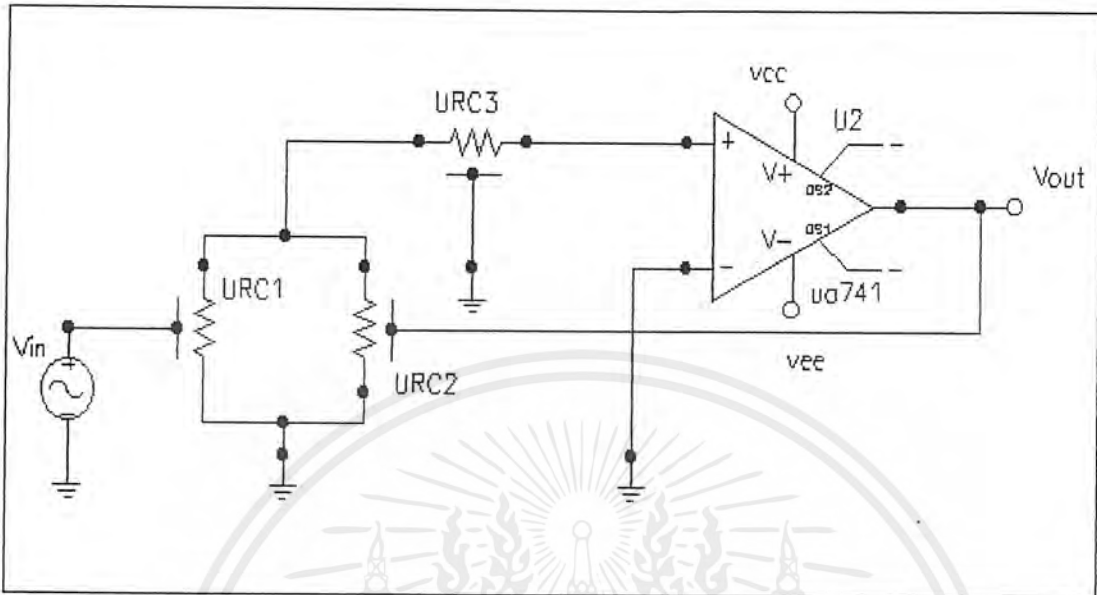
5.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบเราจำเป็นต้องใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์สมการ เพื่อสังเกตรูปกราฟที่แสดงถึงผลการตอบสนองความถี่ของสมการที่ออกแบบไว้ว่าเป็นไปตามความต้องการหรือไม่ และโปรแกรม P-Spice เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการทดสอบวงจรที่ได้ออกแบบไว้ก่อนลงมือปฏิบัติการต่อวงจรจริง หรือเป็นการจำลองการทำงานของวงจรจริงด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นั่นเองว่าจะสามารถทำงานได้หรือไม่ ในทางตรงกันข้ามถ้าผลการจำลองไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ก็แสดงว่าในการคำนวณออกแบบวงจรเกิดความผิดพลาด จากการรูปภาพ จากการใช้โปรแกรม Matlab ในการเซมปลิง หรือในการคำนวณขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง หรือการนผลที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการทดสอบด้วยโปรแกรม P-Spice โดยไม่ได้ทำการสเกลค่าของอุปกรณ์ก็จะมีผลทำให้รูปภาพจากการจำลองผิดพลาดไปได้เช่นกัน

5.2 การใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์วงจร

5.2.1 วงจรของ Renz เป็นวงจรที่ใช้ URC ในการออกแบบ Band Pass Filter โดย Renz เป็นผู้ออกแบบขึ้นซึ่งวงจรของ Renz นี้เราจะนำมาเป็นต้นแบบในการออกแบบวงจรที่ทำการทดลองนี้ เพื่อที่จะทำให้ค่า Parameter ต่างๆ ดีขึ้น ดังรูปที่ 5.1

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้ } \alpha &= 1 ; \alpha \text{ คือ อัตราส่วนระหว่าง } R1/R2 = C2/C1 \\ K &= 5.3 ; K \text{ คือ Gain ของวงจร} \end{aligned}$$



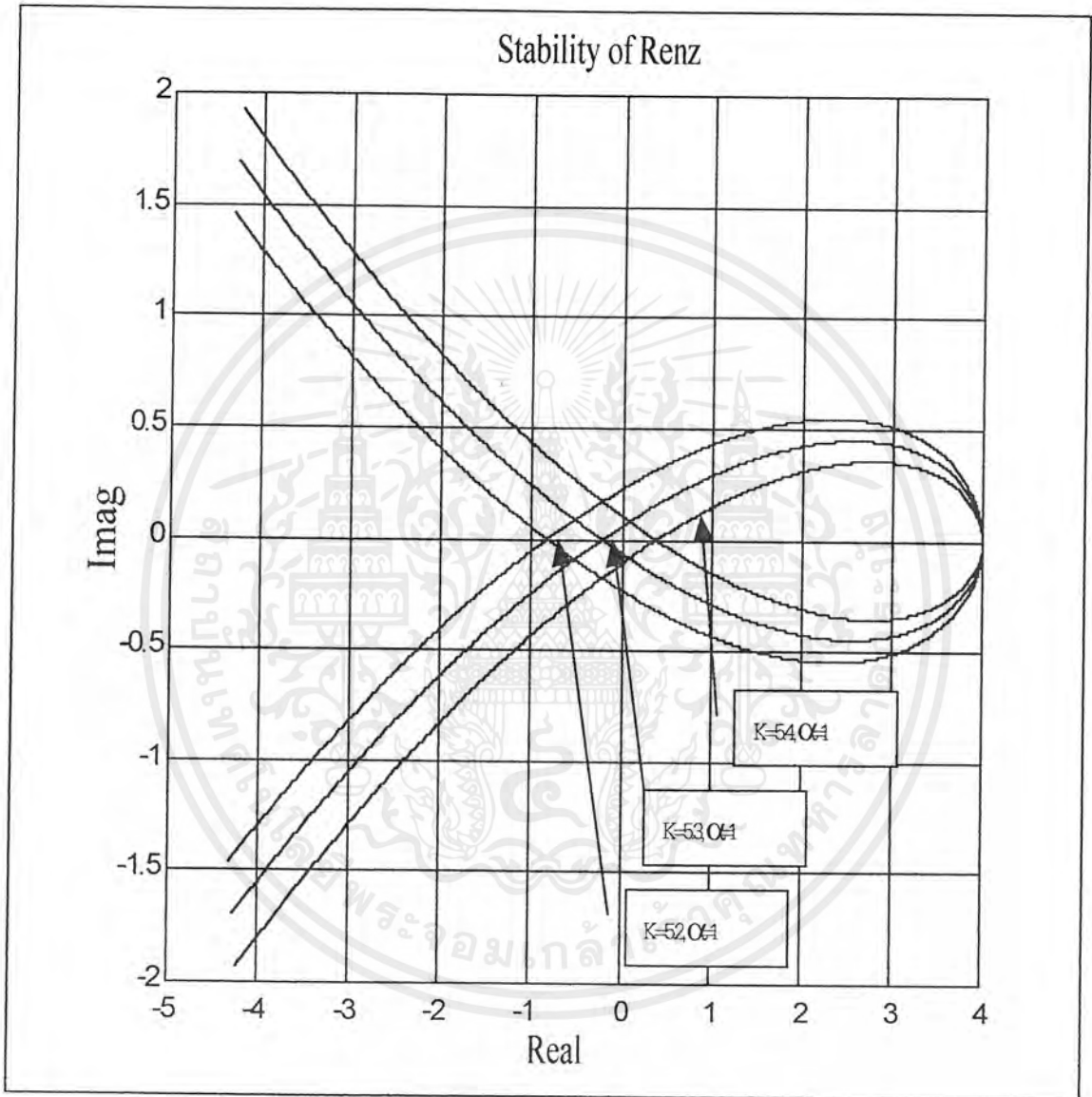
รูปที่ 5.1 วงจรกรองความถี่แบบเร็นต์ (RENZ Band pass filter circuit)

จากวงจรข้างบนดังกล่าว ทำให้สามารถคำนวณหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้เป็น

$$\begin{aligned}
 T(p) &= \frac{K(Y-1)}{(2+\alpha)Y^2 - KY + K - \alpha} \\
 &= \frac{K(Y-1)}{(2+\alpha)Y^2 - K(Y-1) + K - \alpha} \\
 \alpha = \frac{R_1}{R_2} &= \frac{2K(\text{Cosh}P - 1)}{(2+\alpha)\text{Cosh}2P - 2K(Y-1) + 2 + \alpha - 2\alpha} \\
 &= \frac{2K(\text{Cosh}P - 1)}{(2+\alpha)\text{Cosh}2P - 2K(\text{Cosh} - 1) + (2 - \alpha)}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

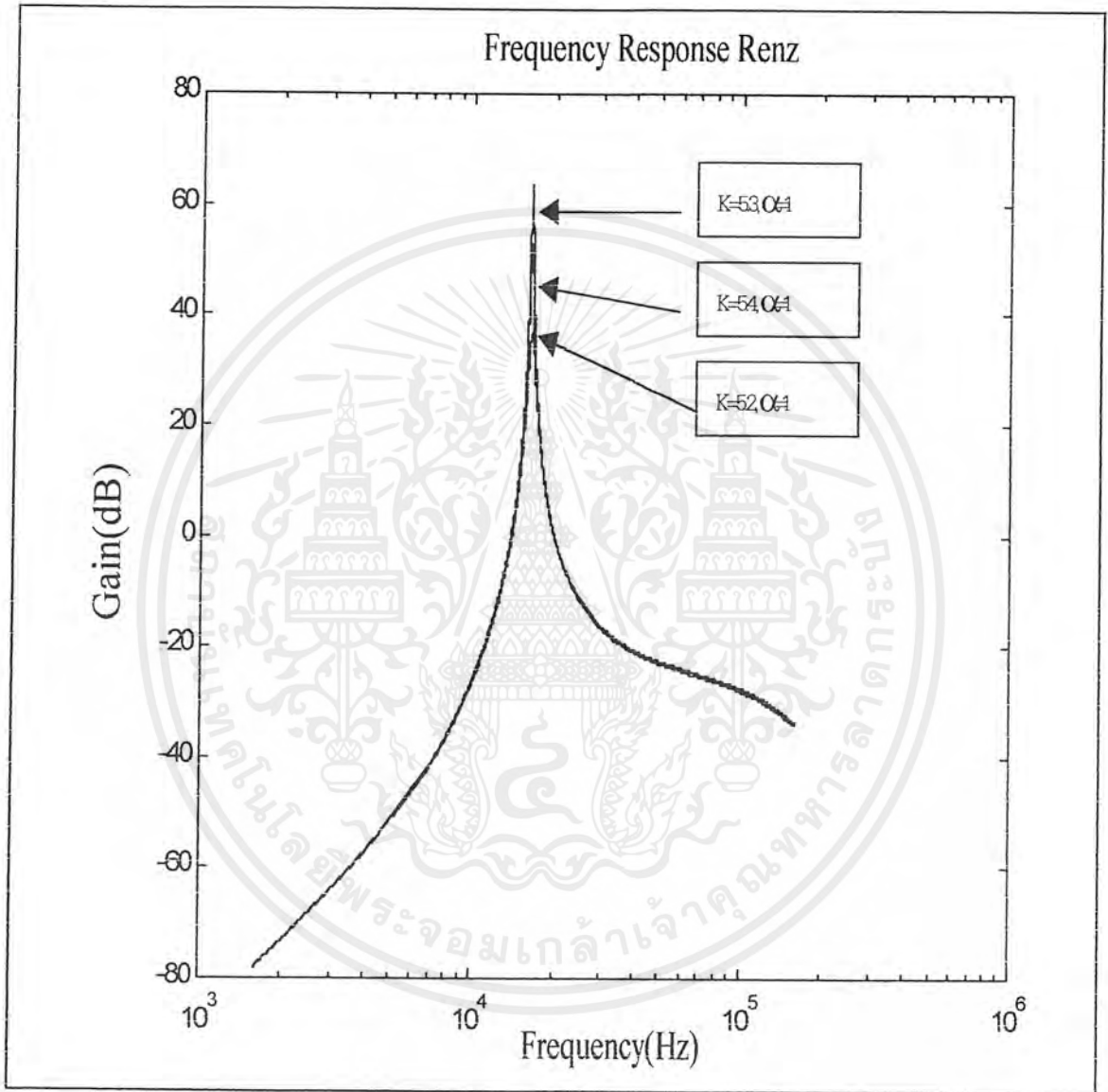
ซึ่งสามารถนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเสถียรภาพของวงจрдังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงอัตราขยายที่เหมาะสม ด้วยโปรแกรม MATLAB และวงจรมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังสามารถหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถัดรูปที่ 5.3



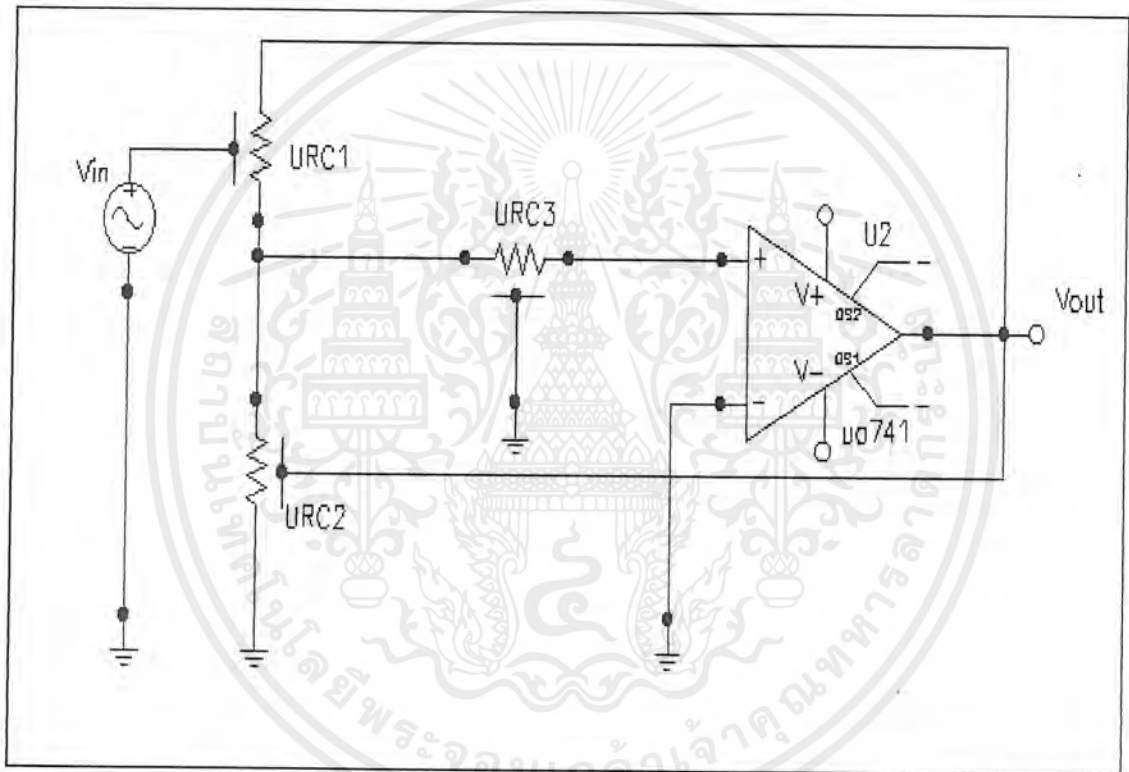
รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถัดรูปที่ 5.3 ด้วยโปรแกรม MATLAB

ซึ่งจะได้ค่าที่เหมาะสมคือ $\alpha = 1$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
 $K = 5.3$; K คือ Gain ของวงจรถัดรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 วงจรที่ออกแบบในกรณีที่ 1 (α) เป็นวงจรที่ใช้ URC ในการออกแบบ Band Pass Filter โดยดัดแปลงจากวงจรของ Renz เพื่อที่จะทำให้ค่า Parameter ต่างๆ ดีขึ้น ดังรูปที่ 5.4

กำหนดให้ $\alpha = 1$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
 $K = 4$; K คือ Gain ของวงจร



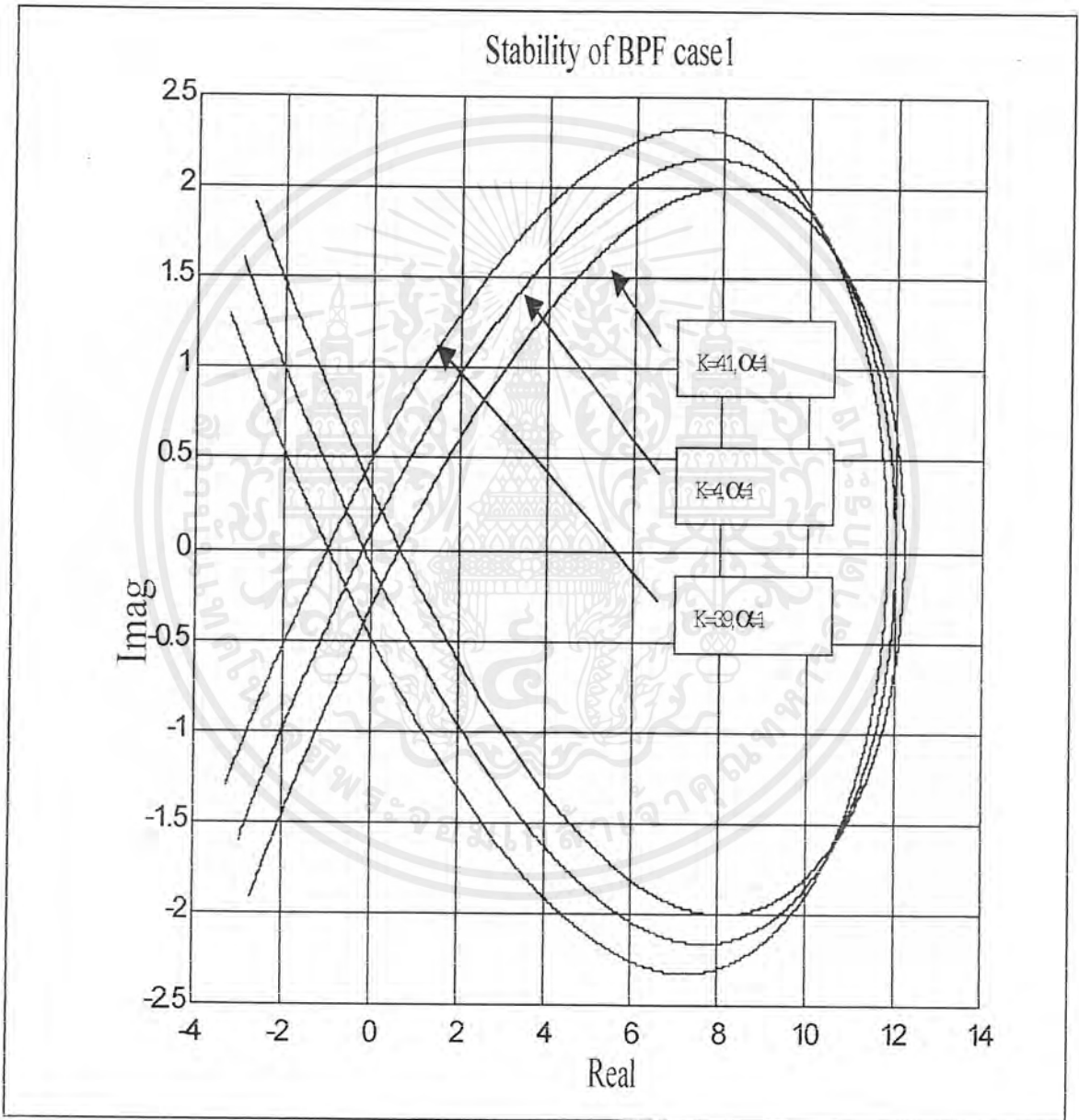
รูปที่ 5.4 วงจรกรองความถี่แบบ case 1 , α (Band pass filter case1)

จากวงจรข้างบนดังกล่าว ทำให้สามารถคำนวณหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(p) = \frac{2K (\text{Cosh } P - 1)}{3\text{Cosh}2P + 2K(2 - \text{Cosh } P) + 1}$$

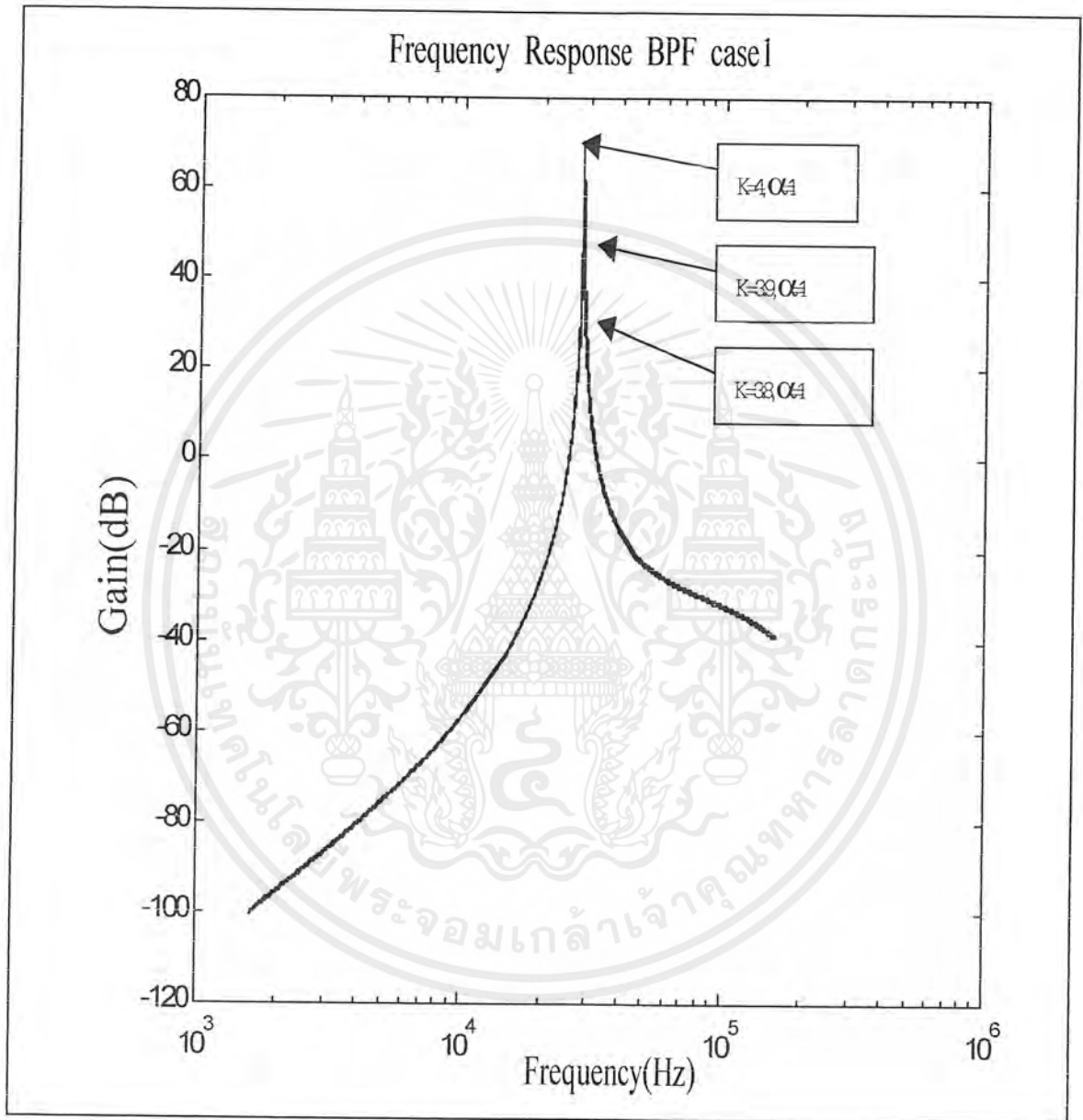
ซึ่งสามารถนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเสถียรภาพของวงจрдังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงอัตราการขยายที่เหมาะสม ด้วยโปรแกรม MATLAB และวงจรรยังมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังสามารถหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.6



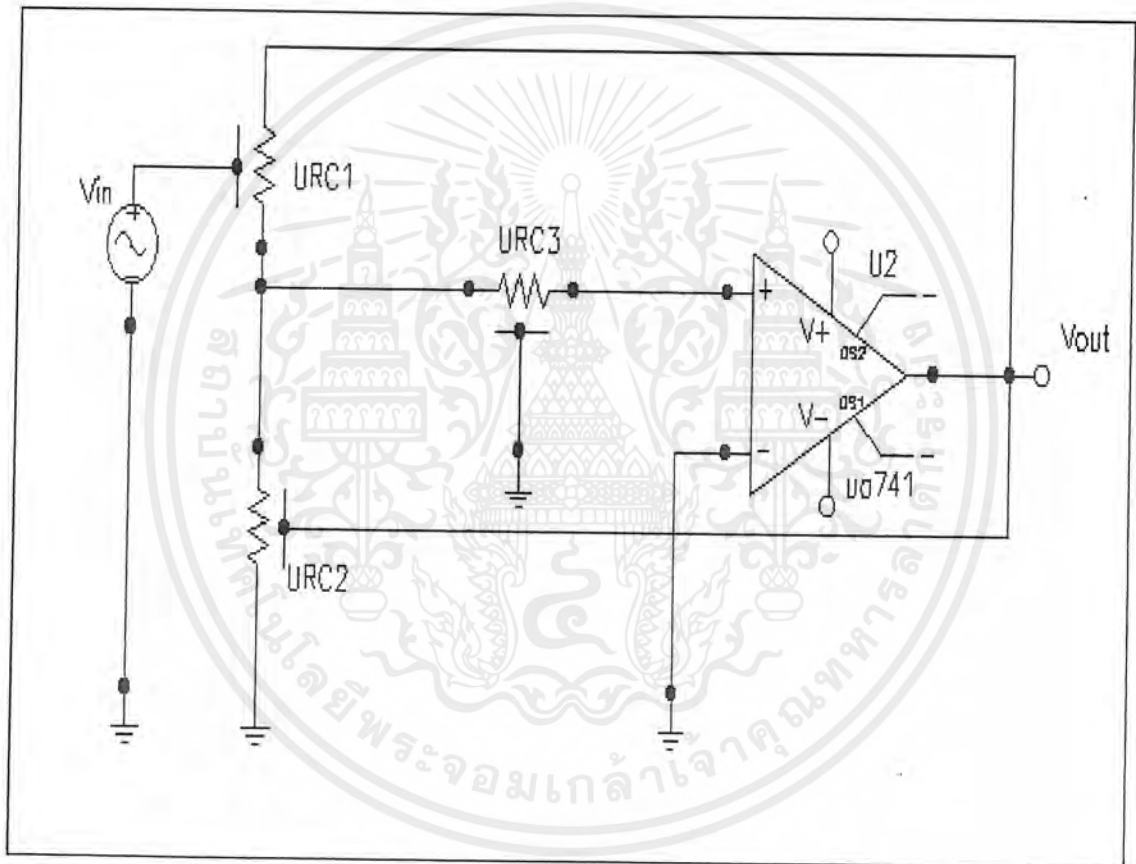
รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแบนพาส case1 ด้วยโปรแกรม MATLAB

ซึ่งจะได้ค่าที่เหมาะสมคือ $\alpha = 1$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
 $K = 4$; K คือ Gain ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 วงจรที่ได้ออกแบบในกรณีที่ 2 (α), (β) เป็นวงจรที่ใช้ URC ในการออกแบบ Band Pass Filter โดยดัดแปลงจากวงจรของ Renz เพื่อที่จะทำให้ค่า Parameter ต่างๆ ดีขึ้น

- กำหนดให้ $\alpha = 0.8$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
- $\beta = 0.7$; β คืออัตราส่วนระหว่าง $R1/R3 = C3/C1$
- $K = 3.9$; K คือ Gain ของวงจร



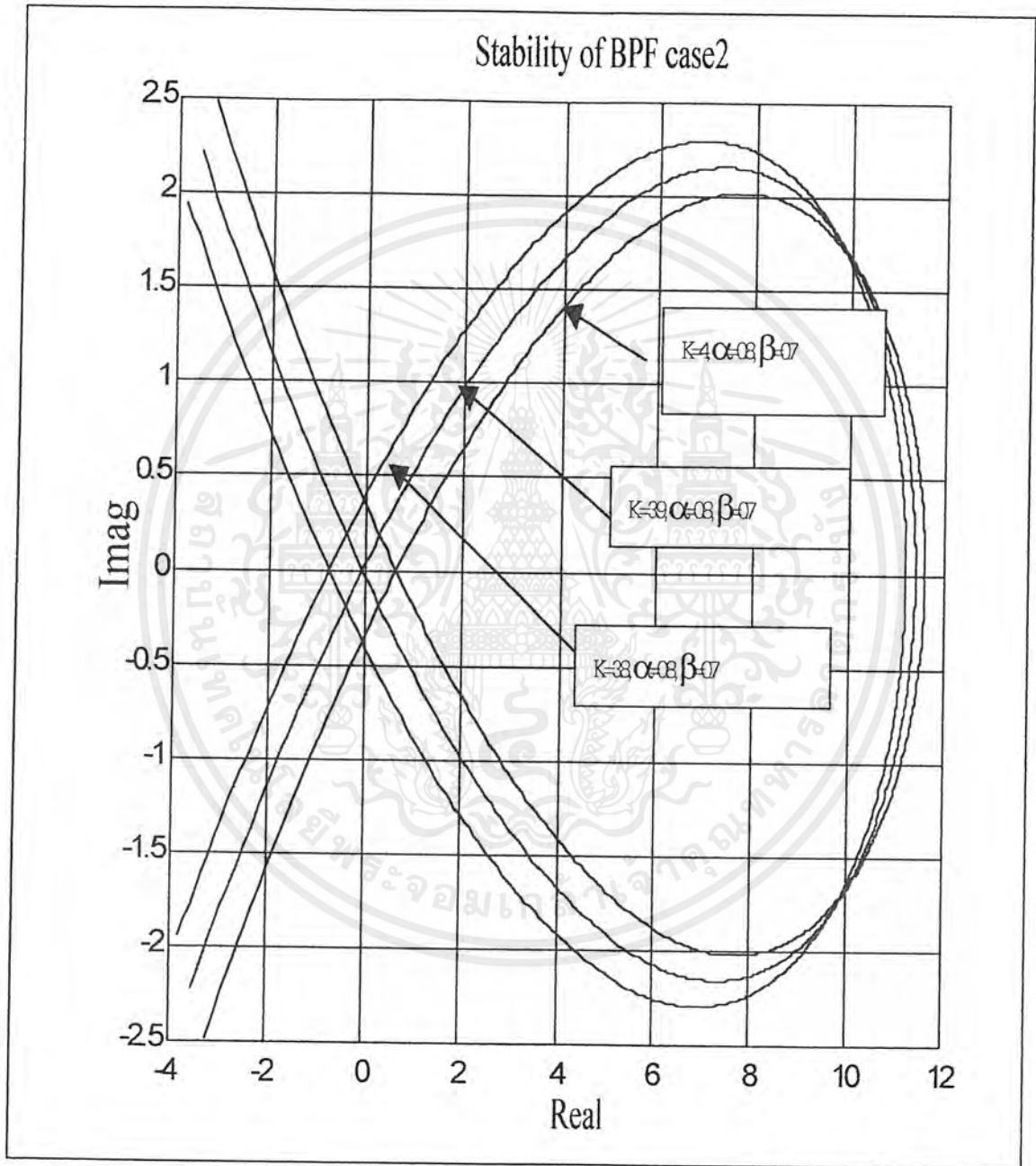
รูปที่ 5.7 วงจรกรองความถี่แบบ case 2 , α , β (Band pass filter case2)

จากวงจรข้างบนดังกล่าว ทำให้สามารถคำนวณหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้เป็น

$$T(p) = \frac{2K(\text{Cosh } p - 1)}{(1 + \alpha + \beta)\text{Cosh } 2p + 2K\{1 - \alpha(\text{Cosh } p - 1)\} + (1 + \alpha - \beta)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

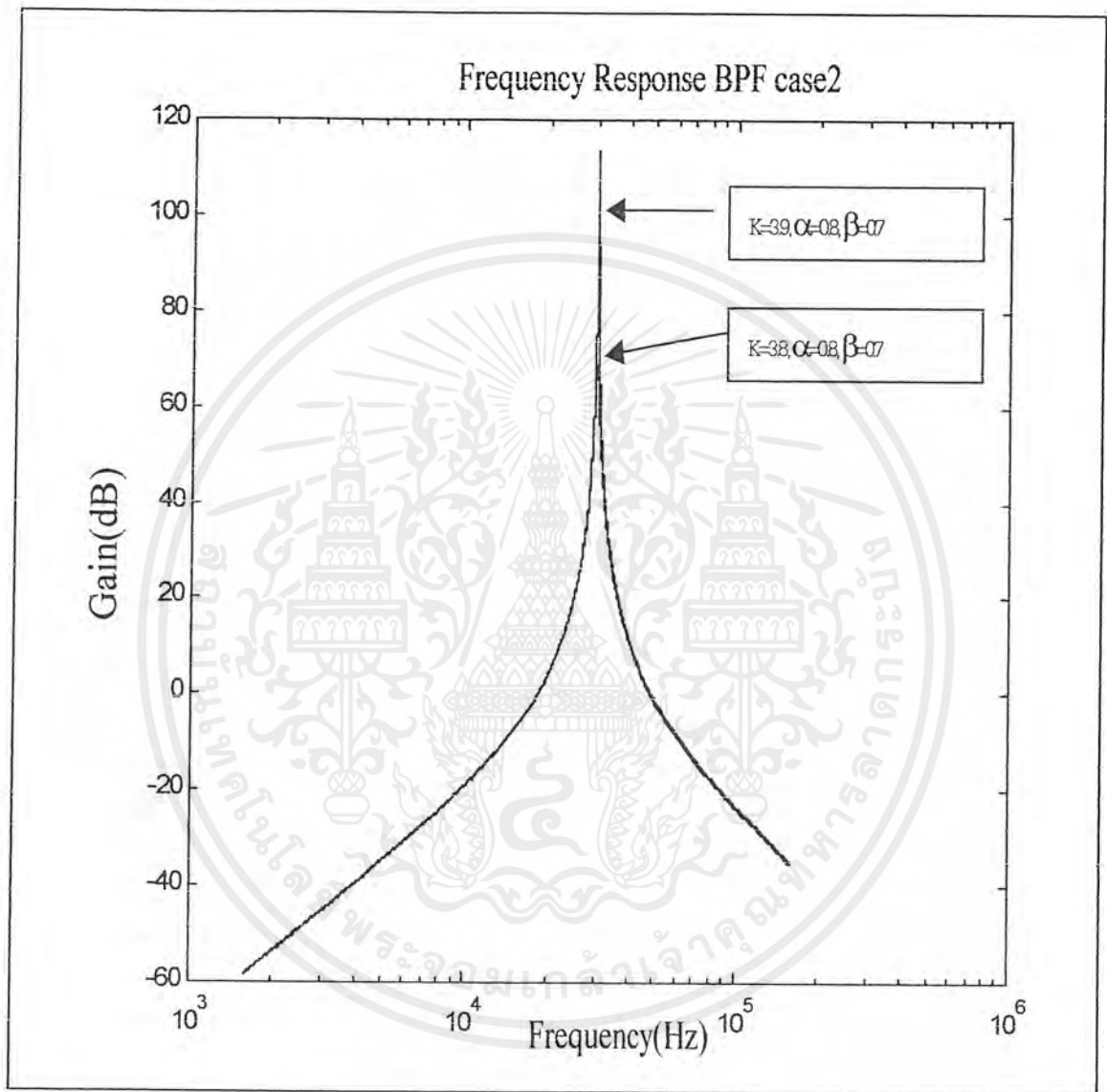
ซึ่งสามารถนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเสถียรภาพของวงจрдังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงอัตราขยายที่เหมาะสม ด้วยโปรแกรม MATLAB และวงจรมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังสามารถหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ ของวงจรกรองความถี่แบบ case 2 α, β

ซึ่งจะได้ค่าที่เหมาะสม $\alpha = 0.8$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$

$\beta = 0.7$; β คืออัตราส่วนระหว่าง $R1/R3 = C3/C1$

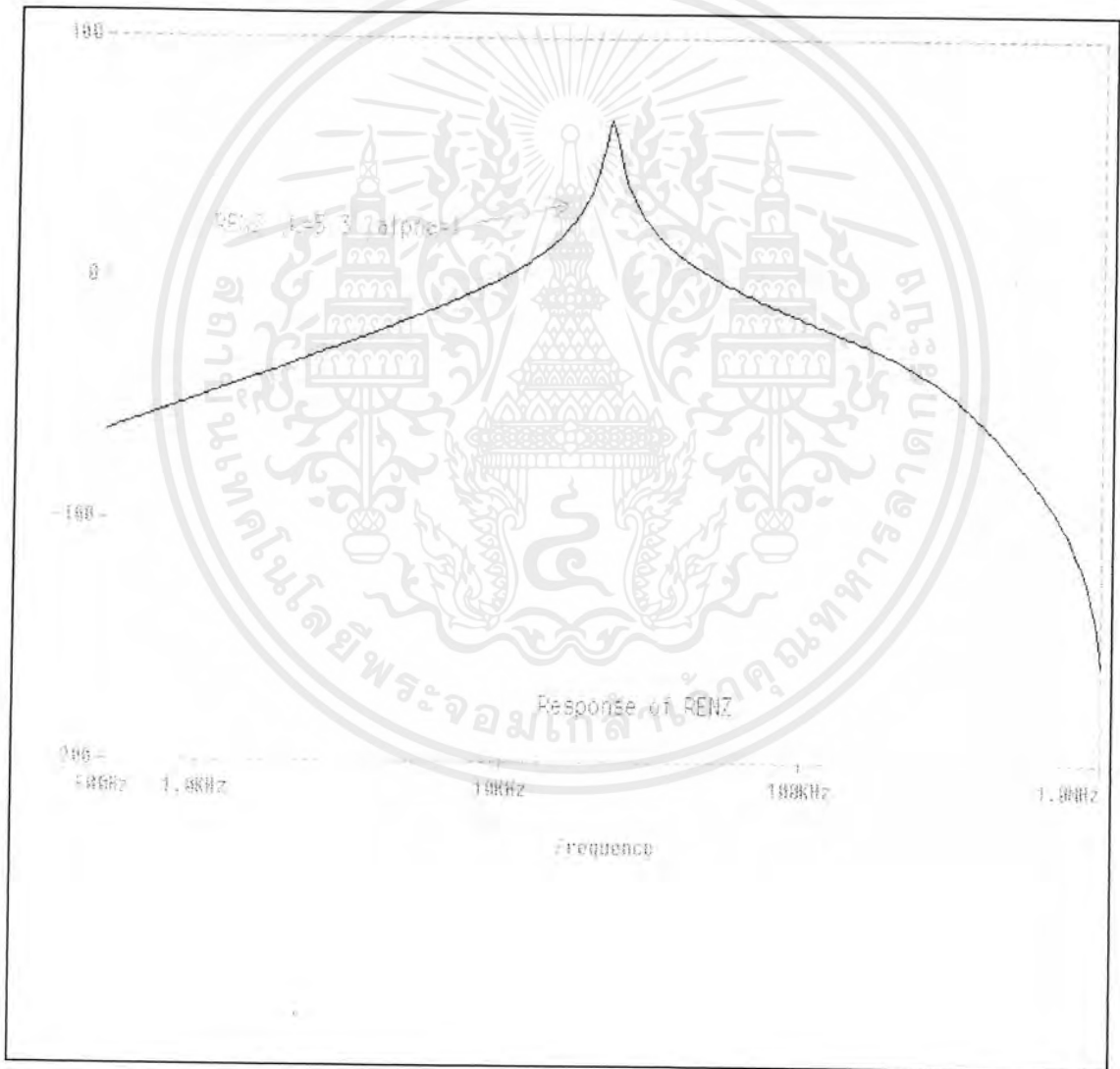
$K = 3.9$; K คือ Gain ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม P-Spice

5.3.1 วงจรของ Renz

ที่กำหนดให้ $\alpha = 1$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
 $K = 5.3$; K คือ Gain ของวงจร

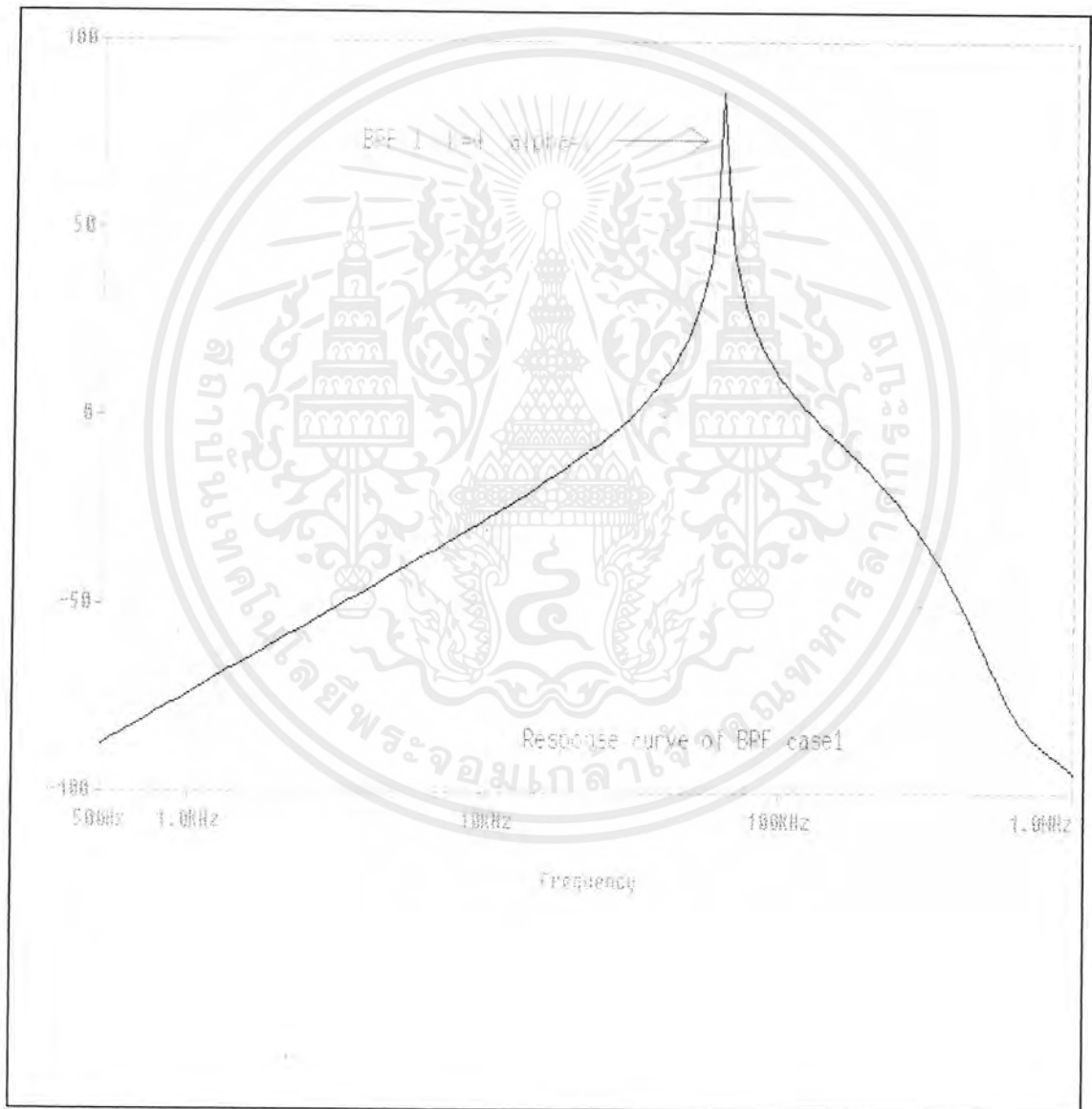


รูปที่ 5.10 แสดงผลสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบ Renz ด้วย โปรแกรม P-SPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 วงจรที่ออกแบบในกรณีที่ 1

ที่กำหนดให้ $\alpha = 1$; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$
 $K = 4$; K คือ Gain ของวงจร



รูปที่ 5.11 แสดงผลสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบ case1 (α) ด้วย โปรแกรม P-SPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 วงจรที่ออกแบบในกรณีที่ 2

ที่กำหนดให้ $\alpha = 0.8$

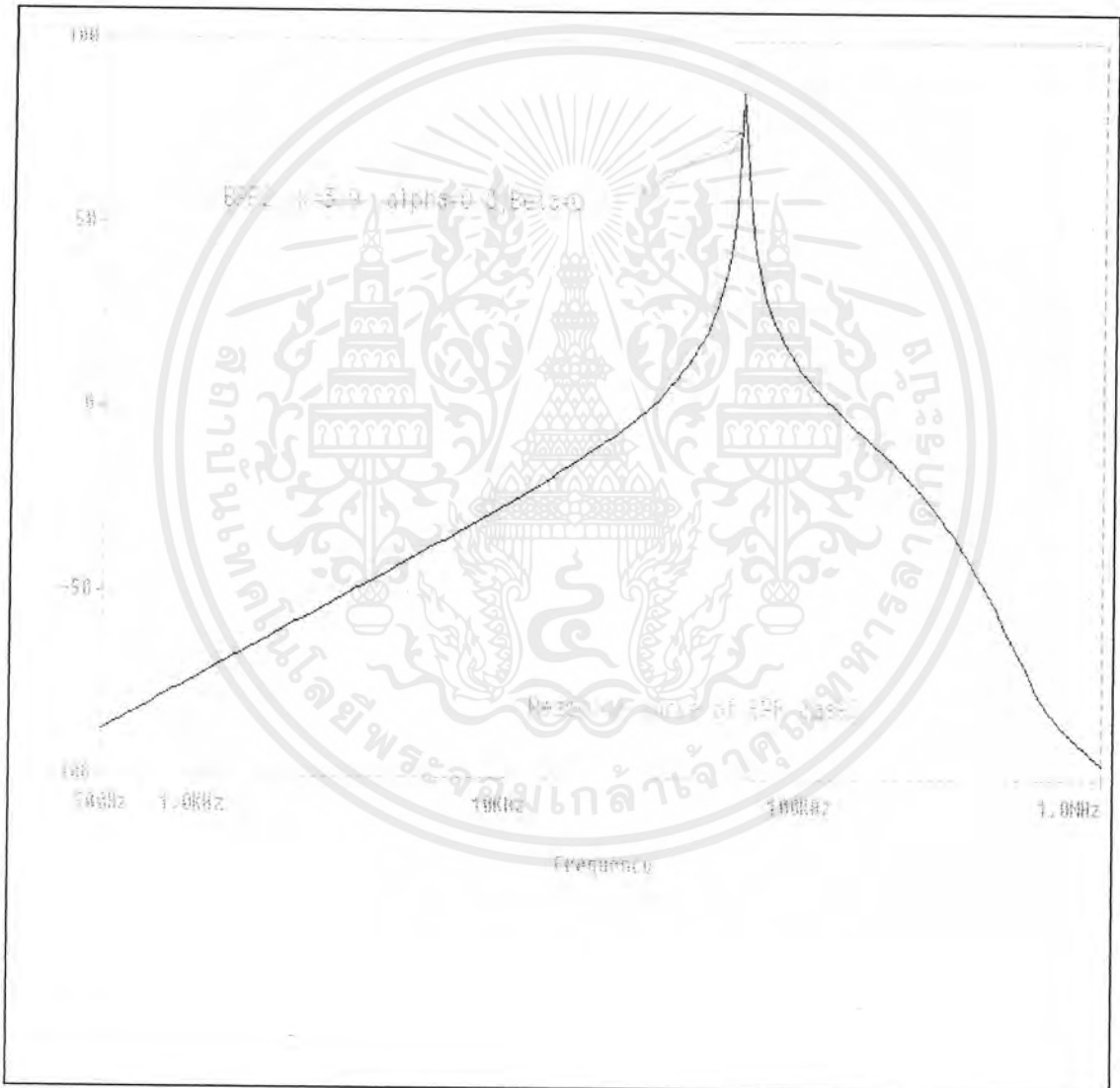
; α คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R2 = C2/C1$

$\beta = 0.7$

; β คือ อัตราส่วนระหว่าง $R1/R3 = C3/C1$

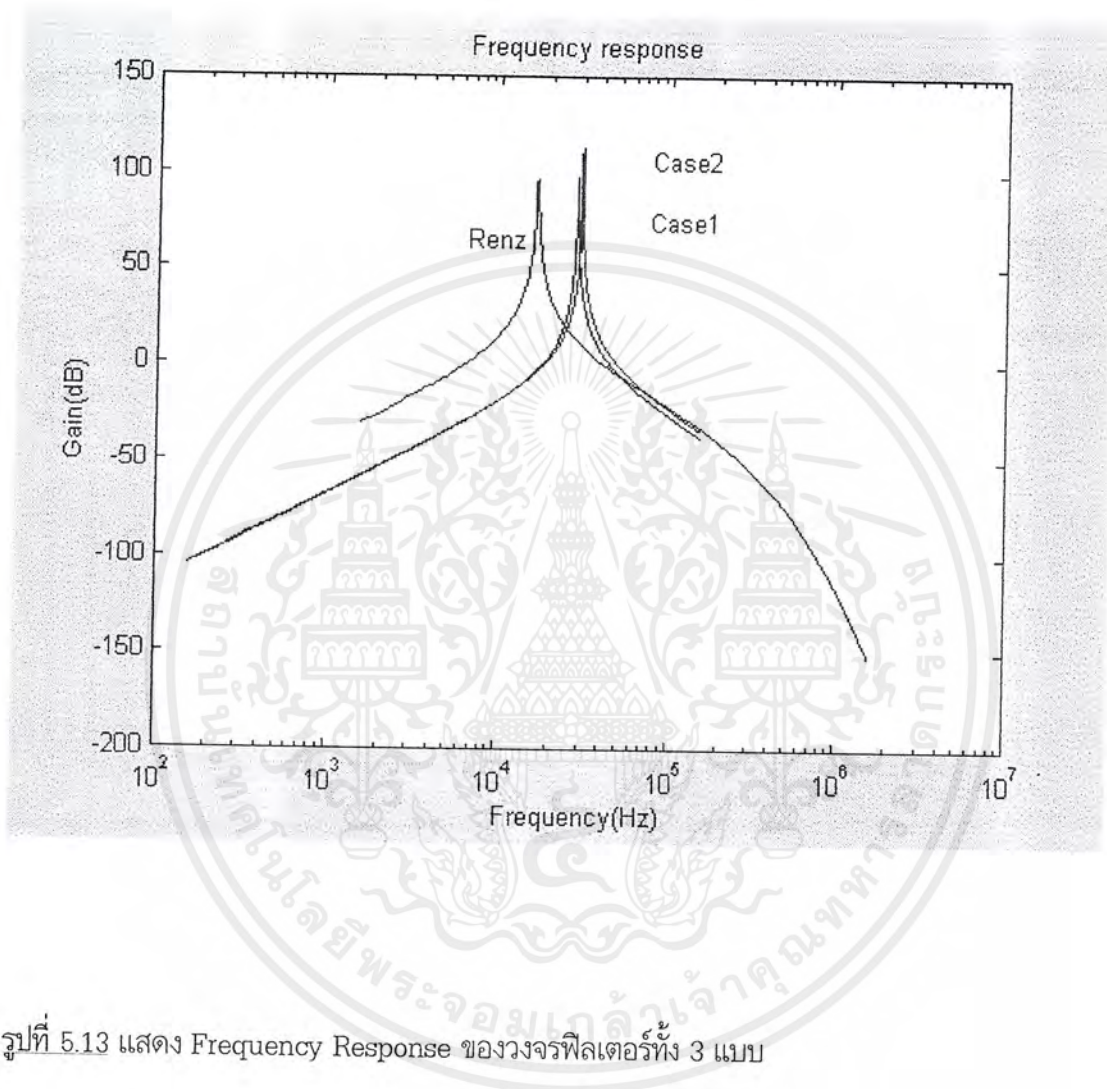
$K = 3.9$

; K คือ Gain ของวงจร (ใช้ทดลองจริง $K=4$)



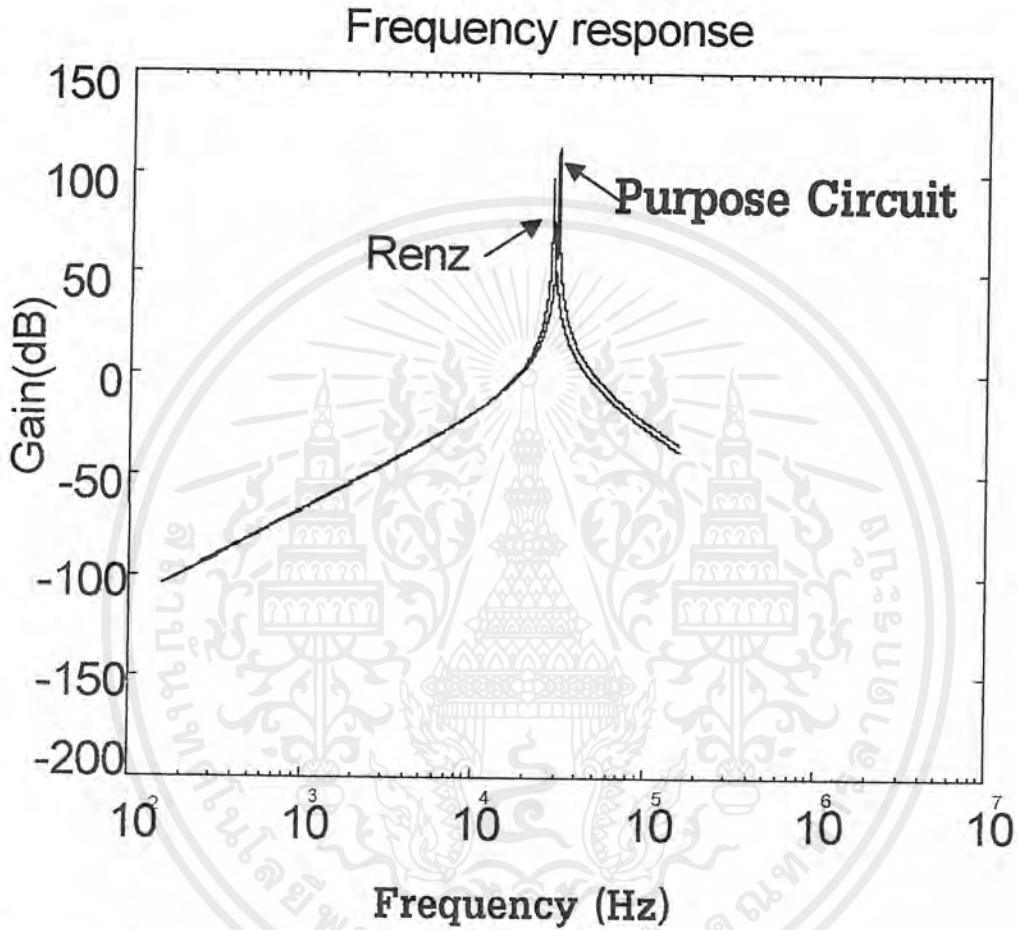
รูปที่ 5.12 แสดงผลสื่อนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่แบบ case2 (α, β) ด้วย โปรแกรม P-SPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดง Frequency Response ของวงจรฟิลเตอร์ทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดง Frequency Response ระหว่าง Renz กับ Purpose Circuit

5.4 สรุปผลจากโปรแกรม Matlab และการจำลองการทำงานด้วย P-SPICE

จากผลตอบสนองความถี่ของโปรแกรม MATLAB และการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม P-SPICE ของวงจรทั้งสามวงจร จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ออกมาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกันไปก็ตรงที่ความถี่กลาง และขนาดของสัญญาณที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาทั้งสามวงจรให้ดี ก็พบว่าวงจรรองความถี่กรณีที่ 2 จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวงจรอื่น แต่เวลาต่อวงจรจริงนั้น จำเป็นจะต้องมีการใช้บัฟเฟอร์ (Buffer) เพื่อช่วยในเรื่องเมทซิ่งอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและการทดสอบวงจรจริง

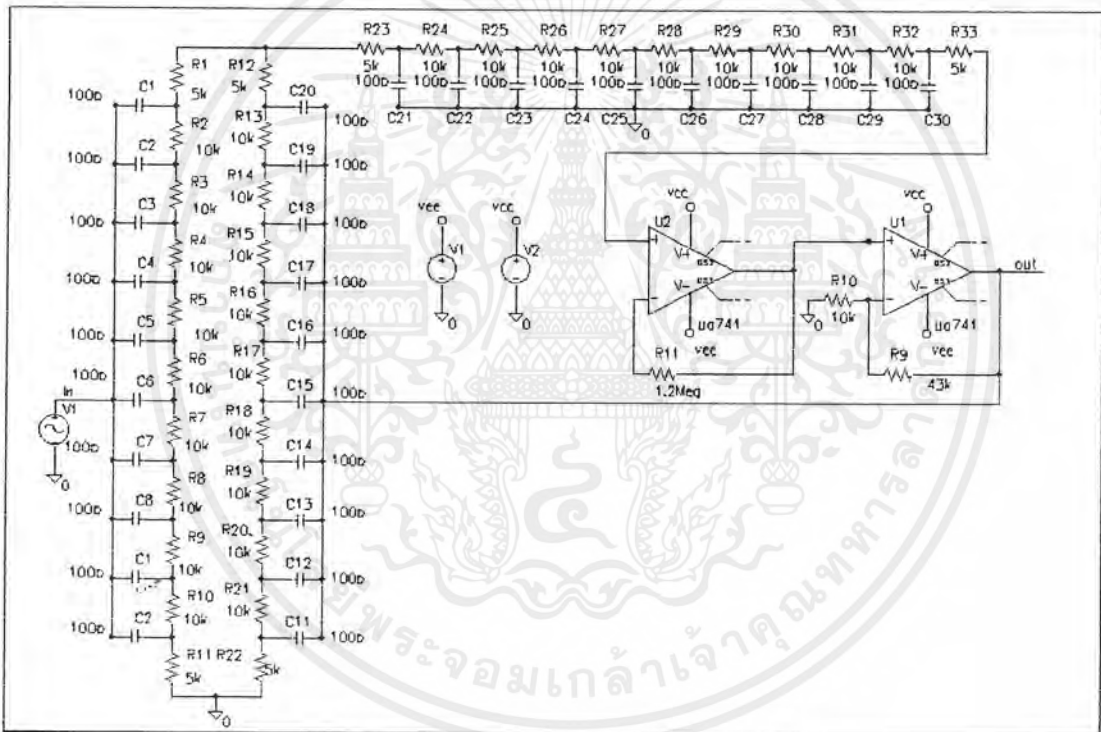
จากการคำนวณและการออกแบบวงจรกรองย่านความถี่ผ่าน ในบทที่ 5 มาแล้วในบทนี้จะนำวงจรที่ได้ออกแบบมาสร้าง และทดลองวงจรจริง ซึ่งในการทดลองนั้นจะทดสอบโดยใช้ Audio Analyser วัดผลตอบสนองความถี่ของวงจร โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการทดลองของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านของ Renz ในส่วนที่ 2 จะเป็นการทดลองของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบในกรณีที่ 1 และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดลองของวงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบในกรณีที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบวงจรจริงจะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองด้วยโปรแกรม P-SPICE



6.1 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านของเร็นท์ (Renz Band Pass Filter)

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

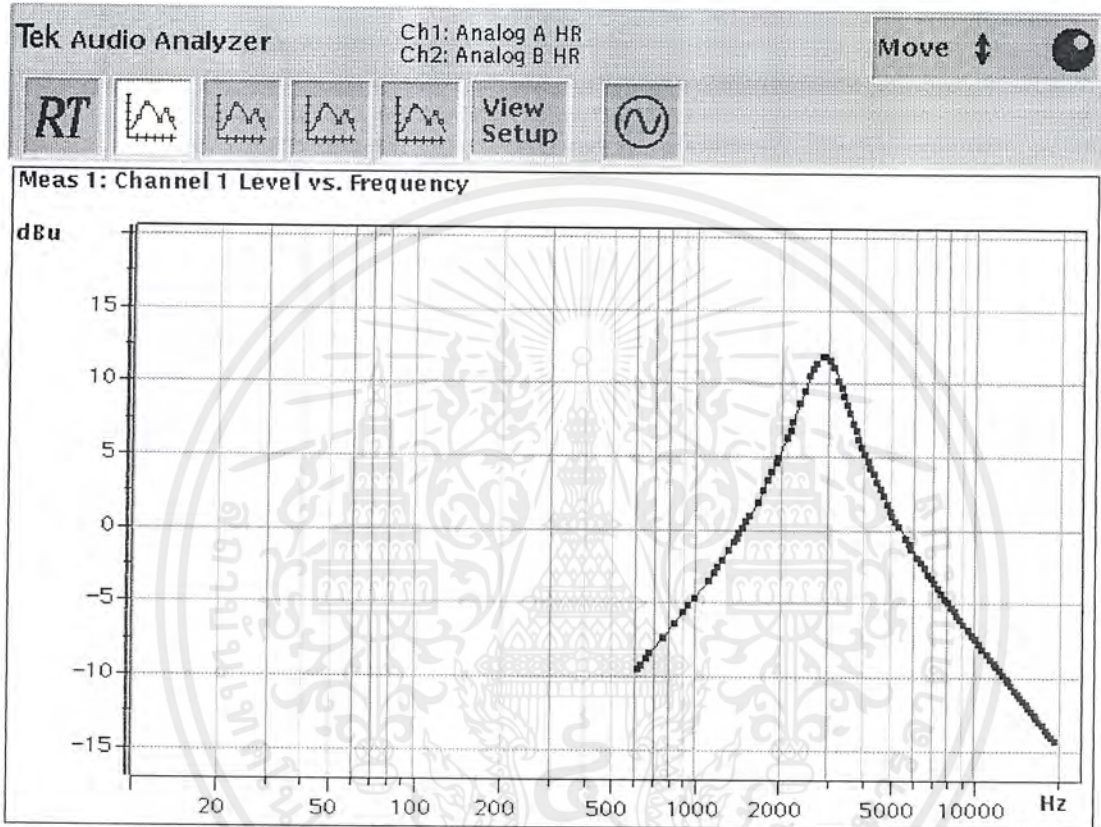
1. ต่อดังตามรูปที่ 6.1
2. บ่อนสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ(Function Generator) เข้าสู่วงจร ที่มีขนาด (Amplitude) 1Vp-p คงที่ตลอดทุกความถี่
3. วัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ โดยใช้ Audio Analyser



รูปที่ 6.1 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านของเร็นท์ (Renz Band Pass Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งก็จะได้ Frequency Response Curve ดังรูป



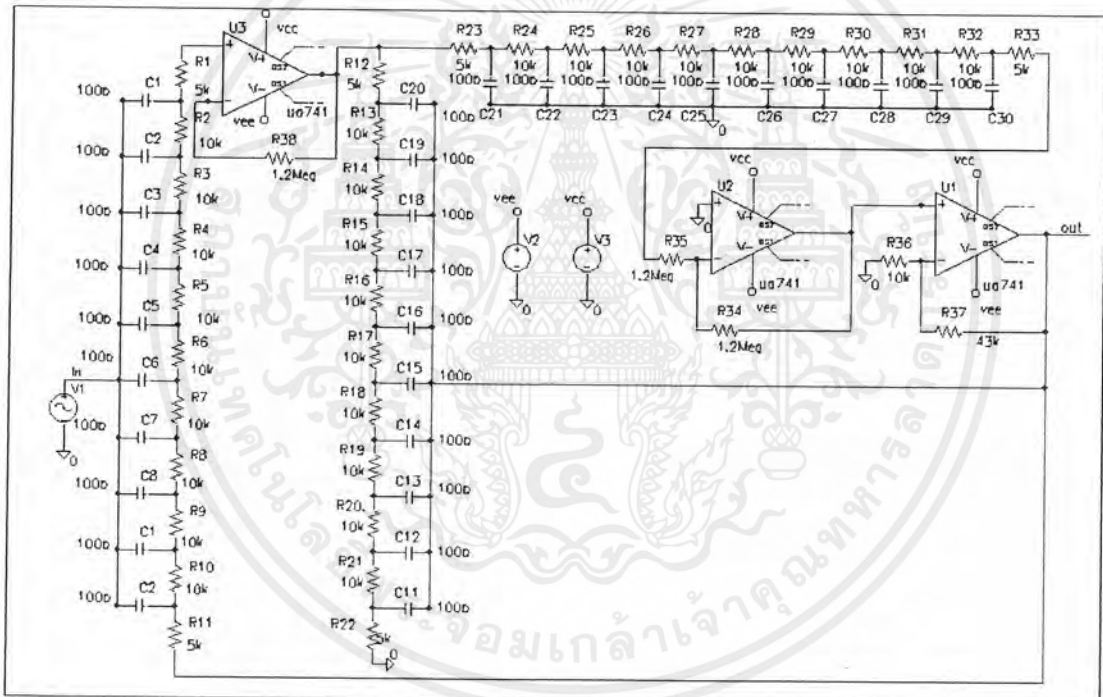
รูปที่ 6.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองย่านความถี่ผ่านของ Renz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีที่ 1 (BPF Case 1)

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

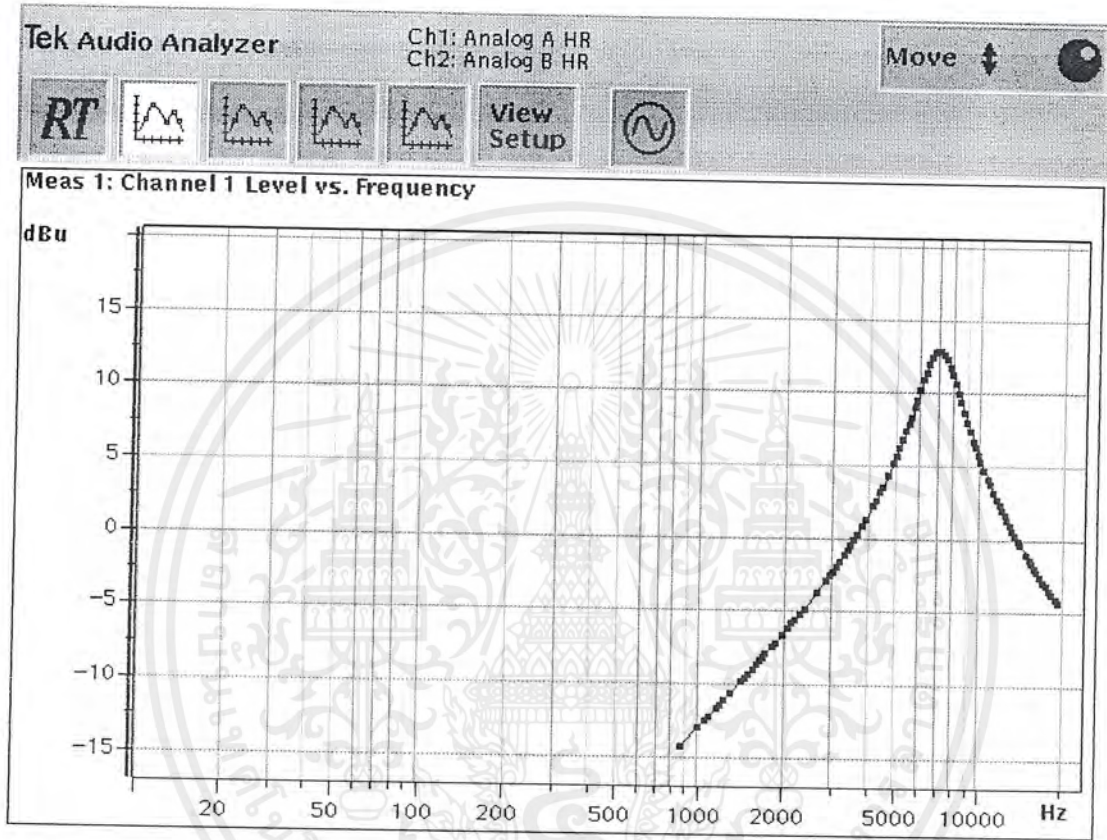
1. ต่อยังตามรูป โดยรายการอุปกรณ์ดังนี้
2. ป้อนสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ(Function Generator) เข้าสู่วงจร ที่มีขนาด (Amplitude) 1Vp-p คงที่ตลอดทุกความถี่
3. วัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ โดยใช้ Audio Analyser



รูปที่ 6.3 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีที่ 1 (BPF Case1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งก็จะได้ Frequency Response Curve ดังรูป



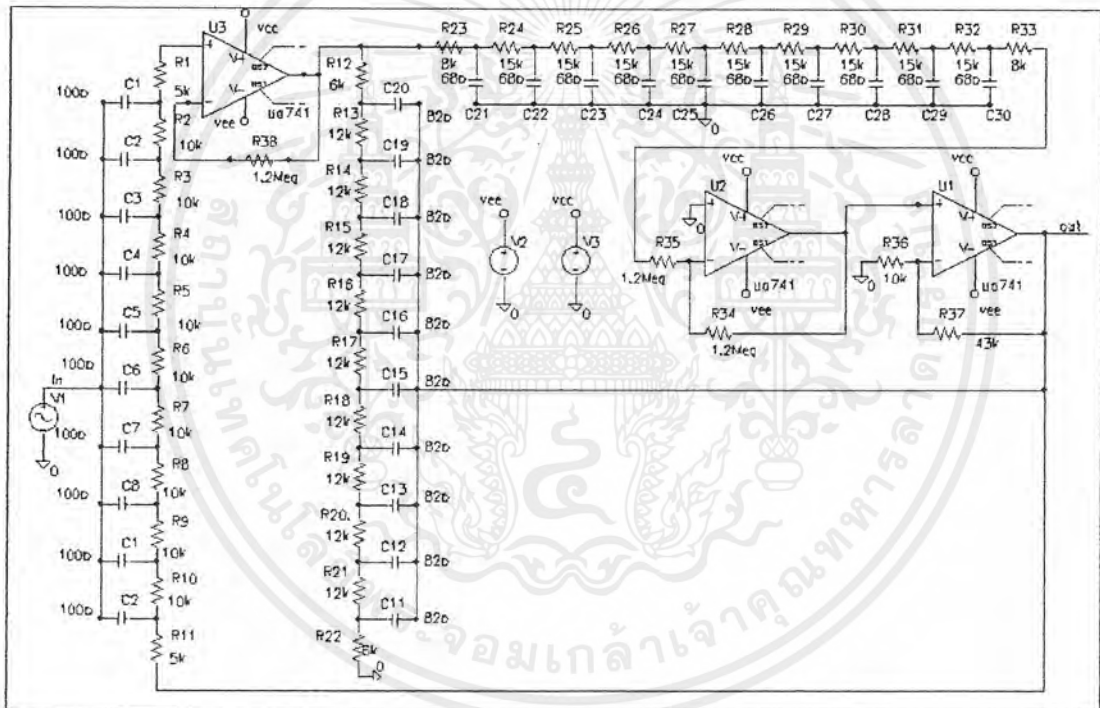
รูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีนี้ 2

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

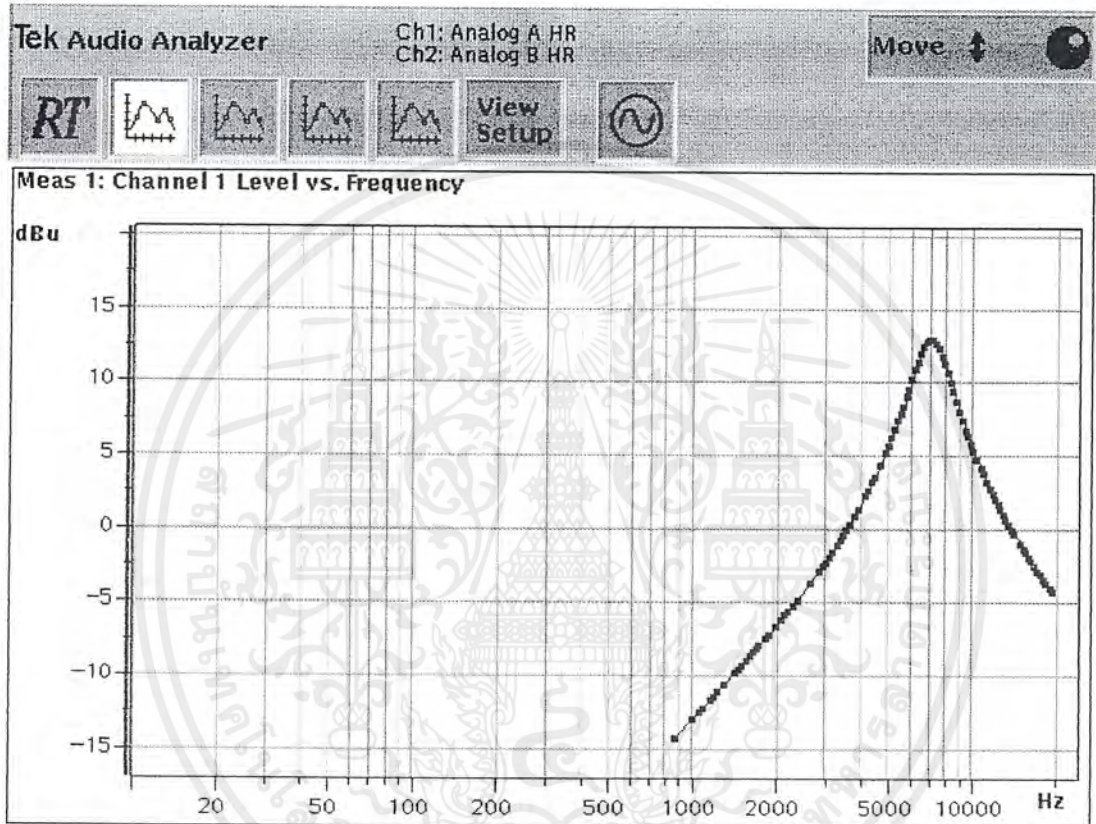
1. ต่อยวงจรตามรูป
2. ป้อนสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ(Function Generator) เข้าสู่วงจร ที่มีขนาด (Amplitude) 1Vp-p คงที่ตลอดทุกความถี่
3. วัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ โดยใช้ Audio Analyser



รูปที่ 6.5 วงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีนี้ 2 (BPF Case2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

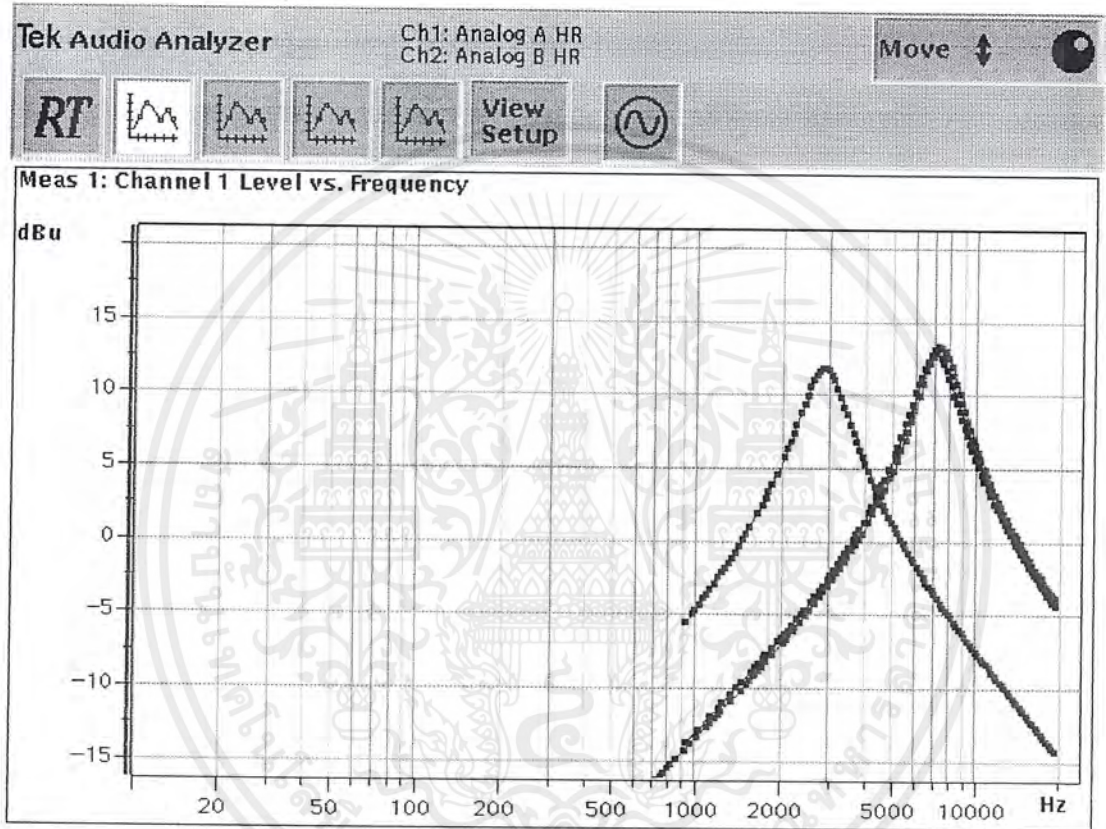
ซึ่งก็จะได้ Frequency Response Curve ดังรูป



รูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบ ในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปนี้เป็นการนำเอา Frequency Response Curve ของ 3 วงจรมารวมกัน



รูปที่ 6.7 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองย่านความถี่ผ่านของ Renz , วงจรกรองย่านความถี่ผ่านที่ออกแบบในกรณีที่ 1 และในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

ปริภูมยานิพนธ์เล่มนี้ได้เสนอการสร้างวงจรกรองสัญญาณโดยใช้ตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์ (Uniform Distributed RC, URC) ซึ่งสามารถให้การตอบสนองทางความถี่ได้ดีเช่นเดียวกับวงจรที่ใช้อุปกรณ์ประเภทลัมป์ (Lump) และได้แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณแบบเร็นท์ (Renz BPF) เปรียบเทียบกับการตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณอีก 2 แบบคือ BPF case 1, BPF case 2 ซึ่งจากผลการวิจัยที่ได้ ทั้งจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB, PSPICE SIMULATED และรวมไปถึงผลจากการทดลองต่อวงจรจริง เมื่อดูจากผลที่ได้จากทั้งหมดก็พอที่จะสรุปได้ว่าวงจรกรองสัญญาณ BPF case 1, BPF case 2 ก็มีการตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าและใช้อัตราการขยายที่ต่ำกว่าส่วนค่าความไวของวงจร (Sensitivity) ก็มีค่าที่ดีกว่า และจากทฤษฎีที่ได้เสนอไปนั้น ข้อดีของตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี คือสามารถที่จะทำเป็นวงจร LSI ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวงจรแบบลัมป์มาก ซึ่งเป็นผลดีเมื่อนำมาใช้งานเพราะมีขนาดเล็กนั่นเอง และต่อไปในอนาคตอันใกล้เราก็คงจะได้เห็นหน้าตาของวงจรกรองสัญญาณแบบใหม่ที่มีขนาดเล็กแต่เยี่ยมไปด้วยประสิทธิภาพ

ภาคผนวก
รายละเอียดของโปรแกรม

% BPF case1 stability

```
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
m=0;
w1=-200000:100:200000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
while m<3
    k=input('Insert again k= ');
    real=3.*(cosh(z).*cos(z))+2.*k.*(2-(cosh(t).*cos(t)))+1;
    imag=3.*(sinh(z).*sin(z))-2.*k.*(sinh(t).*sin(t));
    m=m+1
    if m==1
        b1=real;
        c1=imag;
    elseif m==2
        b2=real;
        c2=imag;
    else
```

```
b3=real;
c3=imag;
end
end
plot(b1,c1,'r',b2,c2,'g',b3,c3,'b');
title('Stability of case1 BPF')
xlabel('Real');
ylabel('Imag');

% BPF case2 stability

r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
bt=input('insert beta= ');
e=0;
w1=-220000:1000:220000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
while e<3
    k=input('Insert again k= ');
    real=(1+al+bt).*(cosh(z).*cos(z))+(2*k)-(2*k*al.*cosh(t).*cos(t))+(2*k*al)+1+al-bt;
    imag=(1+al+bt).*(sinh(z).*sin(z))-(2*k.*al.*sinh(t).*sin(t));
    e=e+1
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if e==1
    b1=real
    c1=imag
elseif e==2
    b2=real
    c2=imag
else
    b3=real
    c3=imag
end
end
plot(b1,c1,'r',b2,c2,'g',b3,c3,'b');
title('Stability of case2 BPF ');
xlabel('Real');
ylabel('Imag');
grid
% Renz stability

r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
e=0;
w1=-150000:100:150000;
w=w1./(2*pi);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
while e<3
    k=input('Insert again k= ');
    real=(2+al).*(cosh(z).*cos(z))-2*k.*(cosh(t).*cos(t))+2*k+2-al;
    imag=(2+al).*(sinh(z).*sin(z))-2*k.*(sinh(t).*sin(t));
    e=e+1
    if e==1
        b1=real;
        c1=imag;
    elseif e==2
        b2=real;
        c2=imag;
    else
        b3=real;
        c3=imag;
    end
end
plot(b1,c1,'r',b2,c2,'g',b3,c3,'b');
title('Stability ')
xlabel('Real');
ylabel('Imag');
grid
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% This is BPF case1 response

```
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
w1=10000:100:1000000;
w=w1/(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
e=0;
while e<3
    k=input('Insert again k= ');
    aud1=(2*k.*cosh(t).*cos(t))-(2*k)+(j.*sinh(t).*sin(t));
    aud2=(3.*cosh(z).*cos(z))+(4*k)-(2*k.*cosh(t).*cos(t))+1+(j.*(3.*sinh(z).*sin(z)-
(2*k.*sinh(t).*sin(t))));
    e=e+1
    if e==1
        b1=abs(aud1);
        c1=abs(aud2);
        a1=b1./c1;
    elseif e==2
        b2=abs(aud1);
        c2=abs(aud2);
        a2=b2./c2;
    else
        b3=abs(aud1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
c3=abs(aud2);
a3=b3./c3;
end
end
da1=20.*log(a1);
da2=20.*log(a2);
da3=20.*log(a3);
semilogx(w,da1,'r',w,da2,'g',w,da3,'b');
title('Frequency Response ');
xlabel('Frequency');
ylabel('Gain(dB)');
% This is BPF case2 response
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
bt=input('insert beta= ');
w1=10000:100:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
e=0;
while e<2
    k=input('Insert again k= ');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
aud1=2.*k.*((cosh(t).*cos(t))+j.*sinh(t).*sin(t))-1);
aud2=((1+al+bt).*((cosh(z).*cos(z))+j.*sinh(z).*sin(z)))+(2.*k.*(1-(al.*((cosh(t).*cos
(t))+j.*sinh(t).*sin(t))-1))))+(1+al-bt);
e=e+1
if e==1
    b1=abs(aud1);
    c1=abs(aud2);
    a1=b1./c1;
else
    b2=abs(aud1);
    c2=abs(aud2);
    a2=b2./c2;
end
end
da1=20.*log(a1);
da2=20.*log(a2);
semilogx(w,da1,'r',w,da2,'g');
title('Frequency response');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Gain(dB)');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% This is RENZ response

```
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al = ');
w1=10000:100:1000000;
w=w1/(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
z=(2.*t);
e=0;
while e<3
    k=input('Insert again k= ');
    aud1=(2*k.*cosh(t).*cos(t))-(2*k)+(j.*sinh(t).*sin(t));
    aud2=(2+al).*cosh(2.*t).*cos(2.*t)-(2*k.*cosh(t).*cos(t))+(2*k)+2-al+(j.*((2+al).*sinh
(2.*t).*sin(2.*t)-(2*k.*sinh(t).*sin(t))));
    e=e+1
    if e==1
        b1=abs(aud1);
        c1=abs(aud2);
        a1=b1/c1;
    elseif e==2
        b2=abs(aud1);
        c2=abs(aud2);
        a2=b2/c2;
    else
        b3=abs(aud1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
c3=abs(aud2);
a3=b3./c3;
end
end
da1=20.*log(a1);
da2=20.*log(a2);
da3=20.*log(a3);
semilogx(w,da1,'r',w,da2,'g',w,da3,'b');
title('Frequency Responce ');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Gain(dB)');

% Program Renz sensitivity compare with Gain(k)

k=input('insert k = ');
r=input('insert r = ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
w1=5000:1000:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)./2);
num=(2-al)+((2+al).*cosh(2.*t).*cos(2.*t))+j.*(2+al).*sinh(2*t).*sin(2*t));
den=(2+al).*cosh(2.*t).*cos(2.*t)-(2*k).*cosh(t).*cos(t)+(2*k)+2-al+j.*((2+al).*sinh
(2.*t).*sin(2.*t)-(2*k).*sinh(t).*sin(t)));
x=abs(num);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
y=abs(den);
max=(num./den);
semilogx(w,max);
title('Sensitivity of Renz');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');

% Program Case2 BPF compare with Gain(k)
k=input('insert k = ');
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
b=input('insert bata=');
w1=5000:1000:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
num=((1+al+b).*cosh(2*t).*cos(2*t))+(1+al-b)+(j.*(1+al+b).*sinh(2*t).*sin(2*t));
den=(1+b+al).*cosh(2.*t).*cos(2.*t)-(2*k.*al.*cosh(t).*cos(t))+(2*k)+(2*k*al)-b+1+al+
(j.*((1+al+b).*sinh(2.*t).*sin(2.*t)-(2*k.*al.*sinh(t).*sin(t))));
x=abs(num);
y=abs(den);
max=(num./den);
semilogx(w,max,'g');
title('Sensitivity of BPF Case2');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% Program case1 sensitivity compare with Gain(K)

```
k=input('insert k = ');
r=input('insert r= ');
c=input('insert c=');
al=1;
w1=5000:1000:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)./2);
num=(3.*cosh(2.*t).*cos(2.*t))+(j.*3.*sinh(2.*t).*sin(2.*t));
den=(3.*cosh(2.*t).*cos(2.*t))+(4*k)-(2*k.*cosh(t).*cos(t))+1+(j.*(3.*sinh(2.*t).*sin(2.*t)-(2*k.*sinh(t).*sin(t))));
x=abs(num);
y=abs(den);
%max=20.*log(x./y);
max=(num./den);
semilogx(w,max);
title('Sensitivity of BPF Case1');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Sensitivity of BPF C3

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
bt=input('insert bata=');
w1=100:100:1000000;
w=w1/(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=sinh(t+j.*t).*bt.*(2.*(t+j.*t).*sinh(t+j.*t).*cosh(t+j.*t)+(sinh(t+j.*t).^2))+
(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*(al+1).*((cosh(t+j.*t).^2)+(sinh(t+j.*t).^2))-k.*(al.*cosh(t+j.*t)-al-
1));
den=sinh(t+j.*t).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*cosh(t+j.*t)+k)+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
d=(num./den);
c3=(n-d)/2;
semilogx(w,c3,'g');
title('Sensitivity of C3 BPF');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnititude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Sensitivity of BPF C2

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
bt=input('insert bata=');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)./2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*((sinh(t+j.*t).^2).*(al+bt)+((cosh(t+j.*t).^2)+k))+al.*sinh
(t+j.*t).*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*(t+j.*t).*sinh(t+j.*t)-k.*cosh(t+j.*t)+k);
den=sinh(t+j.*t).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*cosh(t+j.*t)+k)+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
d=(num./den);
c2=(n-d)./2;
semilogx(w,c2,'m');
title('Sensitivity of C2 BPF');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Sensitivity of BPF C1

```
k=input('insert k=');
r=input('insert R= ');
c=input('insert C= ');
al=input('insert alpha= ');
bt=input('input Beta= ');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
num1=(t+j.*t).*sinh(t+j.*t);
den1=(cosh(t+j.*t)-1);
num=((t+j.*t).*cosh(t+j.*t)-sinh(t+j.*t)).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-
k.*cosh(t+j.*t)+k))+t+j.*t.*(sinh(t+j.*t).^2).*cosh(t+j.*t);
den=sinh(t+j.*t).*bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*cosh(t+j.*t)+k)+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
n=(num1./den1);
d=(num./den);
c1=(n-d)/2;
semilogx(w,c1,'g');
title('Sensitivity of C1 BPF');
xlabel('Frequency');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Sensitivity of BPF R3

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
bt=input('insert bata=');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)./2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(sinh(t+j.*t).^2).*((t+j.*t).*(2*bt+al+1).*cosh(t+j.*t)-bt.*sinh(t+j.*t))+
(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*((al+1).*((cosh(t+j.*t).^2)+k)-al*k.*cosh(t+j.*t));
den=sinh(t+j.*t).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*cosh(t+j.*t)+k)+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
d=(num./den);
r3=(n-d)./2;
semilogx(w,r3,'r');
title('Sensitivity of R3 BPF');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%sensitivity of BPF R2

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
bt=input('insert bata=');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*((sinh(t+j.*t).^2).*(al+bt)+((cosh(t+j.*t).^2)+k))-al.*sinh
(t+j.*t).*((cosh(t+j.*t).^2)+k.*(t+j.*t).*sinh(t+j.*t)-k.*cosh(t+j.*t)+k);
den=sinh(t+j.*t).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*cosh(t+j.*t)+k)+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
d=(num./den);
r2=(n-d)./2;
semilogx(w,r2,'r');
title('Sensitivity of R2 BPF');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%sensitivity of BPF R1

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
bt=input('insert bata=');
w1=1000:1000:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
num1=(t+j.*t).*sinh(t+j.*t);
den1=(cosh(t+j.*t)-1);
num=((t+j.*t).*cosh(t+j.*t)+sinh(t+j.*t)).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*
(cosh(t+j.*t)-1)))+(t+j.*t).*(sinh(t+j.*t).^2).*cosh(t+j.*t);
den=sinh(t+j.*t).*(bt.*(sinh(t+j.*t).^2)+al.*((cosh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1)))+(cosh
(t+j.*t).^2)+k);
n=(num1./den1);
d=(num./den);
r1=(n-d)/2;
semilogx(w,r1,'b');
title('Sensitivity of R1 BPF');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%sensitivity of renz C3

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)./2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*(2.*((cosh(t+j.*t).^2)+(sinh(t+j.*t).^2))-k.*(cosh(t+j.*t)-1))+al.*sinh(t+j.*t).*((t+j.*t).*(2.*sinh(t+j.*t).*cosh(t+j.*t))+(sinh(t+j.*t).^2));
den=sinh(t+j.*t).*(2.*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));
d=(num./den);
r3=(n-d)./2;
semilogx(w,r3,'r');
title('Sensitivity of C3 Renz');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%sensitivity of renz C2

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
w1=100:1000:20000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*(cosh(t+j.*t).^3+sinh(t+j.*t).*((t+j.*t).*sinh(t+j.*t)+cosh(t+j.*t)).*(cosh
(t+j.*t)-k)+(t+j.*t).*al.*sinh(t+j.*t).*cosh(t+j.*t)-k);
den=sinh(t+j.*t).*(2*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k*(cosh(t+j.*t)-1));
d=(num./den);
c2=(n-d)./2;
semilogx(w,c2);
title('Sensitivity of C2 Renz');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

%sensitivity of renz C1

```
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
```

```
w1=100:1000:20000000;  
w=w1./(2*pi);  
t=sqrt((w.*r.*c)/2);  
num1=(t+j.*t).*sinh(t+j.*t);  
den1=(cosh(t+j.*t)-1);  
num=(t+j.*t).*(sinh(t+j.*t).^2).*cosh(t+j.*t)+((t+j.*t).*cosh(t+j.*t)-sinh(t+j.*t)).*((cosh  
(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));  
den=sinh(t+j.*t).*(2*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));  
n=(num1./den1);  
d=(num./den);  
c1=(n-d)/2;  
semilogx(w,c1);  
title('Sensitivity of C1 Renz');  
xlabel('Frequency(Hz)');  
ylabel('Magnitude Sensitivity');  
  
%sensitivity of renz R3  
  
k=input('insert k=');  
r=input('insert r=');  
c=input('insert c=');  
al=input('insert al=');  
w1=100:1000:20000000;  
w=w1./(2*pi);  
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*(2.*(cosh(t+j.*t).^2)-(k.*cosh(t+j.*t))+k)+(sinh(t+j.*t).^2).*(2.*(t+j.*t).*cosh(t+j.*t).*(1+al)-al.*sinh(t+j.*t));
den=sinh(t+j.*t).*(2.*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));
d=(num./den);
r3=(n-d)./2;
semilogx(w,r3,'m');
title('Sensitivity of R3 Renz');
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude Sensitivity');
% sensitivity of renz R2
k=input('insert k=');
r=input('insert r=');
c=input('insert c=');
al=input('insert al=');
w1=1000:1000:1000000;
w=w1./(2*pi);
t=sqrt((w.*r.*c)/2);
n=(t+j.*t).*coth(t+j.*t);
num=(t+j.*t).*(cosh(t+j.*t).^3)+sinh(t+j.*t).*(t.*sinh(t+j.*t)-cosh(t+j.*t)).*(cosh(t+j.*t)-k)+(t+j.*t).*al.*sinh(t+j.*t).*cosh(t+j.*t)-k);
den=sinh(t+j.*t).*(2.*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));
d=(num./den);
r2=(n-d);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
semilogx(w,r2);  
title('Sensitivity of R2 Renz');  
xlabel('Frequency(Hz)');  
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

%sensitivity of renz R1

```
k=input('insert k=');  
r=input('insert r=');  
c=input('insert c=');  
al=input('insert al=');  
w1=1000:1000:5000000;  
w=w1./(2*pi);  
t=sqrt((w.*r.*c)/2);  
num1=(t+j.*t).*sinh(t+j.*t);  
den1=(cosh(t+j.*t)-1);  
num=(t+j.*t).*(sinh(t+j.*t).^2).*cosh(t+j.*t)+((t+j.*t).*cosh(t+j.*t)+sinh(t+j.*t)).*((cosh  
(t+j.*t).^2)+al*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));  
den=sinh(t+j.*t).*(2*(cosh(t+j.*t).^2)+al.*(sinh(t+j.*t).^2)-k.*(cosh(t+j.*t)-1));  
n=(num1./den1);  
d=(num./den);  
r1=(n-d)/2;  
semilogx(w,r1,'r');  
title('Sensitivity of R1 Renz');  
xlabel('Frequency(Hz)');  
ylabel('Magnitude Sensitivity');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ทนงศักดิ์ เกิดนุ่น, ไพศาล สิทธิโยภาสกุล, รศ.ดร. กนก เจนจิราพงศ์เวช, จักริ ทิมภักย์วิดิษย์, ประวิทย์ ชุมชู, "วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ฟิตสทริบิวท์อาซีอันดับ 3", วิศวกรรมสาร, หน้าที่ 48- 52, กุมภาพันธ์ 2542
2. m. Teramoto, S. Sudou and K. Janchitrapongvej, "Realization If An Active Low Pass Filter using Uniform Distributed RC Lines", IECE, CAS 89-54, October 1989.
3. M.S. Ghausi and V.G. Bello, "Active Distributed RC Realization If Low Pass Magnitude Specifications", IEEE Trans. Vol CT-16, PP. 346-358, August 1969.
4. V.G. Bello and M.S. Ghausi, "Design of Linear Pgage Active Distributed RC Networks", IEEE Trans. Circuit Theory, vol.CT-16,PP. 526-530,November 1969.
5. H. Mahdi , "on synthesis of Active Distributed RC Circuit", IEEE Trans. Circuit Theory, Vol.CT-17,PP.273-275, May 1970.
6. R.P. Sallen and E.L.Key, "A Practical method of Designing RC Active Filter", IRE Trans. Vol.CT-2,no1,PP. 74-85, March 1955.
7. G.C. Temes and S.K. Mitra, " Modern filter theory and Design",John wiley & Sons, Inc., 1973.
8. V.Valkenburg, " Analog filter Design", Holt Saunders, 1982.
9. G.C. Temes and J.W.Lapatra "Introduction to Circuit synthesis and Design", McGraw-Hill Inc., 1977.
10. R.Kennedy, "Sine Squared Pulse in Television System Analysis", RCA Review, VOL. 21,NO.2,P.253, June 1960.
11. C.A. Siocos, "Chrominance-to-Luminance Ratio and Timing Measurements", IEEE Trans., BC-14,1,PP. 1-4, March 1968.
12. A.Jeffrey, "Mathematics for Engineers and Scientists", ELBS.Nelson, 1978.
13. "Audio Handbook", National Semiconductor Corp.,PP.2.31-2.59, 1967.
14. L.P.Huelesman, "Active Filters, Lumped, Distributed, Integrated, Digital, Parametric", MCGRAW BOOK, 1970.
15. P.M. Chirlian, "Integrated and Active Network Analysis and Synthesis", Pretice-Hall, 1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. M.S. Ghauri and J.J.KELLY, "Introduction to Distributedparameter Networks", Holt Rinehart and winston, Inc., 1968.
17. B.K. Ahuja, "Implementation of Active Distributed RC Anti- Aliasing Smoothing Filters", IEEE J.Solid-Stste Circuit, VOL.SC-17,PP.1076-1080, December 1982.
18. M. Teramoto, "Active Distributed RC Line Filters", JTC-CSCC, 88-C1-2, November 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้