

การประยุกต์ใช้งานดิสทริบิวท์อาซีไลน์
APPLICATION OF DISTRIBUTED RC LINE

..... ปี แฉฉฉ ฉฉฉ
..... เกษเกษเกษ
..... ฉฉฉฉฉฉฉฉฉ

โดย

นายพีรรัตน์ วุ่นศรี
นายศักรินทร์ ศิริพันธ์
นายสุนทร จันทรสาดิต

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

หัวข้อปริญญาโท

APPLICATION OF DISTRIBUTED RC LINE

โดย

นายพิรัตน์	วุ่นศรี	35102018
นายคักรินทร์	ศิริพันธ์	35102027
นายสุนทร	จันทร์สาธิต	35102035

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์นิกร สุขตมตันติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
 อนุมัติให้รับปริญญาโท ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
 อุตสาหกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

การประยุกต์ใช้งานคาสทรอไลน์
APPLICATION OF DISTRIBUTED RC LINE

โดย	นายพิรัตน์	วุ่นศรี	35102018
	นายศักรินทร์	ศิริพันธ์	35102027
	นายสุนทร	จันทร์สาธิต	35102035

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์นิกร สุ่มตมตันติ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเอา Lumped Element ซึ่งในที่นี้ใช้ R และ C นำมาต่อเป็นรูปแบบ Distributed RC Line แล้วนำ Distributed RC Line ไปประยุกต์ใช้ต่อเป็นวงจร Active Filter 3 แบบ คือ Low Pass Filter, High Pass Filter และ Band Pass Filter การวิเคราะห์วงจรจะใช้วิธีการเปรียบเทียบ Frequency Response ที่ได้จากการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วย Computer โดยโปรแกรม Pspice ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This thesis is brought about the Lumped Element which, in this case, using R and C to form the Distributed RC Line Pattern. Then, we can adapt the Distributed RC Line to build up 3 Active Filter Patterns i.e., Low Pass Filter, High Pass Filter, and Band Pass Filter The circuit analysis uses the Frequency Response Comparison Technique which is resulted from the test and analysis of Computer by Pspice Program. We will get the similas result.

คำนำ

การศึกษาการทดลองในรายงานนี้ ได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของ URC สมการที่ใช้ในการคำนวณการนำเอา URC มาต่อเป็นวงจร LOW PASS FILTER , HIGH PASS FILTER และ BAND PASS FILTER และใช้การวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้ COMPUTER โปรแกรม Pspice ในการคำนวณและสร้างกราฟ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา PROJECT 2 หากมีข้อผิดพลาดประการใด ก็ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

กลุ่มผู้จัดทำ

27 มีนาคม 2537

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีไลน์	3
บทที่ 3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์และการออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี	5
บทที่ 4 การคำนวณ Transfer Function และ Sensitivity	23
บทที่ 5 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ	61
บทที่ 6 การออกแบบวงจรกรองความถี่สูง	78
บทที่ 7 การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	91
บทที่ 8 ผลการทดลอง	95
กิตติกรรมประกาศ	111
เอกสารอ้างอิง	112

บทที่ 1

บทนำ

ในการออกแบบวงจรเพื่อให้ได้ผลของการตอบสนองทางขนาดเป็นไปตามที่ต้องการ การออกแบบวงจรกรองความถี่ ซึ่งการสังเคราะห์วงจรนั้นอาจจะเป็นแบบ พาสซีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R, C และ L หรือแบบ แอกทีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R, C ร่วมกับ ออปแอมป์ แต่สำหรับปริญาณิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์วงจรโดยใช้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชี (Distributed RC) แทนการออกแบบวงจรที่เป็นแบบลัมด์โอลิเมนต์ (Lumped Element) ซึ่งเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชีมีคุณลักษณะทั่วไปที่ดีกว่า มีขนาดเล็กกว่า เน็ตเวิร์กแบบลัมด์อาชี โดยจะเสนอวงจรกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) วงจรกรองความถี่สูง (high pass filter) และ วงจรกรองสัญญาณแบบแถบความถี่ผ่าน (band pass filter) โดยใช้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี (Active Distributed RC) ที่มีลักษณะเป็นยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี (Uniform Distributed RC) หรือ URC โดยวงจรดังกล่าวมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำสามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็ก โดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ทำให้สามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูง

1.1 วัตถุประสงค์ของปริญาณิพนธ์

วัตถุประสงค์ของปริญาณิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อที่จะศึกษาการใช้งานของ เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชีไลน์เฟลเตอร์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ วงจรกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) วงจรกรองความถี่สูง (high pass filter) และวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (band pass filter) โดยใช้วงจรแบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี

1.2 เนื้อหาของปริญาณิพนธ์

สำหรับ เนื้อหาของปริญาณิพนธ์นั้นจะเป็นการนำเอาตัวดิสทริบิวท์อาชีไลน์เฟลเตอร์ที่เป็นชนิดยูนิฟอร์มซึ่งภายในประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัวร่วมกับออปแอมป์มาใช้ในการออกแบบวงจร โดยการทดลองนั้น จะให้การประมาณตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีด้วยโครงสร้างแบบลัมด์อาชีต่อเข้าด้วยกันประมาณ 10 เซกชั่น ซึ่งในบทที่ 2 จะเป็นการแสดงโครงสร้างของดิสทริบิวท์อาชี พารามิเตอร์ของดิสทริบิวท์อาชี โดยการเปลี่ยนสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าไปเป็นสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ ในบทที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์และการออกแบบวงจรดิสทริบิวท์อาชี ในบทที่ 4 เป็นการคำนวณค่า transfer function และ sensitivity

ในบทที่ 5 จะเป็นแนวทางการออกแบบวงจร active distributed RC แบบ low pass filter บทที่ 6 เป็นการออกแบบวงจร high pass filter และบทที่ 7 เป็นการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน band pass filter โดยใช้แอกทีฟดิสทริบิวต์อาชีและบทที่ 8 จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยคอมพิวเตอร์กับการวิเคราะห์โดยการทดลอง

สำหรับในบทสุดท้ายนั้น จะเป็นการสรุปผลการวิจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ และการทดลองตลอดจนแนวทางการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

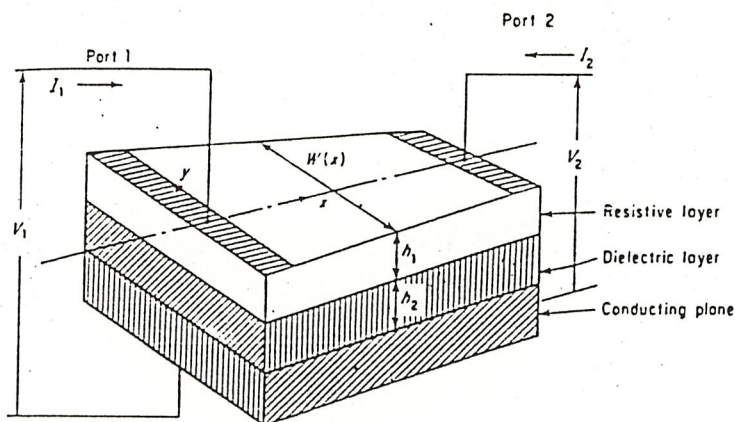
บทที่ 2

โครงสร้างและพารามิเตอร์ของยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาร์ซีไลน์

Structure and parameter of uniformly distributed RC line

ปฏิญญาฉบับนี้ ได้มีการเสนอการออกแบบวงจร ที่มีส่วนประกอบของเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาร์ซี (Distributed RC) แทนการออกแบบ วงจรที่ใช้ ลัมด์อิลิเมนต์ (Lumped Element) แบบพาสซีฟ (Passive) หรือ แบบแอคทีฟ (Active) ซึ่งปัจจุบันเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาร์ซีได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยี Thick-Film หรือ Thin-Film ในการผลิตเป็นไอซี (Integrated Circuit) โดยที่เน็ตเวิร์กแบบนี้จะมีลักษณะทั่ว ๆ ไปดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่าเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อิลิเมนต์อาร์ซีซึ่งทำให้การออกแบบวงจรเน็ตเวิร์กดิสทริบิวท์อาร์ซีสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ด้วยเหตุนี้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาร์ซีจึงถูกสร้างขึ้นมาหลายรูปแบบดังเช่น โครงสร้าง Thin-Film แบบ Multi-layer ที่มีชั้นของตัวนำ (conductor) , ความต้านทาน (Resistive) และฉนวน (Dielectrics) ประกอบติดเข้าด้วยกันโดยจะมีจุดต่อออกมาด้านข้างของชั้นความต้านทานและตัวนำ หรือมีโครงสร้างในรูปแบบที่เป็น Multi-Contacted P-N Junction ซึ่งตัวต้านทานจะใช้ส่วนประกอบของเซมิคอนดักเตอร์ และตัวเก็บประจุจะใช้ผลของไบแอสที่จังก์ชัน

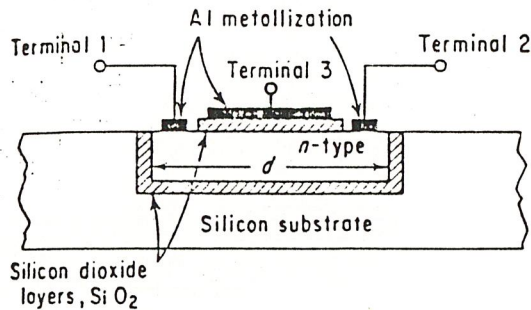
โครงสร้าง และ พารามิเตอร์ของ ดิสทริบิวท์อาร์ซี โครงสร้างแบบ 2 พอร์ทของดิสทริบิวท์อาร์ซีสามารถ แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ ส่วนบนสุดเป็นชั้นของความต้านทาน (Resistive layer) รองลงมาเป็นชั้นของฉนวน (Dielectric layer) และ ชั้นของตัวนำ (Conductive layer) โดยที่ความหนาของแต่ละชั้นนั้นประมาณ 10^{-5} นิ้ว จึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กมาก (Micro circuits) และสามารถทำให้อยู่ภายในไอซีได้ (Passive Intergrated Circuit) โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ Thin-Film หรือ โครงสร้างแบบ Monolithic



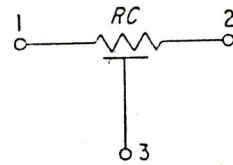
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของ 2 พอร์ทของ Distributed RC

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 จังก์ชันตัวอย่างโครงสร้างของวงจร Uniform Distributed RC ซึ่งอยู่ภายในไอซีแสดงดังรูปที่ 1.2 (a) โดยมีสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 1.2 (b)



(a) โครงสร้างของดิสทริบิวท์อาร์ซี



(b) สัญลักษณ์

รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของ Uniform Distributed RC

บทที่ 3

การวิเคราะห์พารามิเตอร์และการออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี

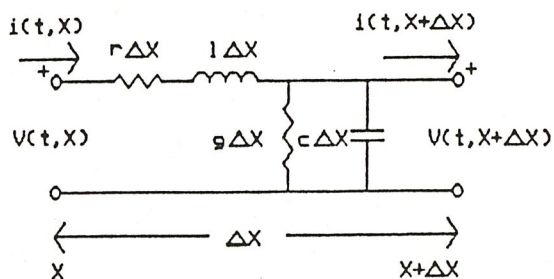
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง และการออกแบบของวงจรแอกทีฟแบบดิสทริบิวท์อาชี ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์นั้น จะช่วยในการออกแบบวงจรค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวท์อาชีนั้นใช้ หลักการเดียวกันกับของสายส่ง (Transmission Line)

ในส่วนของการออกแบบของ วงจรนั้นจะ เสนอการใช้งานของ วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter , LPF) วงจรกรองความถี่สูง (High Pass Filter , HPF) ซึ่งจะใช้ตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี (Uniformly Distributed RC Line,URC) 2 ตัวร่วมกันออกแบบ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

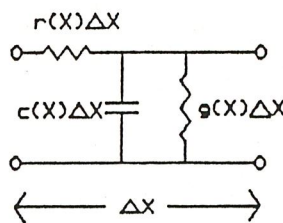
- 1 ทำการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) ด้วยโปรแกรม Pspice
- 2 ต่อวงจรการทดลองเพื่อหาการตอบสนองของดิสทริบิวท์อาชี
- 3 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้และสรุปผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวท์อาชี

จากรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างของสายส่ง (Transmission Line) ที่มีค่าพารามิเตอร์ อินдукแตนซ์ (L), คาปาซิแตนซ์ (C), รีซิสเตอร์ (R), และคอนดัคแตนซ์ σ กระจาย อยู่ตลอดความยาวสายถ้าค่า พารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีความสัมพันธ์ กับความยาวของสาย เรียกสายส่งชนิดนี้ว่าสายส่งแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Transmission Line)



(ก) โครงสร้างของสายส่ง



(ข) โครงสร้างของ Distributed RC

รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของสายส่ง และดิสทริบิวท์อาชี

จากการพิจารณา network ที่แสดงอยู่ในเทอมของสายส่งที่มีความยาวไม่เกิน x โดยใช้สมการ equilibrium equation ของวงจร โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ

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

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

ทำการหารสมการ 3.1 ด้วย Δx และ take limite ให้ Δx เข้าใกล้ศูนย์จะทำให้สมการอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\frac{\partial v(t, x)}{\partial x} = -Ri(t, x) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial i(t, x)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \quad (3.4)$$

นำสมการ 3.3 มาทำการ take laplace โดยเทียบกับเวลา

$$V(s, x) = L[v(t, x)] = \int_0^{\infty} v(t, x) e^{-st} dt \quad (3.5)$$

เราสามารถที่จะนำสมการ 3.5 มาหาอนุพันธ์ โดยเทียบกับ x

$$\begin{aligned} \frac{L[\frac{\partial v(t, x)}{\partial x}]}{\partial x} &= \int_0^{\infty} \frac{\partial v(t, x)}{\partial x} \cdot e^{-st} dt = \int_0^{\infty} \frac{\partial v(t, x)}{\partial x} e^{-st} dt \\ &= \frac{\partial V(s, x)}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.6)$$

คือการใส่เข้าอย่างมีรูปแบบเมื่อเทียบกับ x ซึ่งทราบกันดีว่าสถานะนี้ เราเรียกว่า Boundary Condition และเทียบกับ t เมื่ออยู่ในสถานะเริ่มต้น ถ้าสถานะเริ่มต้นเราสมมติให้เท่ากับศูนย์ สมการทรานส์ฟอร์ม ที่ตอบสนองสมการ (3.3) คือ

$$\frac{\partial V(s,x)}{\partial x} = -RI(s,x) \quad (3.7)$$

เราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของ Ordinary differential equation

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

และสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการของกระแส จะได้

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

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

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

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (3.9) เทียบกับ x เช่นเดียวกับ (3.10)

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

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

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

และ

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

สมการ (3.12) อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับที่สองแบบสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่

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

และคำตอบสมการคือ

$$Y = e^{j\omega t} (A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\omega_n = \frac{-a_1}{2a_0} \quad \text{และ} \quad \omega_n = \frac{\sqrt{4a_0a_2 - a_1^2}}{2a_0}$$

A, B ไม่เป็นฟังก์ชันของ x และสามารถกำหนดได้จากสมการ boundary conditions (3.12) และ (3.13), เมื่อ $a_0 = 1$, $a_1 = 0$, $a_2 = -sCR$ และ

$$\omega_n = \frac{-4sCR}{2} = j\sqrt{sCR}$$

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

$$\cos \omega_n = \cos j\sqrt{sCR} = \frac{e^{-\sqrt{sCR}} + e^{\sqrt{sCR}}}{2} = \cosh \sqrt{sCR}$$

$$\sin \omega_n = \sinh \sqrt{sCR}$$

เราสามารถทราบได้จาก

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

และ
$$I(s, x) = B_1 \cosh \sqrt{sCR} x + B_2 \sinh \sqrt{sCR} x \quad (3.15)$$

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



$$A_1 = V(s,0), \quad B_1 = I(s,0) \quad (3.16)$$

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

$$(3.14); \quad \frac{d}{dx} V(s,x) = A_1 \frac{d}{dx} \cosh \sqrt{SCR}x + A_2 \frac{d}{dx} \sinh \sqrt{SCR}x$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} V(s,0) &= \{-\sinh \sqrt{SCR}x [\sqrt{SCR} + x d \sqrt{SCR}]\}_{x=0} \\ &+ A_2 \{ \cosh \sqrt{SCR}x [\sqrt{SCR} + x d \sqrt{SCR}]\}_{x=0} \end{aligned}$$

$$-RI(s,0) = \sqrt{SCR} A_2$$

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

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

$$-SCV(s,0) = \sqrt{SCR} B_2$$

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

ในขณะที่ Z_0 คือค่า characteristic impedance ของ uniform line = R/SC อินพุตและเอาต์พุตของ two port RC line แสดงอยู่ในสมการ (3.14), (3.16) และ (3.17) แทนสมการ (3.16) และ (3.17) ลงใน (3.14)

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

$$-I(s,d) = [V(s,0) \sinh \sqrt{SCR} d] / Z_0 - I(s,0) \cosh \sqrt{SCR} d \quad (3.20)$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V(s,d) \\ -I(s,d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\sqrt{SCR} d & Z_0 \sinh\sqrt{SCR} d \\ [\sinh\sqrt{SCR} d]/Z_0 & \cosh\sqrt{SCR} d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(s,0) \\ -I(s,0) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

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 จะนำไปทำการเปลี่ยนเป็นค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ วงจรเปิด Z_{ij} และค่าแอดมิตแตนซ์ชอร์ตเซอร์กิต Y_{ij}

จากการใช้สูตรการเปลี่ยน จากตาราง 1-1

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

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

ดังนั้นพารามิเตอร์ของ UNIFORM RC LINE คือ

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

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

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

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

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

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

และ

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

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 $\cosh x$

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

สุดท้ายจะได้

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

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

$$\sqrt{SCR} = \sqrt{jwCR} ; \text{ เมื่อ } S = jw \text{ จะได้} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} (\sqrt{jwCR})^2 &= (A+jB)^2 = A^2 - B^2 + j2AB ; \text{ ให้ } A = B \\ 0 + jwCR &= A^2 - B^2 + j2AB \end{aligned}$$

เทียบสัมประสิทธิ์ ; $A^2 - B^2 = 0$

$$\text{และ } 2AB = wCR$$

$$A = wCR/2 = B \quad (3.23)$$

แทนสมการ (3.23) ลงใน $jwCR$

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

ให้ $t = wCR/2$

$$SCR = jwCR = t + jt$$

ดังนั้น

$$V_2/V_1 = 1/\cosh(t+jt) = 1/[\cosht \cdot \text{cost} + j \sinht \cdot \text{sint}] \quad (3.24)$$

ค่าสมบรณ์ (3.24) จะอยู่ในรูป

$$\left| V_2/V_1 \right| = \frac{1}{\sqrt{\cosh^2 \sqrt{wCR/2} \cdot \cos^2 \sqrt{wCR/2} + \sinh^2 \sqrt{wCR/2} \cdot \sin^2 \sqrt{wCR/2}}}$$

8 UNIFORMLY DISTRIBUTED SYSTEMS AND PASSIVE INTEGRATED CIRCUITS

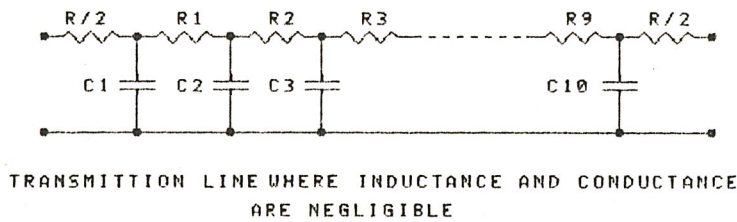
Table 1-1 CONVERSION OF TWO-PORT MATRIX PARAMETERS*

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

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

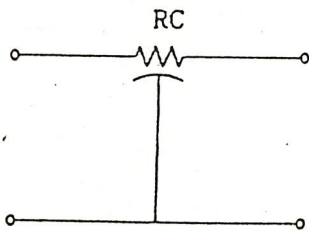
* All matrices appearing in the same row in the table are equivalent; for example, $z_{11} = A/C$. Δ is the matrix determinant; for example, $\Delta_z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$. For a reciprocal network, $z_{12} = z_{21}$, and so forth. For a symmetrical network, $z_{11} = z_{22}$, and so forth.

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างเน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ต ของ Distributed RC โดยมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของสายส่ง รูปที่ 3.1 (ก) ขณะที่ค่าของความนำ σ นั้นมีค่าน้อยมาก ๆ จนสามารถตัดทิ้งได้คือให้ค่า σ เป็นศูนย์ ก็จะได้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชี ดังในรูปที่ 3.2

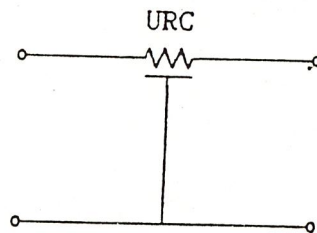


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของดิสทริบิวท์อาชีเมื่อค่าความนำ σ มีค่าน้อยมาก ๆ

ถ้าค่าของรีซิสแตนซ์ R และคาปาซิแตนซ์ C ไม่แปรเปลี่ยนไปตามความยาวของ x ก็จะเป็นแบบ Uniform Distributed RC เช่นเดียวกับสายส่งแต่ถ้าแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของ x ก็จัดเป็นแบบ Nonuniform Distributed RC โดยสัญลักษณ์ทั้งสองแบบนี้แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเส้นโค้งบ่งบอกว่า เป็นเน็ตเวิร์กแบบ Nonuniform Distributed RC ในขณะที่เส้นตรงนั้นจะเป็น เน็ตเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC (URC) ซึ่งในการวิเคราะห์และการออกแบบจะใช้เน็ตเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC Line หรือใช้ชื่อย่อว่า URC แสดงในรูปที่ 3.3 (ข)



(ก) Nonuniform

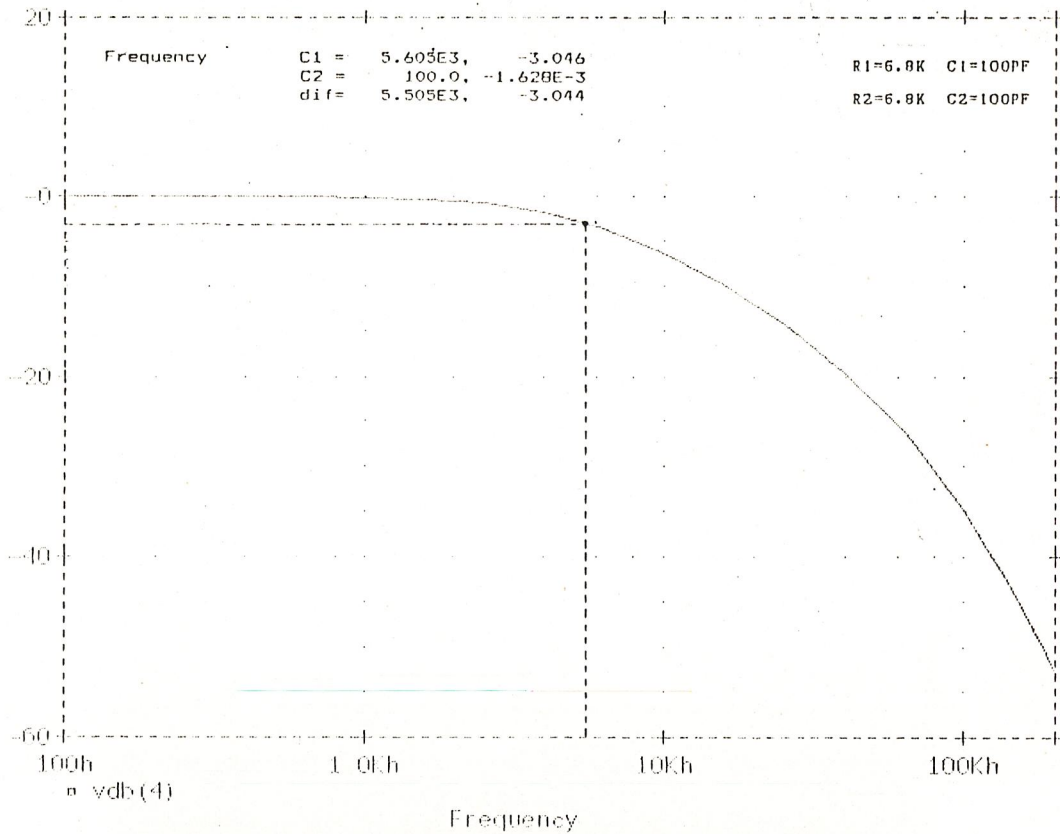


(ข) Uniform

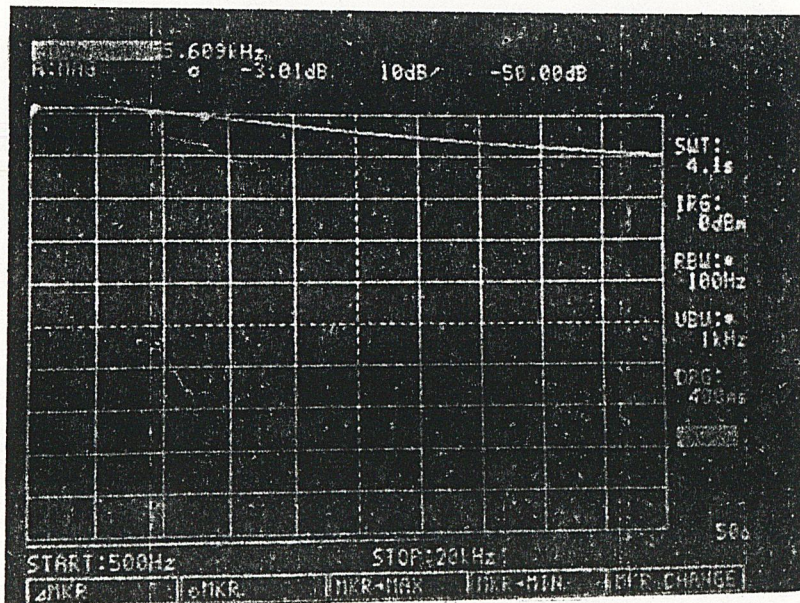
รูปที่ 3.3 แสดงสัญลักษณ์ของ Distributed RC

ผลจากการ Simulate และการทดลองวัดจากวงจรที่ประกอบขึ้นเพื่อกำหนดแอมพลิจูดของ URC

**URC1_11.CIR
Date/Time run: 03/15/94 23:29:09 Temperature: 27.0

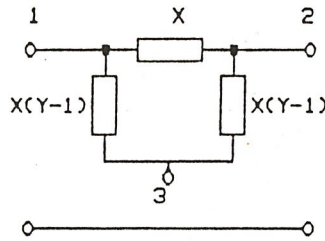
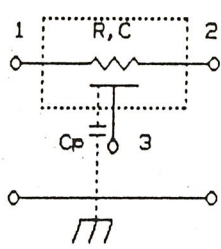


ผลจากการ Simulate ด้วยโปรแกรม Pspice



ผลที่ได้จากการทดลองวัดด้วยเครื่อง Network Analyser

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



$$X = \frac{\sqrt{SRC}}{R \sinh \sqrt{SRC}}$$

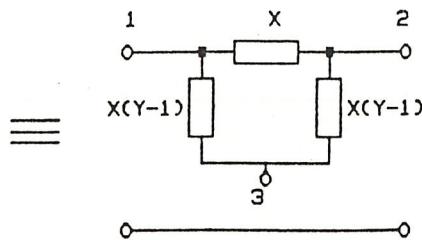
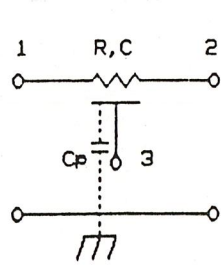
$$Y = \cosh \sqrt{SRC}$$

(ก) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า

(ข) แสดงสัญลักษณ์เพื่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 3.4 แสดงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแบบ 3 ports ของ URC

และเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์จะทำ การแปลงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า เป็นสัญลักษณ์ในทางคณิตศาสตร์ ดังในรูปที่ 3.4 (ข) และอาศัย Floating Matrix ทำการหาค่า Admittance Parameter $[Y_{i,j}]$ ของ URC



$$X = \frac{\sqrt{SRC}}{R \sinh \sqrt{SRC}}$$

$$Y = \cosh \sqrt{SRC}$$

Transfer to Mathematic Struction

รูปที่ 3.5 แสดงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี

จากเน็ตเวิร์กยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีโดยใช้ Floating Matrix ทำการหาค่า Admittance Parameter $[Y_{i,j}]$

$$\begin{bmatrix} 11 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xy & -x & -x(y-1) \\ -x & xy & -x(y-1) \\ -x(y-1) & -x(y-1) & 2X(y-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix}$$

$$= X \begin{bmatrix} Y & -1 & -(Y-1) \\ -1 & Y & -(Y-1) \\ -(Y-1) & -(Y-1) & 2(Y-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix}$$

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

(หมายเหตุ ค่า x และ Y ที่ถูกกำหนดขึ้นนี้มาจากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างแบบลัมต์อิลิเมนต์ที่เช่นเดียวกับสายส่ง) ดังนั้นจะได้ พารามิเตอร์ความนำของเน็ตเวิร์กแบบยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซี (Admittance Parameter)

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

... (1)

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

ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้หลักการดังกล่าวข้างต้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหา ค่าพารามิเตอร์เน็ตเวิร์กของ ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีแบบ 2 พอร์ต ซึ่งจะนำไปในการออกแบบวงจรในบทต่อไปได้ ดังนี้

จากรูปเมื่อแปลงสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าเป็นสัญลักษณ์เพื่อการวิเคราะห์ทางพีชคณิตแล้วอาคัยหลักการดังกล่าวจะได้

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

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

เมื่อแทนค่าของ $X = SRC / (R \sinh SRC)$ และ $Y = \cosh SRC$ จะได้ Admittance Parameter $[Y_{ij}]$

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

3.3 การออกแบบวงจรแอกทีฟที่ผลิตที่วชิท้อซี

การสังเคราะห์วงจรแอกทีฟ (Active) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยทั่วไปจะใช้ ออปแอมป์ ร่วมกับพาสซีฟอีลิเมนต์ R กับ C เราเรียกวจรดังกล่าวนี้ว่าแอกทีฟวชิท้อซี เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ วงจรพาสซีฟ (Passive) ซึ่งใช้อีลิเมนต์ R, C และ L แล้ว จะเห็นได้ว่าวงจรแอกทีฟวชิท้อซี มีข้อดีที่ว่า มีน้ำหนักน้อย ไม่ต้องการพื้นที่มาก และสามารถทำเป็นรูปแบบย่อเล็ก ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีของ Integrated Circuit เมื่อทำเป็น Mass-Product แล้วราคาก็ไม่แพงมีขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งวงจรที่มี Inductor (L) ยังต้องทำเป็น Discrete Component ที่ราคายังแพง เมื่อใช้แอกทีฟวชิท้อซี เช่น วงจรแบบ Sallen and Key ในการสร้างวงจรกรองความถี่ ถ้าหากนำไปผลิตเป็นไอซีแบบ LSI ที่มีขนาดเล็ก ผลของ Parasitic Capacitors ระหว่างตัวความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) กับ Substrate ของ ไอซี อาจมีผลทำให้คุณลักษณะของวงจรเปลี่ยนแปลงไป จากที่กล่าวมาแล้วในบทนี้จะเสนอวิธีการ

ออกแบบ วงจรรองความถี่ต่ำ วงจรรองความถี่สูง และวงจรรองแถบความถี่ผ่าน โดยใช้ ออปแอมป์ ร่วมกับยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซี 2 ตัว ซึ่งเรียกววงจรแบบนี้ว่า วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี (Active Distributed RC) โดย วงจรที่ออกแบบได้นี้ นอกจากจะมีข้อดีเหมือนวงจรแอกทีฟอาซีแล้วยังมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ดี สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็กโดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาซีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูง นอกจากนี้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีที่ออกแบบได้นี้ยังมีค่าพารามิเตอร์ α ซึ่งสามารถกำหนด ค่าของผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาหาค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบได้

3.4 ความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity)

การออกแบบวงจรใด ๆ จะต้องพิจารณาถึงค่าอิลิเมนต์แต่ละตัว เพราะค่าอิลิเมนต์ที่ใช้งานจริง ๆ แล้วจะไม่มีค่าตรงตามอุดมคติ ค่าผิดพลาดที่ได้เกิดจากผลรวมของความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่เกิดจากกรรมวิธีในการผลิตเอง และคุณลักษณะทางโครงสร้างของอิลิเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น อดหมิมของห้อง, ความชื้น, ความเข้ม ของแสงสว่างและ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ เหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของอิลิเมนต์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่อาจเปลี่ยนแปลงไม่ตรงตามทีคำนวณ

เซ็นซิวิตีตีเป็นค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่เอาต์พุทของวงจรซึ่งเป็นผลมาจากการแปรผันของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวต้านทาน (Resistor), ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor), ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor), ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ และค่าอัตราขยายของ ออปแอมป์ (Operation Amplifier) ซึ่งแน่นอนว่าวงจรที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซ็นซิวิตีตีมากจะมีการแปรผันของพารามิเตอร์ภายในวงจรมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองทางด้าน เอาต์พุทเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ฉะนั้นโครงสร้างของวงจรที่ดีจึงควรมีค่าเซ็นซิวิตีตีของอิลิเมนต์แต่ละตัวต่ำจะทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและยังไม่ต้องเลือกใช้ค่าของอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

การหาเซ็นซิวิตีตีในวงจร หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ในวงจร โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้

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

เมื่อ x_i แทนค่าของอิมพีแดนซ์แต่ละตัวในวงจร
ถ้าแทน s ด้วย $j\omega$ ทราซเฟอว์ฟังก์ชัน $T(s)$ จะได้

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

แทนค่าสมการ (3.36) ลงในสมการ (3.35) ค่าฟังก์ชันของเฟสที่วัดได้ สามารถเขียนได้เป็น

$$S_{x_i}^{T(j\omega)} = \frac{x_i}{|T(j\omega)| e^{j\theta(\omega)}} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(|T(j\omega)| e^{j\theta(\omega)} \right) \quad \dots (3.37)$$

จากสมการ (3.37) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามารถเขียนเป็นจำนวนเชิงซ้อนได้คือ

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

จากสมการ (3.38) จะได้ว่า

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

$$S_{x_1}^{\theta(\omega)} = \frac{1}{\theta(\omega)} \operatorname{Im} S_{x_1}^{T(j\omega)} \quad \dots (3.40)$$

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

$$\begin{aligned} S_{x_1}^{|T(j\omega)|} &= \operatorname{Re} \left(\frac{x_1}{T(s)} \cdot \frac{\partial}{\partial x_1} T(s) \right) \\ &= \operatorname{Re} \left(x_1 \left(\frac{N'(s)}{N(s)} - \frac{D'(s)}{D(s)} \right) \right) \end{aligned}$$

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

$D(s)$ เป็นโพลีโนเมียลส่วนของ $T(s)$

บทที่ 4

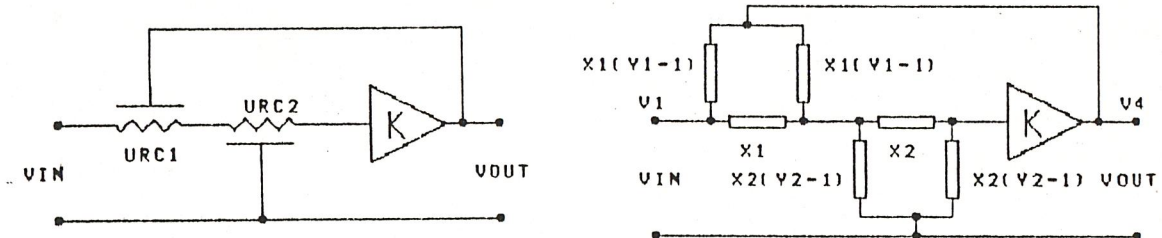
การคำนวณ Transfer Function และ Sensitivity

4.1 การคำนวณ Transfer Function

ในบทนี้จะเป็วิธีการคำนวณค่า Transfer Function และค่า Sensitivity ของ วงจรกรองความถี่สูง (High Pass Filter), วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) และวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2 การคำนวณ Transfer Function ของวงจร Low Pass Filter ซึ่งมี 3 รูปแบบดังนี้

4.2.1 รูปแบบที่ 1 Active Distributed RC Anti-Aliasing/Smoothing Filter ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1

สามารถคำนวณค่า Transfer Function ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 & 0 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ -X_1 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_2 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ 0 & -X_2 & X_2 Y_2 & 0 \\ -X_1 (Y_1 - 1) & -X_1 (Y_1 - 1) & 0 & 2X_1 (Y_1 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

เขียน Matrix ใหม่ โดยนำค่า K มา พิจารณาด้วย

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ -X_1 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_2 - X_1 (Y_1 - 1) \\ 0 & -X_2 & \frac{X_2 Y_2}{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

คำนวณค่า Transfer function จาก

$$T(S) = \frac{V_4}{V_1} \quad ; \quad V_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta} \quad \text{และ} \quad V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$$

$$\therefore \frac{V_4}{V_1} = \frac{\Delta_4}{\Delta_1}$$

$$\Delta_4 = I_1 X_1 X_2$$

$$\Delta_1 = I_1 X_1 X_2 \begin{bmatrix} \frac{X_2 Y_2}{K} + \frac{Y_1 Y_2}{X_1 X_2} - (Y_1 - 1) - \frac{X_2}{X_1} \\ K X_1 & K & K X_1 \end{bmatrix}$$

$$T(S) = \frac{\Delta_4}{\Delta_1} = \frac{I_1 X_1 X_2}{I_1 X_1 X_2 \begin{bmatrix} \frac{X_2 Y_2}{K} + \frac{Y_1 Y_2}{X_1 X_2} - (Y_1 - 1) - \frac{X_2}{X_1} \\ K X_1 & K & K X_1 \end{bmatrix}}$$

$$= \frac{X_2 (X_1 Y_1 + X_2 Y_2) - X_2 - K X_1 (Y_1 - 1)}{K X_1}$$

เมื่อ $X_i = \frac{1}{s} \sinh Pi$ และ $Y_i = \cosh Pi$

RisinhPi

$$T(S) = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} \cdot K.$$

$$\left[\frac{P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1 \quad R_2 \sinh P_2} \right] \frac{\cosh P_2 - P_2}{R_2 \sinh P_2} - \frac{K P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}$$

หรือ $T(S) = \frac{K \sinh P_2}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}$; $K=1$ (2)

$$\frac{\sqrt{R_2 C_1}}$$

พิจารณาเมื่อค่า Time constant เท่ากัน

$$R_1 C_1 = R_2 C_2, \quad \alpha = \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2}$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของวงจรมหา

$$P_1 = \sqrt{S C_1 R_1} \quad ; \quad P_2 = \sqrt{S C_2 R_2} \quad \text{และ} \quad S = j\omega$$

พิจารณาเมื่อกำหนดให้ค่า Time Constant เท่ากันคือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$

กำหนดให้ $\frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \alpha$ และ $P_1 = P_2 = P$

ดังนั้นจะลดรูปสมการ (3) ได้เป็น

$$T(S) = \frac{K}{\left[\begin{array}{c} 1+R_1 - K \\ R_2 \end{array} \right] \cosh P + \left[\begin{array}{c} 1-R_1 \\ R_2 \end{array} \right] K} \quad (5)$$

$$= \frac{K}{\left[\begin{array}{c} 1+1 - K \\ \alpha \end{array} \right] \cosh P + \left[\begin{array}{c} 1-1 \\ \alpha \end{array} \right] K}$$

กรณีที่ 1 Unity gain Amplifier ; $K=1$

เมื่อกำหนด $K=1$ จากสมการ 5 จะได้

$$T(S) = \frac{1}{\frac{R_1 (\cosh P - 1 + R_2)}{R_2 R_1}}$$

$$= \frac{1}{\alpha (\cosh P - 1 + \alpha)}$$

กรณีที่ 2 $K=\alpha$

เมื่อกำหนด $K=\alpha$ จะได้

$$T(S) = \frac{-1}{\cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}}$$

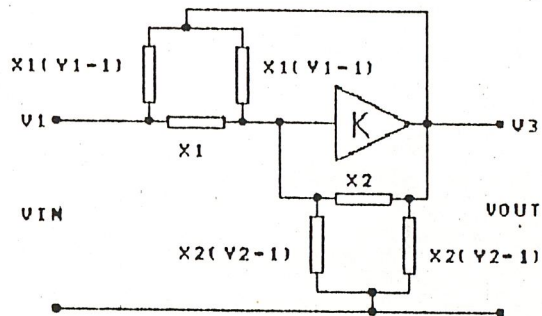
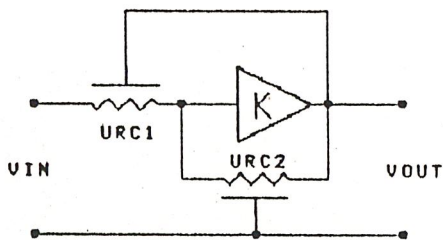
กรณีนี้ single distributed RC line ($R_2 = \alpha; C_2 = 0$)

K

$T(S) = \frac{\quad}{\quad}$

$$(1-K) \begin{bmatrix} \cosh P + \frac{K}{1-K} \\ 1-K \end{bmatrix}$$

4.2.2 รูปแบบที่ 2 เป็น Low Pass Filter ซึ่งมี 2 Feed Back Loop ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ -X_1 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_2 - X_1 Y_1 + X_1 \\ -X_1 (Y_1 - 1) & -X_2 - X_1 Y_1 + X_1 & 2X_1 (Y_1 - 1) + X_2 Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

เขียน Matrix ใหม่ โดยพิจารณาค่า K ด้วย

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 - X_1 (Y_1 - 1) \\ & K \\ -X_1 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 - X_2 - X_1 Y_1 + X_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

K

คำนวณค่า Transfer function

$$T(S) = \frac{V_a}{V_1} ; V_a = \frac{\Delta_a}{\Delta} , V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$$

$$\Delta_a = I_1 X_1$$

$$\Delta_1 = I_1 \left[\frac{X_1 Y_1 + X_2 Y_2}{K} - X_2 - X_1 Y_1 + 1 \right]$$

$$T(S) = \frac{\Delta_a}{\Delta_1} = \frac{X_1}{\dots}$$

$$\frac{1}{K} (X_1 Y_1 + X_2 Y_2) - X_2 - X_1 Y_1 + 1$$

เมื่อ $X_i = \frac{P_i}{R_i \sinh P_i}$, $X_1 = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}$, $X_2 = \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}$

และ $Y_i = \cosh P_i$, $Y_1 = \cosh P_1$, $Y_2 = \cosh P_2$

$$\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}$$

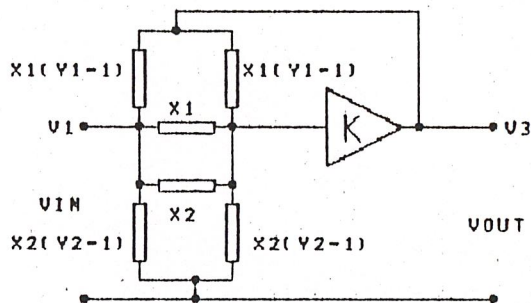
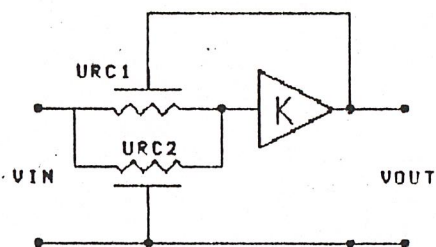
$$T(S) = \dots (3)$$

$$\frac{1}{K} \left[\frac{P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1 \quad R_2 \sinh P_2} - \frac{P_1 \cosh P_1 + P_1 - P_2}{R_1 \sinh P_1 \quad R_1 \sinh P_1 \quad R_2 \sinh P_2} \right]$$

หรือ

$$T(s) = \frac{\sinh P_2}{\sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2} \text{ โดย } K=1 (4)$$

4.2.3 รูปแบที่ 3 แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_1 - X_2 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ -X_1 - X_2 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_1 (Y_1 - 1) \\ -X_1 (Y_1 - 1) & -X_1 (Y_1 - 1) & 2X_1 (Y_1 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

ลดรูป Matrix โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของ K

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 + X_2 Y_2 & -X_1 - X_2 - X_1 (Y_1 - 1) \\ & K \\ -X_1 - X_2 & X_1 Y_1 + X_2 Y_2 - X_1 (Y_1 - 1) \\ & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

คำนวณค่า Transfer function จาก

$$T(S) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_3}{V_1} ; \text{โดยที่ } V_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} \text{ และ } V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{V_3}{V_1} = \frac{\Delta_3}{\Delta_1}$$

$$\Delta_3 = I_1 (X_1 + X_2)$$

$$\Delta_1 = \frac{I_1 (X_1 Y_1 + X_2 Y_2) - X_1 (Y_1 - 1)}{K}$$

$$T(S) = \frac{\Delta_3}{\Delta_1} = \frac{X_1 + X_2}{\frac{1}{K} \left[X_1 Y_1 + X_2 Y_2 - X_1 (Y_1 - 1) \right]}$$

$$\text{เมื่อ } X_1 = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} \quad \therefore \quad X_2 = \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2} \quad ; \quad X_2 = \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}$$

ดังนั้น

$$T(S) = \frac{\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}}{R_1 \sinh P_1 + R_2 \sinh P_2}$$

(6)

$$\frac{1}{K} \left[\frac{P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1} \quad \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right] - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}$$

$$\text{หรือ } T(S) = \frac{\sinh P_2 + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1}{\sqrt{R_2 C_1}} \quad ; [K=1] \quad (7)$$

$$\frac{\sinh P_2 + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 \cosh P_2}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของวงจรมายาย

$$P_1 = \sqrt{SC_2 R_1} \quad ; \quad P_2 = \sqrt{SC_2 R_2} \quad \text{และ } S = j\omega.$$

พิจารณาเมื่อกำหนดให้ค่า Time Constant เท่ากัน คือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$
กำหนด $R_2/R_1 = C_1/C_2 = \alpha$ และ $P_1 = P_2 = P$
ดังนั้นสามารถลดรูปสมการ (6) ได้เป็น

$$T(S) = \frac{1 + R_1}{R_2} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{K} \left[\begin{array}{c} 1 + R_1 - K \\ \hline R_2 \end{array} \right] \cosh P + 1$$

$$= \frac{1}{K} \left[\begin{array}{c} 1 + \frac{1}{\alpha} - K \\ \hline \alpha \end{array} \right] \cosh P + 1$$

จากสมการ (8) กำหนดให้อัตราขยาย $K=1$ (unity gain Amplifier) จะได้ Transfer function ดังนี้

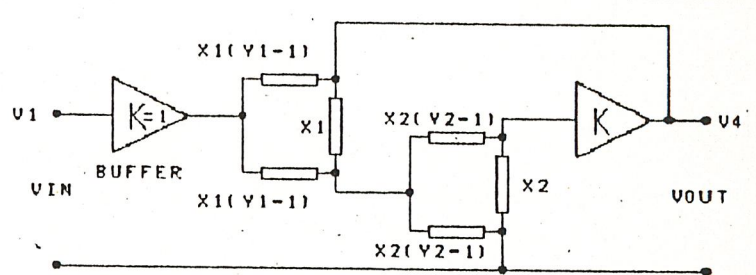
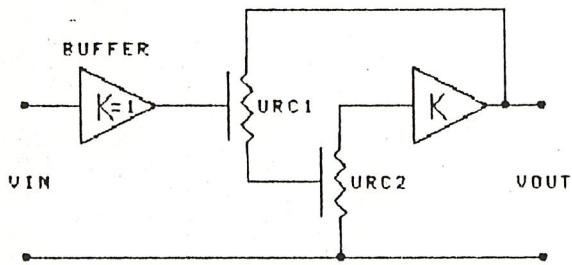
$$T(S) = \frac{\alpha + 1}{\cosh P + \alpha} \tag{9}$$

จากสมการที่ (9) ถ้าให้ $K=\alpha$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(S) = \frac{\alpha + 1}{-\alpha \cosh P + \alpha}$$

4.3 การคำนวณ Transfer Function ของวงจร High Pass Filter แสดงไว้ 3 รูปแบบดังนี้

4.3.1 รูปแบบที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & 0 & -X_1(Y_1-1) \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1+2X_2(Y_2-1) & -X_2(Y_2-1) & -X_1 \\ 0 & 0 & -X_2(Y_2-1) & X_2Y_2 \\ -X_1(Y_1-1) & -X_1 & 0 & X_1Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

ลดรูป Matrix โดยพิจารณา ความสัมพันธ์ของ K

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1+2X_2(Y_2-1) & -X_2(Y_2-1)-X_1 \\ 0 & 0 & -X_2(Y_2-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

K
K

คำนวณค่า Transfer function จาก

$$T(S) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_4}{V_1} ; \text{ โดยที่ } V_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta} ; V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{V_4}{V_1} = \frac{\Delta_4}{\Delta_1}$$

$$\Delta_4 = I_1 X_1 X_2 (Y_1-1)(Y_2-1)$$

$$\Delta_1 = I_1 X_1 X_2 (Y_2-1) \left[\frac{X_1 Y_1 Y_2 + 2X_2 Y_2 (Y_2-1) - X_2 (Y_2-1)^2 - K X_1 (Y_2-1)}{K X_1 (Y_2-1)} \right]$$

$$T(S) = \frac{K(Y_1-1)(Y_2-1)}{Y_1 Y_2 + R_1(Y_2^2-1) - K(Y_2-1)}$$

$$\text{เมื่อ } X_i = \frac{P_i}{R_i \sinh P_i} \quad \therefore X_1 = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} ; X_2 = \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}$$

$$Y_i = \cosh P_i \quad \therefore Y_1 = \cosh P_1 ; Y_2 = \cosh P_2$$

สามารถเขียน Transfer function ใหม่ได้ ดังนี้

$$T(S) = \frac{K(\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 + R_1(\cosh^2 P_2) - K(\cosh P_2 - 1)} \quad (10)$$

$$\cosh P_1 \cosh P_2 + R_1(\cosh^2 P_2) - K(\cosh P_2 - 1)$$

เมื่อ K คืออัตราขยายของวงจรมายาย
หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$T(S) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)} \quad (11)$$

$$\frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

$$P_1 = \sqrt{SC_1 R_1} \quad ; \quad P_2 = \sqrt{SC_2 R_2} \quad ; \quad S = j\omega$$

พิจารณาเมื่อกำหนดให้ค่า Time Constant เท่ากัน คือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$

$$\text{กำหนดให้ } \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \alpha \text{ และ } P_1 = P_2 = P$$

ดังนั้นสามารถลดรูปสมการที่ (10) ได้ดังนี้

$$T(S) = \frac{K(Y-1)^2}{Y^2 \frac{(1+1) - KY + K - 1}{\alpha}} \quad (12)$$

กำหนดให้ $P_1 = P_2 = P$ จากสมการ (1) เราสามารถลดรูปได้เป็น

$$T(S) = \frac{K}{(1+\frac{R_1}{R_2}) Y_2^2 - \frac{R_1}{R_2} - K(Y_1 - 1)}$$

$$= \frac{K}{(1+1) Y_2^2 - \frac{1}{\alpha} - K(Y_1 - 1)} = \frac{K}{(1+1) \cosh^2 P - \frac{1}{\alpha} - K(\cosh P - 1)}$$

พิจารณาเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 Unity gain Amplifier

เมื่อกำหนดให้ $K=1$ จะได้ว่า

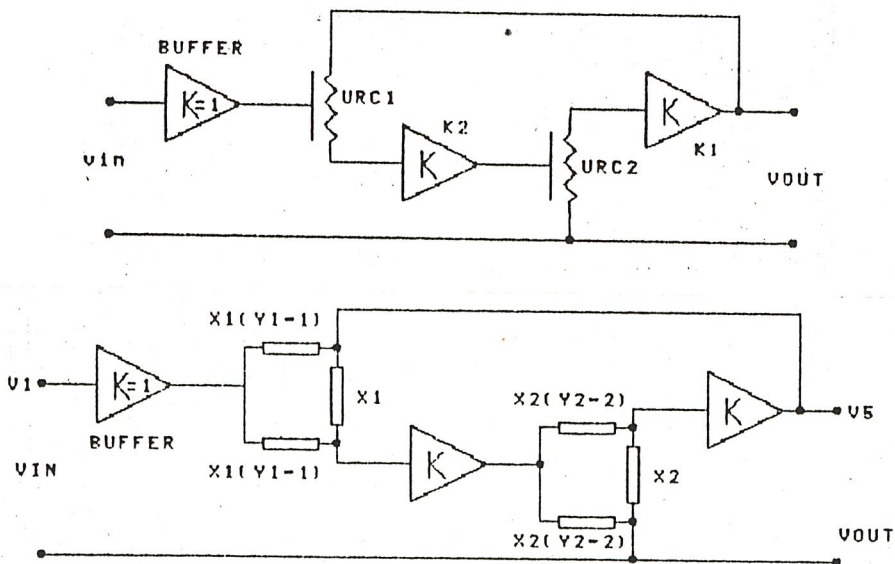
$$T(S) = \frac{1}{(1+1)\cosh^2 P - \cosh P + 1 - 1}$$

กรณีที่ 2 Utilize of same time constant URC

กำหนดให้ $\alpha = C_1 = C_2 = R_1 = R_2 = 1$ จะได้ว่า

$$T(S) = \frac{K}{2\cosh^2 P - K(\cosh P - 1) - 1}$$

4.3:2 รูปแบบที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & 0 & 0 & -X_1(Y_1-1) \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1 & 0 & 0 & -X_1 \\ 0 & 0 & X_2(Y_2-1) & -X_2(Y_2-1) & 0 \\ 0 & 0 & -X_2(Y_2-1) & X_2Y_2 & 0 \\ -X_1(Y_1-1) & -X_1 & 0 & 0 & X_1Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์ของ $K_1 = V_5$ และ $K_2 = V_3$ เราสามารถลดรูป Matrix ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) \\ & X_2 & \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1 & -X_1 \\ & X_2 & \\ 0 & -X_2(Y_2-1) & X_2Y_2 \\ & & K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \\ V_5 \end{bmatrix}$$

คำนวณค่า Transfer function

$$T(S) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_5}{V_1} = \frac{\Delta_5}{\Delta_1}$$

$$\Delta_5 = I_1 X_1 X_2 (Y_1 - 1)(Y_2 - 1)$$

$$\Delta_1 = I_1 X_1 X_2 \left[\frac{Y_1 Y_2 - K_1 K_2 (Y_2 - 1)}{(Y_2 - 1) K_1 K_2} \right]$$

$$T(S) = \frac{K_1 K_2 (Y_1 - 1)(Y_2 - 1)}{Y_1 Y_2 - K_1 K_2 (Y_2 - 1)}$$

แทนค่า $Y_1 = \cosh P_1$; $Y_2 = \cosh P_2$

$$T(S) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)}$$

(13)

เมื่อ K_1 คือ อัตราขยายของวงจรมายที่ 1
 K_2 คือ อัตราขยายของวงจรมายที่ 2

กรณีค่า Time Constant มีค่าเท่ากัน คือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$

กำหนด $R_2 = C_1 = \alpha$ และ $P_1 = P_2 = P$

$$R_1 \quad C_2$$

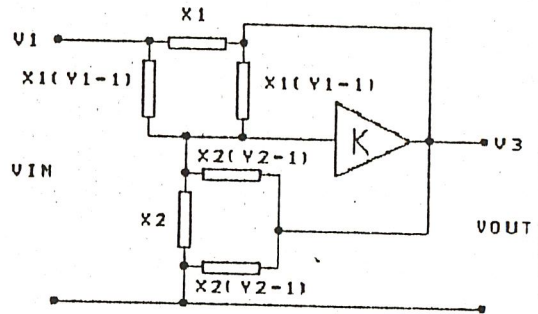
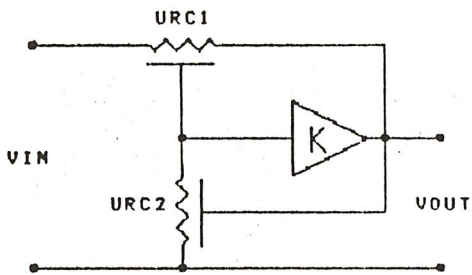
ดังนั้น $Y_1 = Y_2 = Y = \cosh P$

จากสมการ (13) เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$T(S) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P - 1)^2}{\cosh^2 P - K_1 K_2 (\cosh P - 1)}$$

(14)

4.3.3 รูปแบบที่ 3 แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 (Y_1 - 1) & -X_1 \\ -X_1 (Y_1 - 1) & 2X_1 (Y_1 - 1) + X_2 Y_2 & -[X_2 (Y_1 - 1) + X_2 (Y_2 - 1)] \\ -X_1 & -X_1 (Y_1 - 1) & X_1 Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

ลดรูป Matrix โดยนำความล้มพันธ์ของ K มาพิจารณา

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 & -X_1 (Y_2 - 1) - X_1 \\ & \text{---} \\ & K \\ -X_1 (Y_1 - 1) & 2X_1 (Y_1 - 1) + X_2 Y_2 & -X_1 (Y_1 - 1) - X_2 (Y_2 - 1) \\ & \text{---} \\ & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาค่า Transfer function จาก

$$T(S) = \frac{V_3}{V_1} = \frac{\Delta_3}{\Delta_1}$$

$$\Delta_3 = 1 \cdot X_1 (Y_1 - 1)$$

$$\Delta_1 = 1 \cdot 2X_1 (Y_1 - 1) + X_2 Y_2 - X_1 (Y_1 - 1) - X_2 (Y_2 - 1)$$

K

$$T(S) = \frac{X_1 (Y_1 - 1)}{\dots}$$

$$\frac{1}{K} \left[\frac{2X_1 (Y_1 - 1) + X_2 Y_2}{R_1 \sinh P_1} - \frac{X_1 (Y_1 - 1) - X_2 (Y_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2} \right]$$

แทนค่า $X_1 = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}$; $X_2 = \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}$

$Y_1 = \cosh P_1$; $Y_2 = \cosh P_2$

$$\frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}$$

$$\frac{P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}$$

$$T(S) = \dots \quad (15)$$

$$\frac{1}{K} \left[\frac{2P_1 (\cosh P_1 - 1) + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1) - P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2} \right]$$

$$\text{หรือ } T(S) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1} \quad (16)$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของวงจรมหา

$$P_1 = \sqrt{SC_1 R_1} \quad ; \quad P_2 = \sqrt{SC_2 R_2} \quad ; \quad S = j\omega$$

พิจารณาเมื่อกำหนดค่า Time Constant เท่ากัน คือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$
กำหนดให้ $\frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \alpha$ และ $P_1 = P_2 = P$

ดังนั้นสามารถลดรูปสมการ (15) ได้เป็น

$$T(S) = \frac{\cosh P - 1}{\left[\begin{array}{ccc} \frac{2}{K} + \frac{R_1}{KR_2} - \frac{R_1}{R_2} - 1 & \cosh P - \frac{2}{K} + \frac{R_1}{R_2} + 1 \\ & K & R_2 \end{array} \right]}{\cosh P - 1} \quad (17)$$

$$= \frac{\left[\begin{array}{ccc} \frac{2}{K} + \frac{1}{K\alpha} - \frac{1}{\alpha} - 1 & \cosh P - \frac{2}{K} + \frac{1}{\alpha} + 1 \\ & K & \alpha \end{array} \right]}{\cosh P - 1}$$

จากสมการที่ (17) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K=1$ (Unity Gain Amplifier)
จะได้ Transfer function ดังสมการ

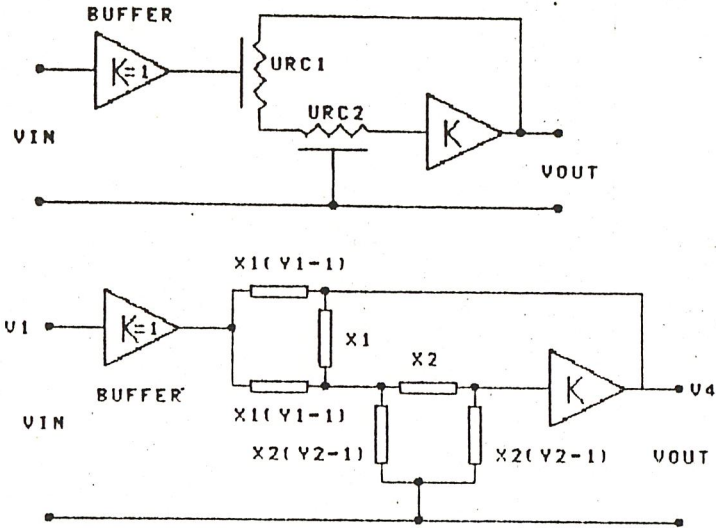
$$T(S) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) ถ้ากำหนดให้ $K=\alpha$ (Infinty Gain Amplifier) จะได้

$$T(S) = \frac{\alpha - \alpha \cosh P}{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1}$$

(19)

4.4 การคำนวณ Transfer Function ของวงจร Band Pass Filter ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Band Pass Filter

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & 0 & -X_1(Y_1-1) \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1 + X_2Y_2 & -X_2 & -X_1 \\ 0 & 0 & -X_2 & X_2Y_2 \\ -X_2(Y_1-1) & -X_1 & 0 & X_1Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

สามารถลดรูป Matrix โดย พิจารณาความสัมพันธ์ ของ K

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) & -X_1(Y_1-1) \\ -X_1(Y_1-1) & X_1Y_1 - X_2Y_2 & -X_2 - X_1 \\ & & K \\ 0 & 0 & -X_2 & X_2Y_2 \\ & & & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

คำนวณค่า Transfer function

$$T(S) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_4}{V_1} ; \quad \text{โดยที่ } V_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta} \quad \text{และ } V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$$

ดังนั้น

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{\Delta_4}{\Delta_1} \quad (\Delta = \text{determinant})$$

$$\Delta_4 = I_1 X_1 X_2 (Y_1 - 1)$$

$$\Delta_1 = I_1 X_1 X_2 \left[\frac{X_1 Y_1 X_2 + X_2 Y_2^2 - X_2 - K X_1}{K X_1} \right]$$

$$\therefore T(S) = \frac{\Delta_4}{\Delta_1} = \frac{K(Y_1 - 1)}{Y_1 Y_2 + \frac{R_1}{R_2} Y_2^2 - \frac{R_1}{R_2} - K}$$

แทนค่า $Y_1 = \cosh P_1 ; Y_2 = \cosh P_2 ; P_2 = \sqrt{SC_2 R_2}$

ดังนั้น

$$T(S) = \frac{K(\cosh P_1 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 + \frac{R_1}{R_2} \cosh^2 P_2 - \frac{R_1}{R_2} - K} \quad (20)$$

หรือ

$$T(S) = \frac{K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)} \quad (21)$$

$$\sqrt{R_2 C_1}$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายของวงจรมาย

พิจารณาเมื่อกำหนดค่า Time constant เท่ากัน คือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$

$$\text{กำหนด } \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \alpha \quad \text{และ} \quad P_2 = P_1 = P$$

ดังนั้นสามารถลดรูปสมการ (20) ได้เป็น

$$T(S) = \frac{K(\cosh P - 1)}{\cosh^2 P \frac{(1+\underline{1})}{\alpha} - (K+\underline{1})} \quad (22)$$

4.5 การคำนวณ sensitivity

LOW PASS FILTER

จากวงจรในรูปที่ 1 สามารถหา sensitivity ของ element R1, C1, R2, C2 ได้ดังนี้

$$K \sinh P_2$$

$$T(s) = \frac{K \sinh P_2}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{d}{dR_1} K \sinh P_2 = 0$$

$$D' = \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)$$

$$= \sinh P_2 \left[\frac{d}{dR_1} \cosh P_1 \cosh P_2 - \frac{Kd}{dR_1} \cosh P_1 + \frac{dK}{dR_1} \right] + \frac{d}{dR_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

$$\sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)$$

$$= \frac{1}{2R_1} \left[P \sinh P (\cosh P - K) + (\cosh^2 P - 1) \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \sinh P \right) \right]$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{\alpha P \sinh P (\cosh P - K) + (\cosh^2 P - 1) (P \coth P + 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{R_2}^{T(s)} = \frac{R_2 (N' - D')}{N \quad D}$$

$$N' = \frac{d}{dR_2} K \sinh P_2 = \frac{KP_2}{2R_2} \cosh P_2$$

$$D' = \frac{d}{dR_2} \left[\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right]$$

$$D' = \frac{P}{2R_2} \cosh P_1 \sinh^2 P + (\cosh^2 P - K \cosh P + K) \frac{1}{2R_2} P \cosh P + \frac{1}{R_2} P_2 \cosh P \sinh^2 P \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2R_2} \sinh P \frac{1}{\alpha} (\cosh^2 P - 1)$$

$$S_{R_2}^{T(c_1)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P_2 \coth P}{2} - \frac{\alpha (P \cosh P \sinh P) + \alpha P \coth P (\cosh^2 P - K \cosh P + K)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} + \frac{2P \cosh P \sinh P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{C_1}^{T(c_1)} = C_1 (N' - D')$$

$$C_1 (N' - D')$$

$$N' = \frac{dN}{dC_1} = \frac{d}{dC_1} K \sinh P_2 = 0$$

$$D' = \frac{d}{dC_1} \left[\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right]$$

$$= \sinh P_2 \left[\frac{d}{dC_1} \cosh P_1 \cosh P_2 - K \frac{d}{dC_1} \cosh P_1 + (\cosh^2 P_2 - 1) \frac{P_1}{2C_1} \right]$$

$$\left[\frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \cosh P_1 - \frac{1}{2C_1} \sinh P_2 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

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

$$S_{C_1}^{T(c_1)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{\alpha P \sinh P (\cosh P - K) + (\cosh^2 P - 1) (P \coth P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{C_2}^{T(c_1)} = C_2 (N' - D')$$

$$C_2 (N' - D')$$

$$N' = \frac{d}{dC_2} K \sinh P_2 = \frac{K P_2 \cosh P_2}{2C_2}$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \left[\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right]$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \sinh P_2 \cosh P_1 \cosh P_2 - K \frac{d}{dC_2} \sinh P_2 \cosh P_1 + \frac{dK}{dC_2} \sinh P_2 + \sinh P_1$$

$$\frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_2 C_1}} \frac{d}{dC_2} \sqrt{C_2} \cosh^2 P_2 - \frac{d}{dC_2} \sqrt{C_2}$$

$$= \frac{P}{2C_2} \cosh P \sinh^2 P + \frac{P}{2C_2} (\cosh^2 P - K \cosh P + K) \cosh P + \frac{2}{\alpha} P \sinh^2 P$$

$$\cosh P + \frac{1}{\alpha} \sinh P (\cosh^2 P - 1)$$

$$S_c^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{\alpha P \sinh P \cosh P + \alpha P (\cosh^2 P - K \cosh P + K) \coth P + 2P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)}}{\right]$$

จากวงจรในรูปที่ 2 สามารถคำนวณ sensitivity ของ element R_1, C_1, R_2, C_2 ได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2}{\frac{\sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2}{\sqrt{R_2 C_1}}}$$

$$S_R^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N - D)}$$

$$N = \sinh P_2 = \sinh \sqrt{SC_2 R_2}$$

$$N' = \frac{d}{dR_1} \sinh \sqrt{SC_2 R_2} = 0$$

$$D = \frac{\sqrt{R_1 C_2} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} (\cosh \sqrt{SC_1 R_1} - 1) + \sinh \sqrt{SC_2 R_2}}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

$$\begin{aligned}
D' &= \frac{d}{dR_1} \sqrt{R_1 C_2} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} (\cosh P_2 - 1) + \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 \\
&= (\cosh P_2 - 1) \frac{d}{dR_1} \sqrt{R_1 C_2} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} \\
&= (\cosh P_2 - 1) \left[\frac{P_1 \sqrt{R_1 C_2} \cosh P_1 + \frac{1}{2R_1} \sinh P_1 \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}}{2R_1 \sqrt{R_1 C_2}} \right] \\
&= \frac{1}{2R_1} (\cosh P_2 - 1) \left[\frac{P_1 R_1 P_1 \cosh P_1 + \frac{R_1 P_1}{R_2 P_1} \sinh P_1}{R_2 P_1} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{R_1}^{T(\infty)} &= R_1 \left[\frac{-\frac{1}{2R_1} (\cosh P_2 - 1) (P_1 \frac{R_1 P_1}{R_2 P_1} \cosh P_1 + \frac{R_1 P_1}{R_2 P_1} \sinh P_1)}{\frac{R_1 P_1}{R_2 P_1} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2} \right] \\
&= -\frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P_2 - 1) (P_1 \frac{R_1}{R_2} \cosh P_1 + \frac{R_1}{R_2} \sinh P_1)}{\frac{R_1}{R_2} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2} \right]
\end{aligned}$$

กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = \frac{R_2}{R_1}$

$$= -\frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1) (P \frac{1}{\alpha} \cosh P + \frac{1}{\alpha} \sinh P)}{\frac{1}{\alpha} \sinh P (\cosh P - 1) + \sinh P} \right]$$

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = -\frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1) (P \coth P + 1)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right]$$

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

$$N' = \frac{dN}{dR_2} = \frac{d}{dR_2} \sinh \sqrt{SC_2 R_2} = \frac{1}{2R_2} P_2 \cosh P_2$$

$$D' = \frac{d}{dR_2} \left[\frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2 \right]$$

$$= \frac{d}{dR_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \frac{d}{dR_2} \sinh P_2$$

$$= \sinh P_1 \left[\frac{d}{dR_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \cosh P_2 - \frac{d}{dR_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right] + \frac{d}{dR_2} \sinh P_2$$

$$= \frac{1}{2R_2} \sinh P_1 \left[\frac{R_1 P_2 \sinh P_2 P_2}{R_2 P_1} - \frac{R_1 P_2 \cosh P_2}{R_2 P_1} + \frac{R_1 P_2 \frac{1}{\sqrt{R_2}}}{R_2 P_1 \sqrt{R_2}} \right] + \frac{1}{2R_2} P_2 \cosh P_2$$

$$= \frac{1}{2R_2} \left[(\sinh P_1) \left(\frac{R_1 P_2 \sinh P_2 P_2}{R_2 P_1} - \frac{R_1 P_2 \cosh P_2}{R_2 P_1} + \frac{R_1}{R_2} \right) + P_2 \cosh P_2 \right]$$

กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$, $\alpha = \frac{R_2}{R_1}$

$$= \frac{1}{2R_2} \left[(\sinh P) \left(\frac{P \sinh P}{\alpha} - \frac{\cosh P}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \right) + P \cosh P \right]$$

$$S_{R_2}^{T(=)} = R_2 \left[\frac{\frac{1}{2R_2} P_2 \cosh P_2 - \frac{1}{2R_2} \sinh P_1 \left(\frac{P_2 \sinh P_2 - \cosh P_2 + 1}{\alpha} \right) + P_2 \cosh P_2}{\sinh P_2 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) + \sinh \sqrt{SC_2 R_2}} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[P \coth P - \frac{(1 - \cosh P + P \sinh P + \alpha P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right]$$

$$S_c^{T(=)} = \frac{C_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N = \sinh P_2 = \sinh \sqrt{SC_2 R_2}$$

$$N' = \frac{d}{dR_1} \sinh \sqrt{SC_2 R_2} = 0$$

$$dR_1$$

$$D' = \frac{d}{dC_1} \left[\frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) + \sinh \sqrt{SC_2 R_2}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} \right]$$

$$= (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) \frac{d}{dC_1} \frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \sinh \sqrt{SC_1 R_1}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}}$$

$$= (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) \left[\frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \frac{d}{dC_1} \sinh \sqrt{SC_1 R_1}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} + \sinh \sqrt{SC_1 R_1} \frac{d}{dC_1} \frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} \right]$$

$$= \frac{1}{2C_1} (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) \left[\frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} P_1 \cosh \sqrt{SC_1 R_1} - \sinh \sqrt{SC_1 R_1} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} \right]$$

$$= \frac{1}{2C_1} (\cosh P_2 - 1) \left[\frac{R_1 P_2 P_1 \cosh P_1 - \sinh P_1 R_1 P_2}{R_2 P_1} \right]$$

$$S^{T(=)} = C_1 \left[\frac{-\frac{1}{2C_1} (\cosh P_2 - 1) \frac{R_1 P_2 \cosh P_1 - \sinh P_1 R_1 P_2}{R_2 P_1}}{\frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \sinh \sqrt{SC_1 R_1} (\cosh \sqrt{SC_2 R_2} - 1) + \sinh \sqrt{SC_2 R_2}}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}}} \right]$$

กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\frac{R_1}{R_2} = \alpha$

$$R_1$$

$$= -\frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1)(P \coth P - 1)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right]$$

$$S^{T(=)} = \frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1)(1 - P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right]$$

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

$$N' = \frac{d}{dC_2} \sinh \sqrt{SC_2 R_2} = \frac{P_2 \cosh \sqrt{SC_2 R_2}}{2C_2}$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \left[\frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} \right]$$

$$= \sinh P_1 \frac{d}{dC_2} \frac{\sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} (\cosh P_2 - 1)}{\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}} + \frac{d}{dC_2} \sinh P_2$$

$$= \sinh P_1 \left[\frac{d}{dC_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2} \cosh P_2}{\sqrt{R_2 C_1}} - \frac{d}{dC_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right] + \frac{d}{dC_2} \sinh P_2$$

$$= \sinh P_1 \left[\frac{1}{2C_2} \frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} \sinh P_2 P_2 + \frac{\cosh P_2}{2C_2} \frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} - \frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} \frac{1}{2C_2} + \frac{P_2 \cosh P_2}{2C_2} \right]$$

กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = \frac{R_2}{R_1}$

$$= \frac{1}{2C_2} \sinh P_1 \left[\frac{(P_2 \sinh P_2 + \frac{1}{\alpha} \cosh P_2 - \frac{1}{\alpha}) + P_2 \cosh P_2}{\alpha} \right]$$

$$S_{C_2}^{T(s)} = C_2 \left[\begin{array}{ccc} 1 & P_2 \cosh P_2 & \frac{1}{2C_2} \sinh P_1 \frac{P \sinh P + \cosh P - 1 + P \cosh P}{\alpha} \\ \frac{1}{2C_2} & \sinh P_2 & \frac{\sinh P (\cosh P - 1) + \alpha \sinh P}{\alpha} \end{array} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - (P \sinh P + \cosh P - 1 + \alpha P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right]$$

Sensitivity ของ element R_1, C_1, R_2, C_2 ในวงจรรูปที่ 3 สามารถหาได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1}{\sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1$$

$$= \frac{P_1 \sqrt{R_1 C_2} \cosh P_1}{2R_1 \sqrt{R_2 C_1}} + \frac{1}{2R_1} \sinh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

$$D' = \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2$$

$$D' = \cosh P_2 \left[\frac{P_1 \sqrt{R_1 C_2} \cosh P_1 + 1}{2R_1 \sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 + P \coth P}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P + 1)}{\alpha + \cosh P} \right]$$

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

$$N' = \frac{d}{dR_2} \sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1$$

$$= \frac{1}{2R_2} \left[P_2 \cosh P_2 - \sinh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$D' = \frac{d}{dR_2} \sinh P_2 + \frac{d}{dR_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2$$

$$= \frac{1}{2R_2} \left[P_2 \cosh P_2 + \sinh P_1 \left(P_2 \sinh P_2 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} - \cosh P_2 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right) \right]$$

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha P \coth P - 1 - \alpha P \coth P + P \sinh P - \cosh P}{\alpha + 1} \right]$$

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

$$N' = \frac{d}{dC_1} \sinh P_2 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1$$

$$= \frac{1}{2C_1} \left[\frac{P_1 \cosh P_1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} \sinh P_1 \right]$$

$$D' = \frac{d}{dC_1} \sinh P_2 + \frac{d}{dC_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2$$

$$= \cosh P_2 \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} \sinh P_1 \right)$$

$$S_{c_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P - 1)}{\alpha + \cosh P} \right]$$

$$S_{c_2}^{T(s)} = \frac{C_2 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$\begin{aligned} N' &= \frac{d}{dC_2} \sinh P_1 + \frac{d}{dC_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \\ &= \frac{1}{2C_2} \left[P_2 \cosh P_2 + \sinh P_1 \frac{P_2 R_1}{P_1 R_2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D' &= \frac{d}{dC_2} \sinh P_2 + \frac{d}{dC_2} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2 \\ &= \frac{1}{2C_2} P_2 \cosh P_2 + \sinh P_1 \frac{d}{dC_2} \left(\frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \cosh P_2 \right) \\ &= \frac{1}{2C_2} \left[P_2 \cosh P_2 + \sinh^2 P_1 \frac{P_2 R_1}{P_2 R_2} + \sinh P_1 \cosh P_2 \right] \end{aligned}$$

$$S_{c_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P + \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right]$$

HIGH PASS FILTER

Sensitivity ของ element ในรูปที่ 5 สามารถหาได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$\begin{aligned} N' &= \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1) \\ &= \frac{1}{2 R_1} P_1 \sinh P_2 (\cosh P_2 - 1) \sinh P_1 \\ &= \frac{1}{2 R_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D' &= \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{d}{dR_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \\
 &= \frac{1}{2R_1} P \sinh^2 P_1 \cosh P + \cosh^2 P_2 - 1 \left(P_1 \cosh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} + \sinh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right)
 \end{aligned}$$

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{P \alpha \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P + 1)}{\alpha (\coth^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

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

$$\begin{aligned}
 N' &= (\cosh P_1 - 1) \frac{d}{dR_2} \sinh P_2 (\cosh P_2 - 1) \\
 &= \frac{1}{2R_2} (\cosh P_1 - 1) \left[P_2 \sinh^2 P + P_2 (\cosh P_2 - 1) \cosh P_2 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D' &= \frac{d}{dR_2} \left[\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right] \\
 &= \frac{1}{2R_2} \left[P (\cosh P_2 - 1) (\sinh^2 P + \cosh^2 P) + P \cosh P + 2P_2 \sinh^2 P \cosh P - \sinh P (\cosh^2 P - 1) \right] \frac{1}{\alpha}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{R_2}^{T(\infty)} &= \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P + P (\cosh P - 1) \coth P}{(\cosh P - 1)} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\alpha P (\cosh P - 1) (\sinh P + \coth P \cosh P) + \alpha P \coth P + 2P \sinh P \cosh P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right]
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 N' &= \frac{d}{dC_1} \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1) \\
 &= \frac{P_1 \sinh P_2 (\cosh P_2 - 1) \sinh P_1}{2C_1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D' &= \frac{d}{dC_1} \left[\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right] \\
 &= \sinh P_2 \cosh P_2 \frac{d}{dC_1} \cosh P_1 + (\cosh^2 P_2 - 1) \frac{d}{dC_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1
 \end{aligned}$$

$$= \frac{P_1 \sinh P_2 \sinh P_1 \cosh P_1 + (\cosh^2 P_2 - 1)(P_1 \cosh P_1 - 1 \sinh P_1)}{2C_1 \alpha \alpha}$$

$$S_{c_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P - \alpha P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P - 1)}{(\cosh P - 1) \alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{c_2}^{T(s)} = \frac{C_2 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = (\cosh P_1 - 1) \frac{d}{dC_2} \sinh P_2 (\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{1}{2C_2} (\cosh P_1 - 1) \left[P_2 \sinh^2 P_2 + P_2 (\cosh P_2 - 1) \cosh P_2 \right]$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \left[\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right]$$

$$= \frac{1}{2C_2} \left[P (\cosh P_1 - 1) (\sinh^2 P_2 + \cosh^2 P_2) + P \cosh P_2 + \frac{2}{\alpha} P_2 \sinh^2 P \cosh P + \frac{1}{\alpha} (\cosh^2 P - 1) \sinh P \right]$$

$$S_{c_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P + P (\cosh P_2 - 1) \coth P - \alpha P (\cosh P - 1) (\sinh P + \coth P \cosh P) + \alpha P \coth P + 2 P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)}{(\cosh P - 1) \alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

Sensitivity ของ element R_1, C_1, R_2, C_2 ในวงจรรูปที่ 5 หาได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1) \frac{d}{dR_1} (\cosh P_1 - 1)$$

$$= \frac{P_1 K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1) \sinh P_1}{2R_1}$$

$$D' = \frac{d}{dR_1} \cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P_1}{R_1} \cosh P_2 \sinh P_1$$

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \frac{P_1 \sinh P_1}{R_1} \left[\frac{(1 - K_1 K_2) \cosh P + K_1 K_2}{(\cosh P_1 - 1)(\cosh^2 P - K_1 K_2 \cosh P + K_1 K_2)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P \sinh P}{R_1} \left[\frac{(1 - K_1 K_2) + K_1 K_2 / \cosh P}{(\cosh P - 1)(\cosh P - K_1 K_2 + K_1 K_2 / \cosh P)} \right]$$

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

$$N' = \frac{d}{dR_2} K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{P_2}{2R_2} \sinh P_2 K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1)$$

$$D' = \frac{d}{dR_2} \cosh P_1 \cosh P_2 - \frac{d}{dR_2} K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{P_2}{2R_2} \cosh P_1 \sinh P_2 - \frac{P_2}{2R_2} K_1 K_2 \sinh P_2$$

$$S_{R_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \frac{P \sinh P}{R_2} \left[\frac{\cosh P}{(\cosh P - 1)(\cosh^2 P - K_1 K_2 \cosh P + K_1 K_2)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P \sinh P}{R_2} \left[\frac{1}{(\cosh P - 1)(\cosh P - K_1 K_2 + K_1 K_2 / \cosh P)} \right]$$

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

$$N' = \frac{d}{dC_1} K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{P_1}{2C_1} K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1) \sinh P_1$$

$$D' = \frac{d}{dC_1} \cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1) = \frac{P_1}{2C_1} \cosh P_2 \sinh P_1$$

$$S_{C_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \frac{P \sinh P}{C_1} \left[\frac{(1 - K_1 K_2) \cosh P + K_1 K_2}{(\cosh P - 1)(\cosh^2 P - K_1 K_2 \cosh P + K_1 K_2)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} P \sinh P \left[\frac{(1 - K_1 K_2) + K_1 K_2 / \cosh P}{(\cosh P - 1)(\cosh P - K_1 K_2 + K_1 K_2 / \cosh P)} \right]$$

$$S_{C_2}^{T(s)} = \frac{C_2 (N' - P')}{(N \quad P)}$$

$$N' = \frac{d}{dC_2} K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1) = \frac{P_2 K_1 K_2 \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{2C_2}$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 \frac{d}{dC_2} (\cosh P_2 - 1)$$

$$= \frac{P_2 \cosh P_1 \sinh P_2 - P_2 K_1 K_2 \sinh P_2}{2C_2}$$

$$S_{C_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} P \sinh P \left[\frac{\cosh P}{(\cosh P - 1)(\cosh^2 P - K_1 K_2 \cosh P + K_1 K_2)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} P \sinh P \left[\frac{1}{(\cosh P - 1)(\cosh P - K_1 K_2 + K_1 K_2 / \cosh P)} \right]$$

Sensitivity ของ element R1, C1, R2, C2 ในรูปที่ 6 หาได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1}{\sqrt{R_2 C_1}}}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{R_1 (N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{P_1 \sinh P_1 \sinh P_2}{2R_1}$$

$$D' = \frac{P_1 \sinh P_2 \sinh P_1 + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \cdot \frac{1}{2R_1} (\cosh P_1 + \sinh P_2)}{2R_1}$$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P - P_1 \sinh^2 P + (1/\alpha) (\cosh P + \sinh P)}{(\cosh P - 1) \sinh P (\cosh P - 1) + \frac{1}{\alpha} \sinh P} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P - \alpha P \sinh P + \coth P + 1}{\cosh P - 1 \quad \alpha \cosh P - \alpha + 1} \right]$$

$$S_{2R}^{T(\infty)} = \begin{matrix} R \\ 2 \end{matrix} \begin{matrix} (N' - D') \\ (N \quad D) \end{matrix}$$

$$N' = \frac{P_2}{2R_2} (\cosh P_1 - 1) \cosh P_2$$

$$D' = \frac{P_2}{2R_2} (\cosh P_1 - 1) \cosh P_2 - \frac{1}{2R_2} \frac{\sqrt{R_1 C_1} \sinh P_1}{\sqrt{R_2 C_1}}$$

$$S_{2R}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P_2 \cosh P_2}{\sinh P_2} - \frac{P_2 (\cosh P_1 - 1) \cosh P_2 - (1/\alpha) \sinh P_1}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) + \frac{1}{\alpha} \sinh P_1} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{\alpha P \coth (P-1) - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1}}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right]$$

$$S_{1C}^{T(\infty)} = \begin{matrix} C \\ 1 \end{matrix} \begin{matrix} (N' - D') \\ (N \quad D) \end{matrix}$$

$$N' = \frac{P_1 \sinh P_1 \sinh P_2}{2C_1}$$

$$D' = \frac{P_1 \sinh P_2 \sinh P_1 + \frac{1}{2C_1} \frac{\sqrt{R_1 C_1}}{\sqrt{R_2 C_1}} [P_1 \cosh P_1 - \sinh P_1]}{2C_1}$$

$$S_{1C}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh P_1}{(\cosh P_1 - 1)} - \frac{P_1 \sinh P_2 \sinh P_1 + (1/\alpha) (P_1 \cosh P_1 - \sinh P_1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) + \frac{1}{\alpha} \sinh P_1} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right]$$

$$S_{2C}^{T(\infty)} = \begin{matrix} C \\ 2 \end{matrix} \begin{matrix} (N' - D') \\ (N \quad D) \end{matrix}$$

$$N' = \frac{P_2 \cosh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{2C_2}$$

$$D' = \frac{P_2 (\cosh P_1 - 1) \cosh P_2 + \frac{1}{2C_2} \frac{\sqrt{R_1 C_1} \sinh P_1}{\sqrt{R_2 C_1}}}{2C_2}$$

$$S_{2C}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \cosh P}{\sinh P} - \frac{P \cosh P (\cosh P - 1) + (1/\alpha) \sinh P}{\sinh P (\cosh P - 1) + (1/\alpha) \sinh P} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1}}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right]$$

BAND PASS FILTER

Sensitivity ของ element R_1, C_1, R_2, C_2 ในรูปที่ 7 หาได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}$$

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

$$N' = \frac{d}{dR_1} K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) = K \sinh P_2 \left(\frac{1}{2R_1} \sinh P_1 \right)$$

$$D' = \frac{d}{dR_1} \left[\sinh P_2 \cosh P_2 \cosh P_1 - K + \frac{\sqrt{C_2 R_1}}{\sqrt{C_1 R_2}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1) \right]$$

$$= \frac{d}{dR_1} \sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \frac{d}{dR_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)$$

$$= \sinh P_2 \left[\cosh P_2 \frac{d}{dR_1} \cosh P_1 \right] + (\cosh^2 P_2 - 1) \left[\frac{P_1}{2R_1} \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \cosh P_1 + \frac{1}{2R_1} \sinh P_1 \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$= \frac{1}{2R_1} \left[\sinh P_2 P_1 \cosh P_2 \sinh P_1 + (\cosh^2 P_2 - 1) \left(\frac{P_1 R_1 P_1 \cosh P_1}{R_2 P_1} + \frac{R_1 P_1 \sinh P_1}{R_2 P_1} \right) \right]$$

กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2 = \alpha = \frac{R_2}{R_1}$

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P_1 \sinh P_2 \sinh P_1}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)} \right]$$

$$- \frac{(P_1 \sinh P_2 \sinh P_1 \cosh P_2 + (\cosh^2 P_2 - 1) \left[\frac{P_1}{\alpha} \cosh P_1 + \frac{1}{\alpha} \sinh P_1 \right])}{\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \frac{1}{\alpha} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \cosh P \sinh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P + 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{R_2}^{T(\infty)} = R_2 \frac{(N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{d}{dR_2} \left[K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) \right]$$

$$= \frac{1}{2R_2} K P_2 \cosh P_2 (\cosh P_1 - 1)$$

$$D' = \frac{d}{dR_2} \left[\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \frac{\sqrt{R_1 C_1} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$= \frac{1}{2R_2} \left[\frac{P_2 \cosh P_2 \sinh^2 P + (\cosh^2 P - K) P \cosh P + 2P_2 \sinh^2 P \cosh P - 1 \sinh P (\cosh^2 P - 1)}{\alpha} \right]$$

$$S_{R_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - P \cosh P \sinh P (\alpha + 2) + \alpha (\cosh^2 P - K) P \coth P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S_{C_1}^{T(\infty)} = C_1 \frac{(N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{d}{dC_1} [K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)]$$

$$= \frac{1}{2} \frac{K \sinh P_2 P_1 \sinh P_1}{C_1}$$

$$D' = \frac{d}{dC_1} \left[\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \frac{\sqrt{R_1 C_1} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$= \frac{1}{2C_1} \left[\sinh P_2 \cosh P_2 \sinh P_1 + (\cosh^2 P_2 - 1) \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} \sinh P_1 \right) \right]$$

$$S_{C_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P_1 \sinh^2 P}{\sinh P (\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh^2 P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \cosh P - \sinh P)}{\alpha \sinh P (\cosh^2 P - K) + \sinh P (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$S^{\tau(c)} = C_2 \frac{(N' - D')}{(N \quad D)}$$

$$N' = \frac{d}{dC_2} [K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)]$$

$$= K (\cosh P_1 - 1) \cosh P_2 \frac{P_2}{2C_2}$$

$$D' = \frac{d}{dC_2} \left[\frac{\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)}{\sqrt{R_2 C_1}} \right]$$

$$P_1 = P_2; R_1 C_1 = R_2 C_2$$

$$= \frac{1}{2} C_2 \left[\frac{P_2 \cosh P_1 \sinh^2 P_2 + (\cosh P_1 \cosh P_2 - K) P_2 \cosh P_2 + 2 \sinh P_1 \frac{R_1}{R_2} \cosh P_2 P_2 \sinh P_2}{R_2} \right.$$

$$\left. + \frac{\sinh P_1 \frac{R_1}{R_2} (\cosh^2 P_2 - 1)}{R_2} \right]$$

$$S^{\tau(c)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P (\cosh P - 1)}{(\cosh P - 1)} \right.$$

$$\left. - \frac{\alpha P \cosh P \sinh P + \alpha (\cosh^2 P - K) P \coth P + 2 P_2 \cosh P \sinh P + (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{P_2 \cosh P \sinh P (\alpha + 2) + \alpha (\cosh^2 P - K) P \coth P + (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)}}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right]$$

บทที่ 5

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ

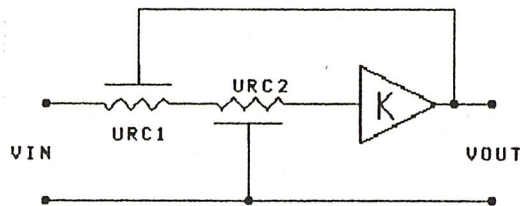
5.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์อ่าซี

ตัว Uniform Distributed RC หรือให้ชื่อย่อว่า URC ที่จะใช้ในการออกแบบซึ่งเขียนอยู่ในรูปพารามิเตอร์ความนำ (Admittance Parameter) จะได้

$$[Y] = \frac{SRC}{R \sinh SRC} \begin{bmatrix} \cosh SRC & -1 \\ -1 & \cosh SRC \end{bmatrix}$$

เมื่อ R และ C เป็นผลรวมของค่าความต้านทานทั้งหมดและค่าประจุทั้งหมดของ URC
S เป็นตัวแปรความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency Variable)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำเราจะใช้ Op-Amp หรือตัว Amplifier อื่น ๆ เช่น Video Amp จำนวน 1 ตัวร่วมกับ Uniform Distributed RC จำนวน 2 ตัว โดยในบทนี้จะเสนอวงจรกรองความถี่ต่ำ 3 รูปแบบ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำในรูปแบบแรกจะเป็นแบบ Active Distributed RC Anti-Aliasing/Smoothing Filter สามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์อ่าซี

เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = SR_1C_1$, $P_2 = SR_2C_2$ จากวงจรในรูปที่ 5.1 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(S) = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} \cdot K \cdot \frac{\left[\frac{P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1 \quad R_2 \sinh P_2} \cosh P_2 - \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2} - \frac{K P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} \right]}{\dots (5.1)}$$

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้ว แทนค่าลงในสมการ (5.1) จะได้

$$T(S) = \frac{K}{(1+R_2) \cosh^2 p - k(\cosh p - 1) R_2} \dots (5.2)$$

จากสมการ (5.2) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำดังสมการ (5.3)

$$T(S) = \frac{1}{(1+\frac{1}{\alpha}) \cosh^2 P - \cosh P + 1 - \frac{1}{\alpha}} \dots (5.3)$$

โดยที่ $\alpha = R_2 / R_1$

จากสมการ (5.2) ถ้าให้ $K = \alpha$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(S) = \frac{-1}{(\cosh p - 1) R_2} \dots (5.4)$$

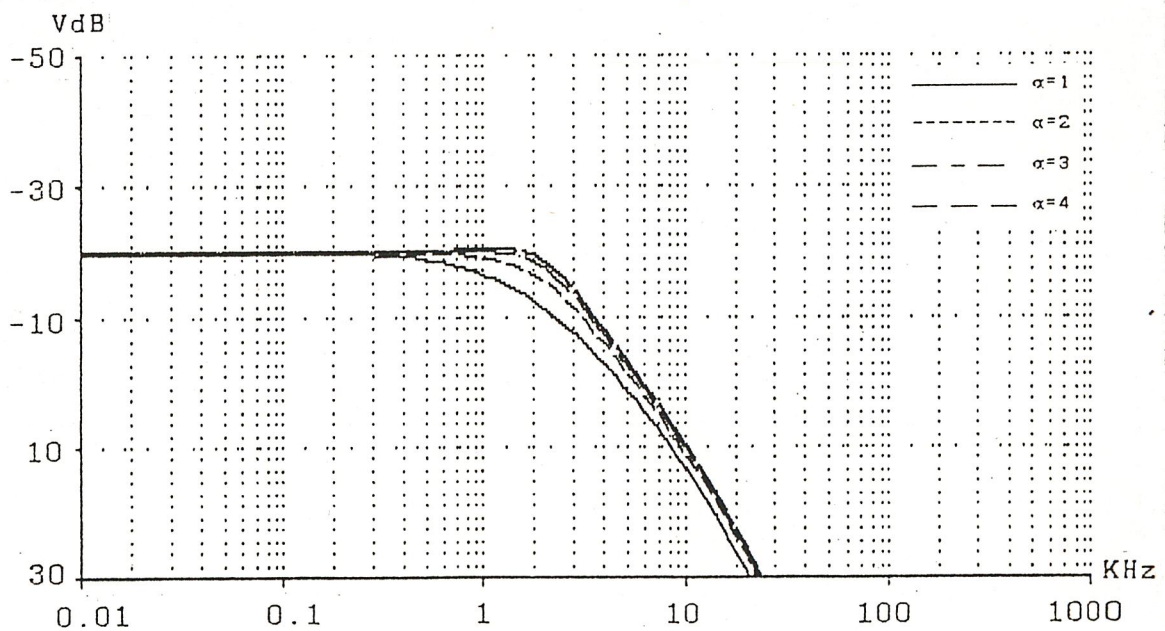
วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีตามในรูปที่ 5.1 ถ้าเราพิจารณา C_{p1} และ C_{p2} ซึ่งเป็น Parasitic Capacitors ระหว่างแผ่นล่าง (Conductor Plate) และ Substrate ของ URC ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่ Parasitic Capacitance ของแผ่นด้านบน (Top Plate) มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ค่า Parasitic Capacitor C_{p1} จะอยู่ระหว่างเอาต์พุทของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุทอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์ มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

ผลตอบสนองทางความถี่ของสมการ (5.3) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\cosh P = \cosh (t+jt)$$

โดยที่ $P = jwRC \Big|_{RC=1} = (w/2) + j (w/2) = t + jt$ เมื่อ $t = (w/2)$
 จะได้ $\cosh P = \cosh t \cdot \cos t + j \sinh t \cdot \sin t \dots (5.5)$

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (5.3) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3,$ และ 4 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และได้อัตราการลดทอน -3 dB ที่ $w = 0.942, 1.703, 2.11$ และ 2.329 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนไป คือเมื่อค่า α มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดที่ขึ้นในย่านคัทออฟ (cut-off) และเมื่อ α มีค่ามากกว่า 2 จะทำให้ในช่วงความถี่ที่ผ่าน (Passband) เกิด Ripple



รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรต่าง ๆ นั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้เมื่อค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์มีค่าสูงจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงนี้วงจรที่ติดตั้งควรมีค่าความไวของอุปกรณ์ต่ำ จากวงจรในรูปที่ 5.1 เราสามารถหา

ค่าความไวของอิลิเมนต์แต่ละตัว R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยาย K มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (5.1) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh P_2}{\sqrt{\frac{R_1 C_2 \sinh P_1 (\cosh P_2 - 1) + \sinh P_2}{R_2 C_1}}} \quad \dots (5.6)$$

จากฟังก์ชันหาเส้นชิตวิตีในสมการ (3.7) โดยการแทน x_1 ด้วย R_1 และ x_2 จากสมการ (5.6) จะได้

$$S_{R_1}^{T(S)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{R_2 P \sinh^2 P (\cosh P - k) (\cosh P - 1) (P \cosh P + \sinh P)}{R_1} \right. \\ \left. \frac{R_2 \sinh P (\cosh^2 P - k \cosh P + k) + \sinh P (\cosh^2 P - 1)}{R_1} \right] \quad \dots (5.7)$$

จากสมการ (5.7) กำหนดให้ $R_1, C_1 = R_2, C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเส้นชิตวิตีของอิลิเมนต์ R_1 คือ

$$S_{R_1}^{T(S)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1)(P \coth P + 1)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right] \quad \dots (5.8)$$

ส่วนค่าเส้นชิตวิตีของอิลิเมนต์ C_1, R_2, C_2 ก็สามารถหาได้ในกรณีเดียวกัน ซึ่งจากสมการ (5.7) จะได้

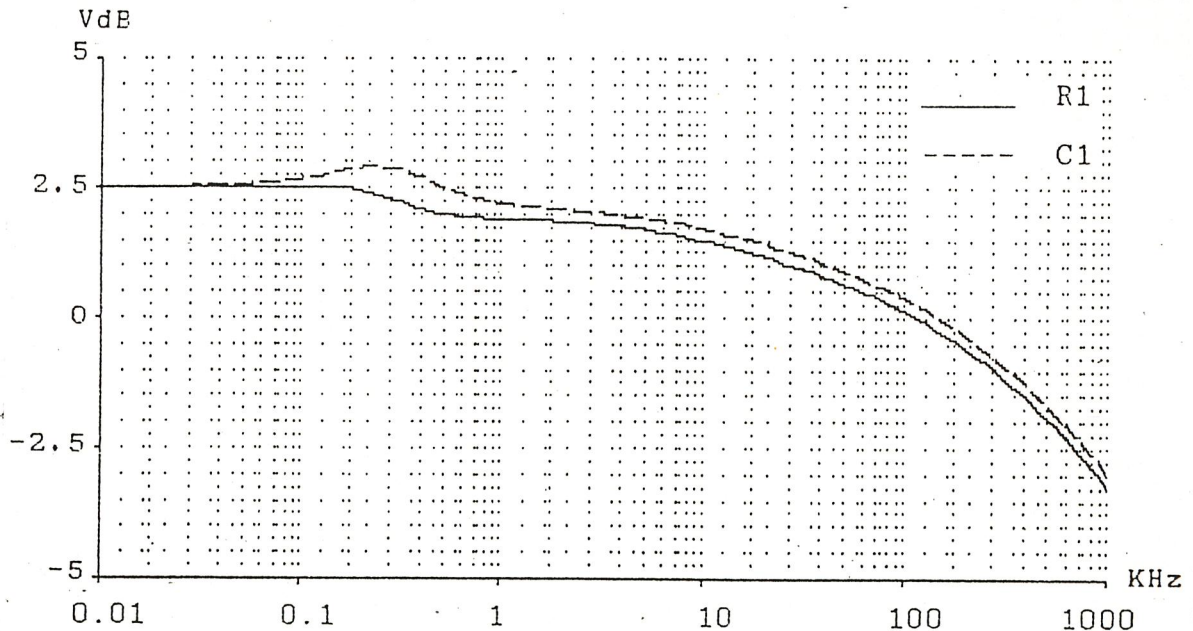
$$S_{R_2}^{T(S)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - (1 - \cosh P + P \sinh P + \alpha P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right] \quad \dots (5.9)$$

$$S_{C_1}^{T(S)} = \frac{1}{2} \left[\frac{(\cosh P - 1)(1 - P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right] \quad \dots (5.10)$$

$$S_{C_2}^{T(\omega)} = \frac{1}{2} \left[P \coth P - \frac{(P \sinh P + \cosh P - 1 + \alpha P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \right] \dots (5.11)$$

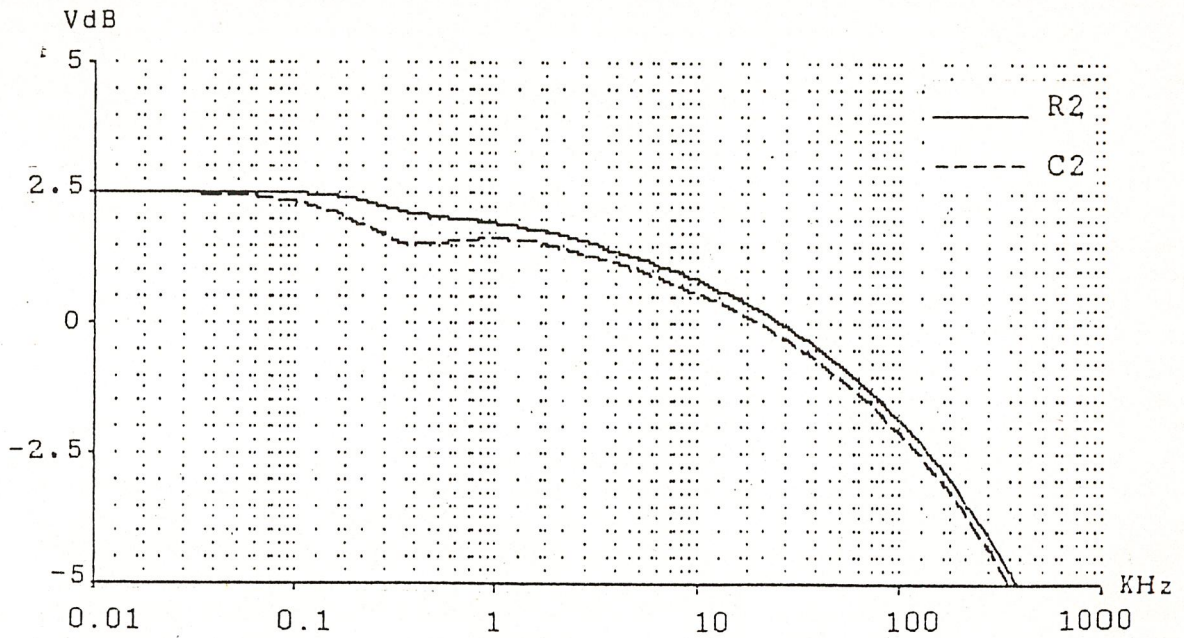
จากสมการ (5.8) - (5.11) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 5.3a และ R_2, C_2 แสดงในรูป 5.3b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำผ่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตี้ที่ได้จะมีค่าต่ำโดยที่ $\omega = 0$ ค่าเซ็นซิวิตี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตี้ของ R_1, C_1 จะมีค่าต่ำกว่าของ R_2, C_2

ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K สามารถหาได้จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (5.2) โดยการแทนค่า X_1 ด้วย K ในสมการ (3.7) จะได้



รูปที่ 5.3a แสดง sensitivity ของ Element R_1, C_1

Ele



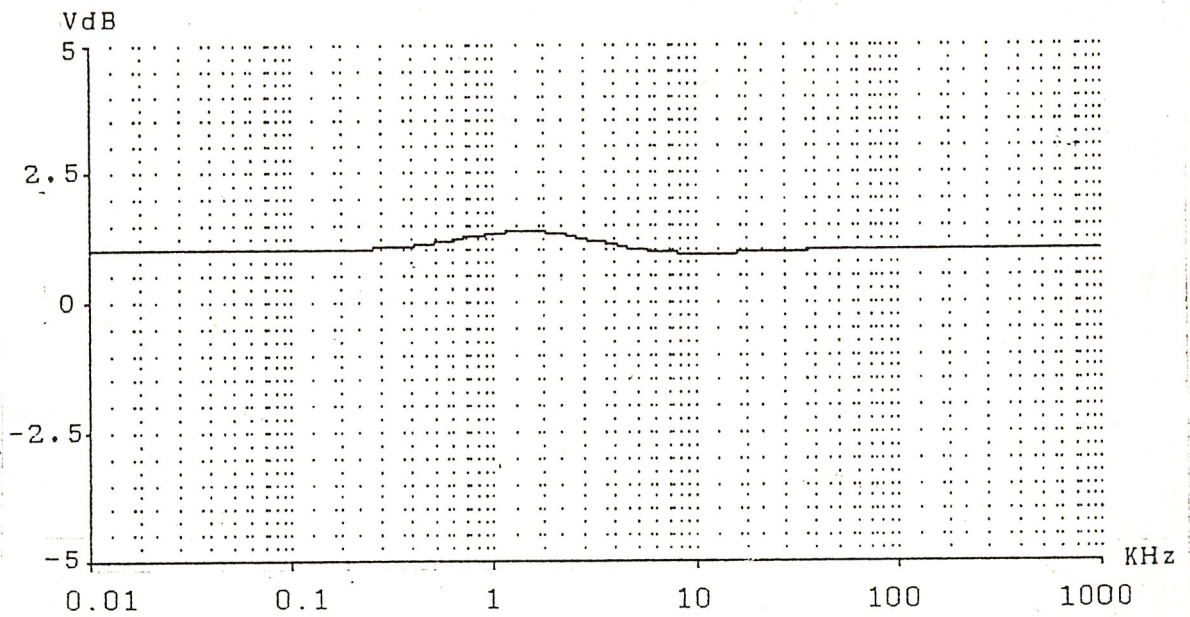
รูปที่ 5.3b แสดง sensitivity ของ Element R2, C2

$$T(S) S_k = K \left[\begin{array}{c} 1 \\ K \frac{1 - \cosh P}{(1 + \frac{R_2}{R_1}) \cosh^2 P - \frac{R_2}{R_1} - k(\cosh P - 1)} \end{array} \right] \quad \dots(5.12)$$

จากสมการ (5.12) ถ้าให้อัตราขยาย $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของ อิลิเมนต์ K คือ

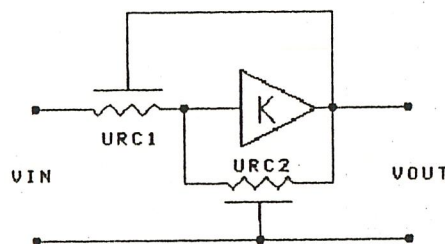
$$T(S) S_k = \frac{(\alpha + 1) \cosh^2 P - 1}{(\alpha + 1) \cosh^2 P - 1 - \alpha(\cosh P - 1)} \quad \dots(5.13)$$

จากสมการ (5.13) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ดังแสดงใน รูปที่ 5.4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าต่ำคือมีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 5.4 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

รูปแบบที่ 2 แสดงถึงวงจร Active Distributed RC Filter ซึ่งมี 2 Feedback Loop ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5

จากวงจรในรูปที่ 5.5 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(S) = \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} \dots (5.14)$$

$$= \frac{1}{K} \frac{\left[\frac{P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_1 \cosh P_1 + P_1 - P_2}{R_2 \sinh P_2} \right]}{R_1 \sinh P_1 R_1 \sinh P_1 R_2 \sinh P_2}$$

ถ้ากำหนดให้ $p = p_1 = p_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (5.14) จะได้

$$T(S) = \frac{K}{\left[1 + \frac{R_1}{R_2} - K\right] \cosh P + K \left[1 - \frac{R_1}{R_2}\right]} \quad \dots(5.15)$$

จากสมการ (5.15) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้
ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำดังสมการ (5.16)

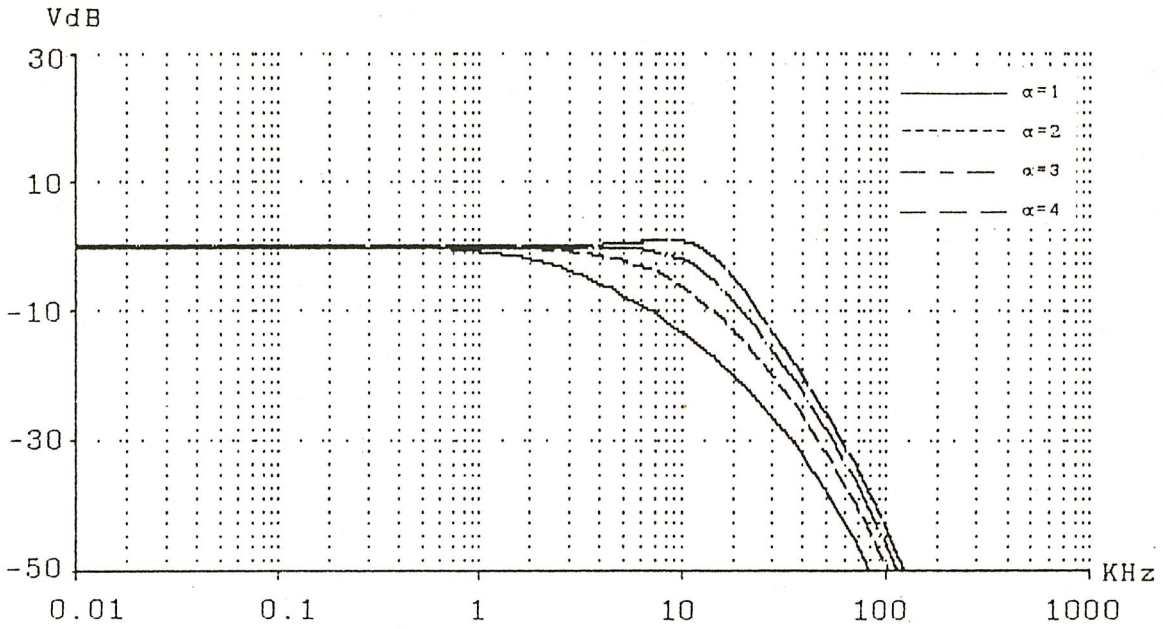
$$T(S) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} (\cosh P - 1 + \alpha)} \quad \dots(5.16)$$

โดยที่ $\alpha = R_2 / R_1$

จากสมการ (5.15) ถ้าให้ $K = \alpha$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(S) = \frac{-1}{\cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad \dots(5.17)$$

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (5.16) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหา
ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และ
ได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $\omega = 2.432, 6.287, 11.509, 15.926$



รูป 5.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

$$T(s) = \frac{K \sinh P_2}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - K \cosh P_1 + K) + \frac{\sqrt{R_1 C_1}}{\sqrt{R_2 C_2}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)} \quad \dots (5.18)$$

จากสมการ (5.18) กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเป็นขั้วตีตัวของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 คือ

$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{\alpha P \sinh P (\cosh P - K) + (\cosh^2 P - 1) (P \coth P + 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \quad \dots (5.19)$$

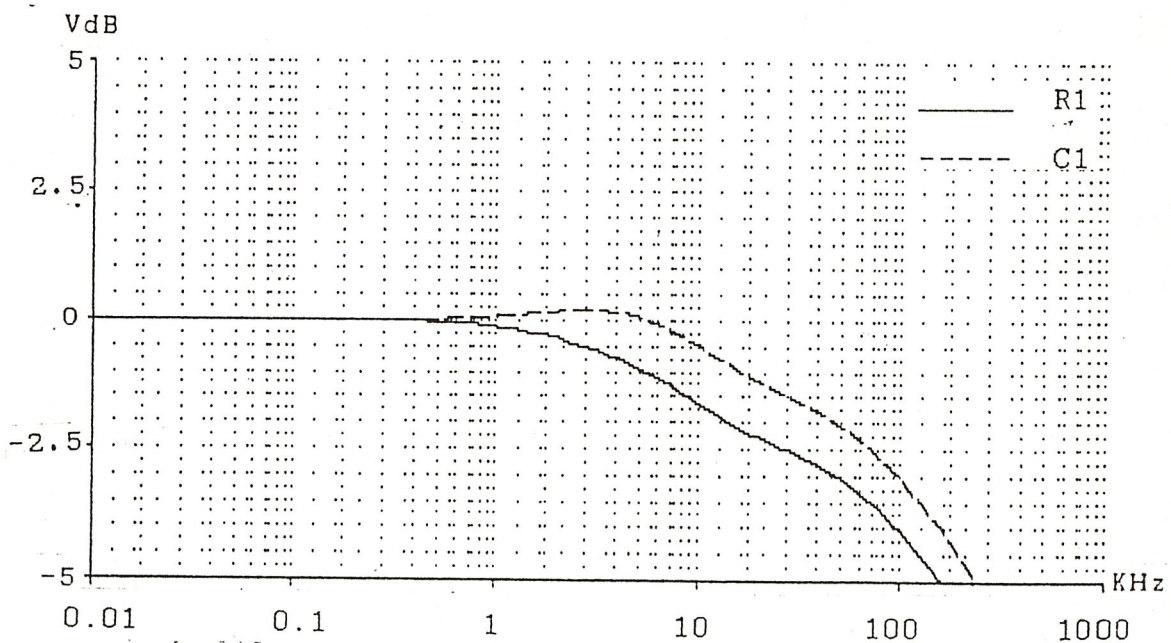
$$S_{R_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P_2 \coth P - \alpha (P \cosh P \sinh P) + \alpha P \coth P (\cosh^2 P - K \cosh P + K)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} + \frac{2 P \cosh P \sinh P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \quad \dots (5.20)$$

$$S_{C_1}^{T(s)} = \frac{-1}{2} \left[\frac{\alpha P \sinh P (\cosh P - K) + (\cosh^2 P - 1) (P \coth P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \quad \dots (5.21)$$

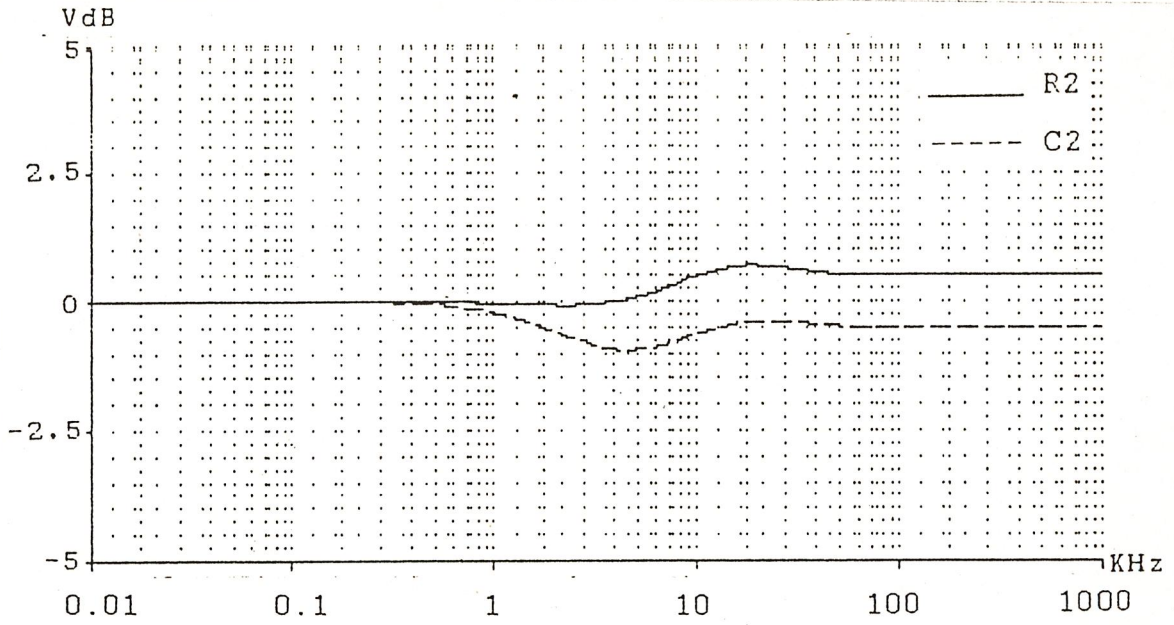
$$S_{ca}^{T(\omega)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{\alpha P \sinh P \cosh P + \alpha P (\cosh^2 P - K \cosh P + K) \coth P + \alpha (\cosh^2 P - K \cosh P + K) + (\cosh^2 P - 1)}{2P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)}}{\dots} \right] \quad \dots (5.22)$$

จากสมการ (5.19)-(5.22) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 5.7a และ R_2, C_2 แสดงในรูป 5.7b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีที่ได้จะมีค่าต่ำโดยที่ $w=0$ ค่าเซ็นซิวิตีจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ R_2, C_2 จะมีค่าต่ำกว่าของ R_1, C_1

ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K สามารถหาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (5.15) โดยการแทนค่า X_1 ด้วย K ในสมการ(3.7)จะได้



รูปที่ 5.7a แสดง sensitivity ของ Element R_1, C_1



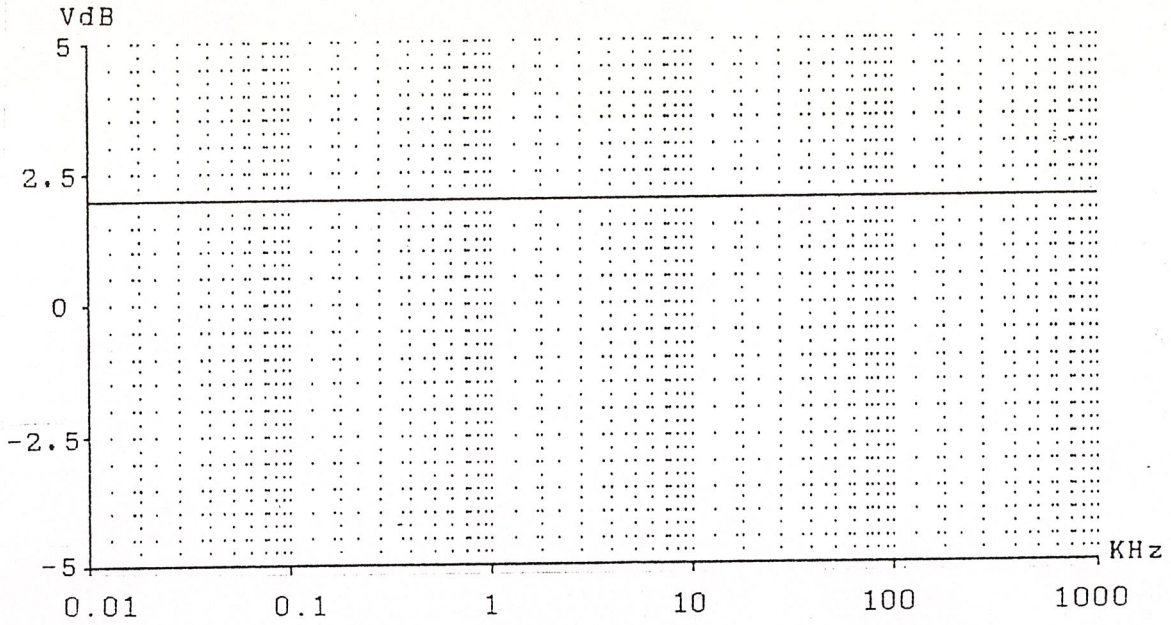
รูปที่ 5.7b แสดง sensitivity ของ Element R2, C2

$$T(S) S_k = K \left[\begin{array}{c} \frac{R_2}{1 - R_1 - \cosh P} \\ K \frac{(1 + R_2 - k) \cosh P + (1 - R_2)k}{R_1} \end{array} \right] \quad \dots (5.23)$$

จากสมการ (5.23) ถ้าให้อัตราขยาย $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเห็นชีวิตของอิลิเมนต์ K คือ

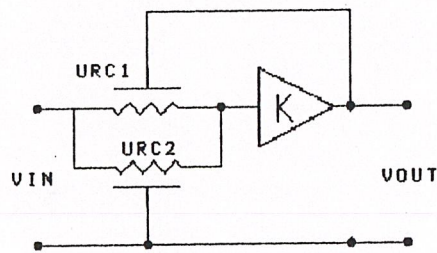
$$T(S) S_k = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{\cosh P + \alpha} \quad \dots (5.24)$$

จากสมการ (5.24) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเห็นชีวิตของอิลิเมนต์ K ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

รูปแบบที่ 3 แสดงถึงวงจร Active Distributed RC Filter ที่มี Amplifier 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9

จากวงจรในรูปที่ 5.5 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(s) = \frac{P_1 \quad P_2}{R_1 \sinh P_1 + R_2 \sinh P_2}$$

$$= \frac{1}{K} \begin{bmatrix} P_1 \cosh P_1 + P_2 \cosh P_2 & -P_1 (\cosh P_1 - 1) \\ R_1 \sinh P_1 & R_2 \sinh P_2 \end{bmatrix} \frac{R_1 \sinh P_1}{R_1 \sinh P_1} \quad \dots (5.25)$$

ถ้ากำหนดให้ $p = p_1 = p_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (5.25) จะได้

$$T(S) = \frac{\frac{1+R_1}{R_2}}{1 - \begin{bmatrix} 1+R_1 - K \\ K \\ R_2 \end{bmatrix} \cosh P + 1} \quad \dots(5.26)$$

จากสมการ (5.26) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้
ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำดังสมการ (5.27)

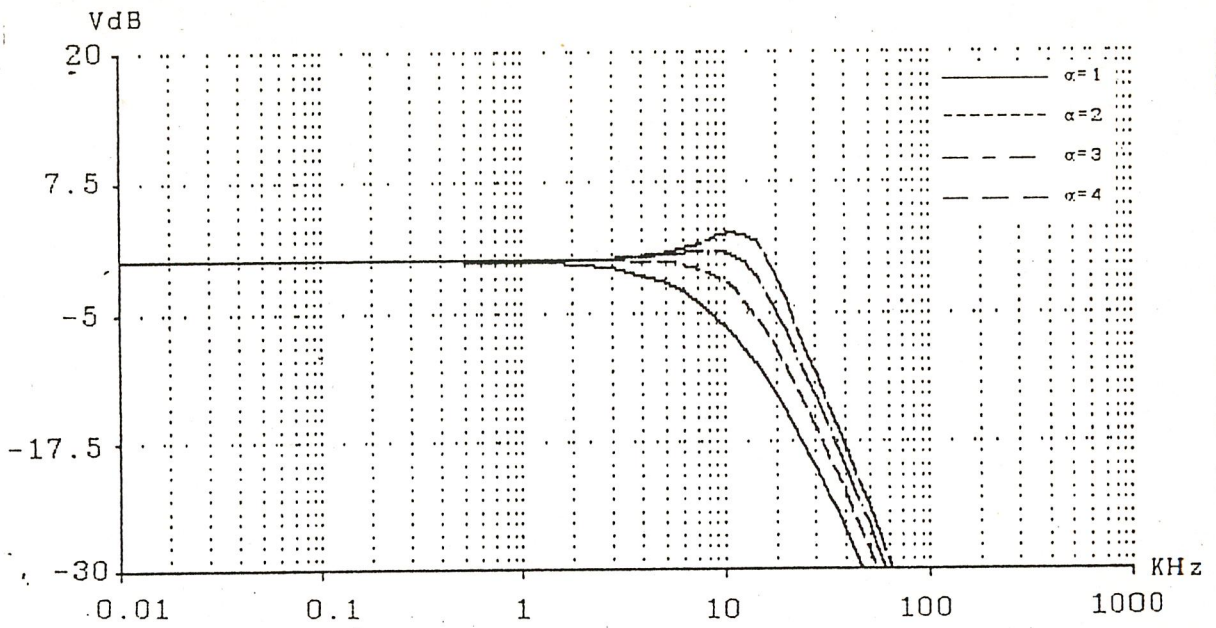
$$T(S) = \frac{\alpha+1}{\cosh P + \alpha} \quad \dots(5.27)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (5.27) ถ้าให้ $K=\alpha$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(S) = \frac{\alpha+1}{-\alpha \cosh P + \alpha} \quad \dots(5.28)$$

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (5.27) ถ้ากำหนดให้ $\alpha=1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหา
ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ
ได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $w=6.287, 11.509, 15.926, 19.155$



รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh P_1}{\sinh P_2 + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh P_1 \cosh P_2} \quad \dots (5.29)$$

จากสมการ (5.29) กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเช่นขั้วชีวิตของ อิเล็กเมนต์ R_1, R_2, C_1, C_2 คือ

$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 + P \coth P}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P + 1)}{\alpha + \cosh P} \right] \quad \dots (5.30)$$

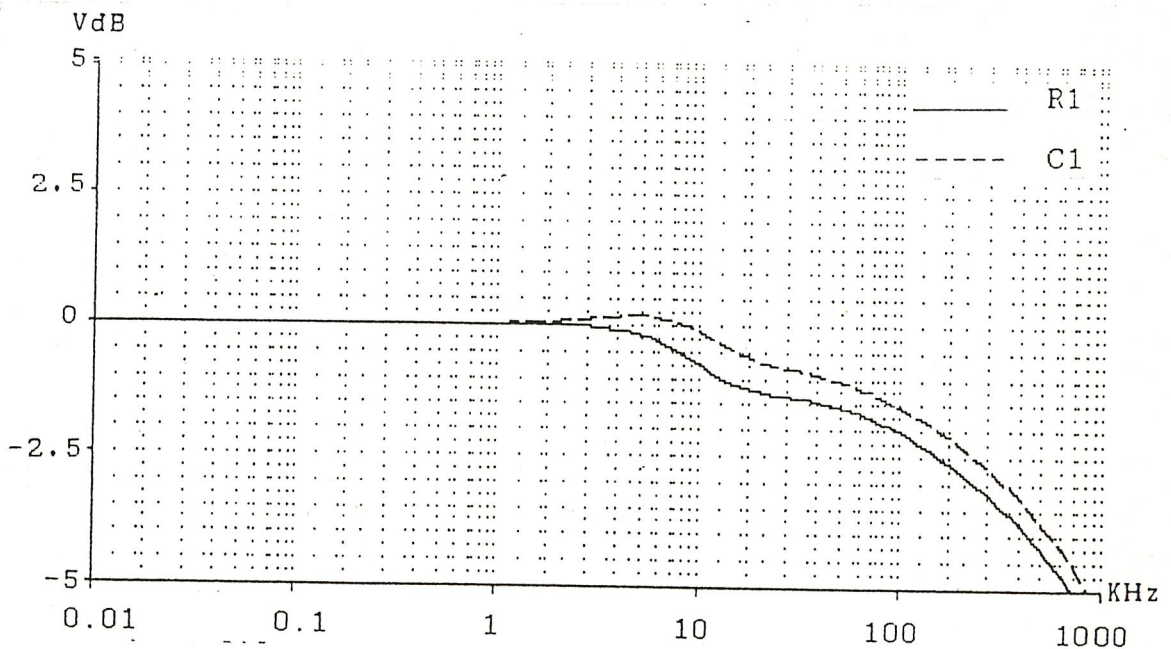
$$S_{R_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P - \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right] \quad \dots (5.31)$$

$$S_{C_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P - 1)}{\alpha + \cosh P} \right] \quad \dots (5.32)$$

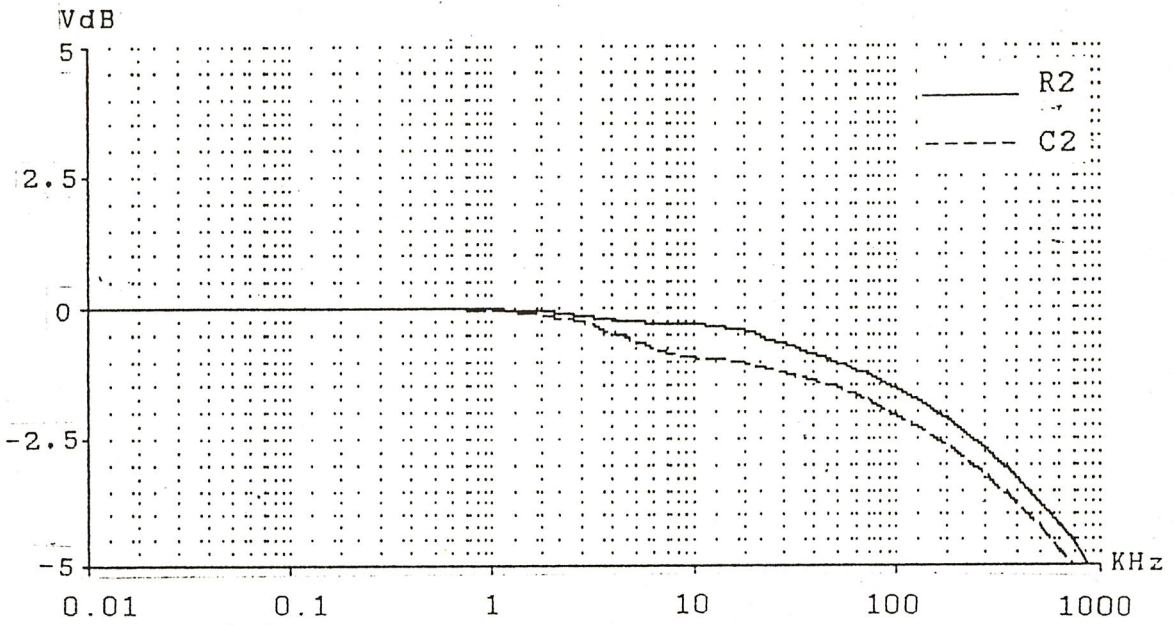
$$S_{c_2}^{T(c_1)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P + \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right] \dots (5.33)$$

จากสมการ (5.30)-(5.33) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเห็นชีวิติตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 5.11a และ R_2, C_2 แสดงในรูป 5.11b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำ ย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเห็นชีวิติตีที่ได้จะมีค่าต่ำโดยที่ $\omega=0$ ค่าเห็นชีวิติตีจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเห็นชีวิติตีของ R_2, C_2 จะมีค่าต่ำกว่า ของ R_1, C_1

ค่าเห็นชีวิติตีของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน เท่ากับ K สามารถหาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (5.26) โดยการแทนค่า X_1 ด้วย K ในสมการ(3.7)จะได้



รูปที่ 5.11a แสดง sensitivity ของ Element R_1, C_1



รูปที่ 5.11b แสดง sensitivity ของ Element R2,C2

$$S_{K} = \frac{T(S)}{K} = \frac{1}{K} \left[\frac{1+R1 \cosh P}{R2} \right] \dots (5.34)$$

$$\frac{1}{K} \left[\begin{matrix} 1+R1 & -k \\ R2 & \end{matrix} \right] \cosh P+1$$

จากสมการ (5.34) ถ้าให้อัตราขยาย $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_{K} = \frac{T(S)}{K} = \frac{(\alpha+1) \cosh P}{\cosh P+\alpha} \dots (5.35)$$

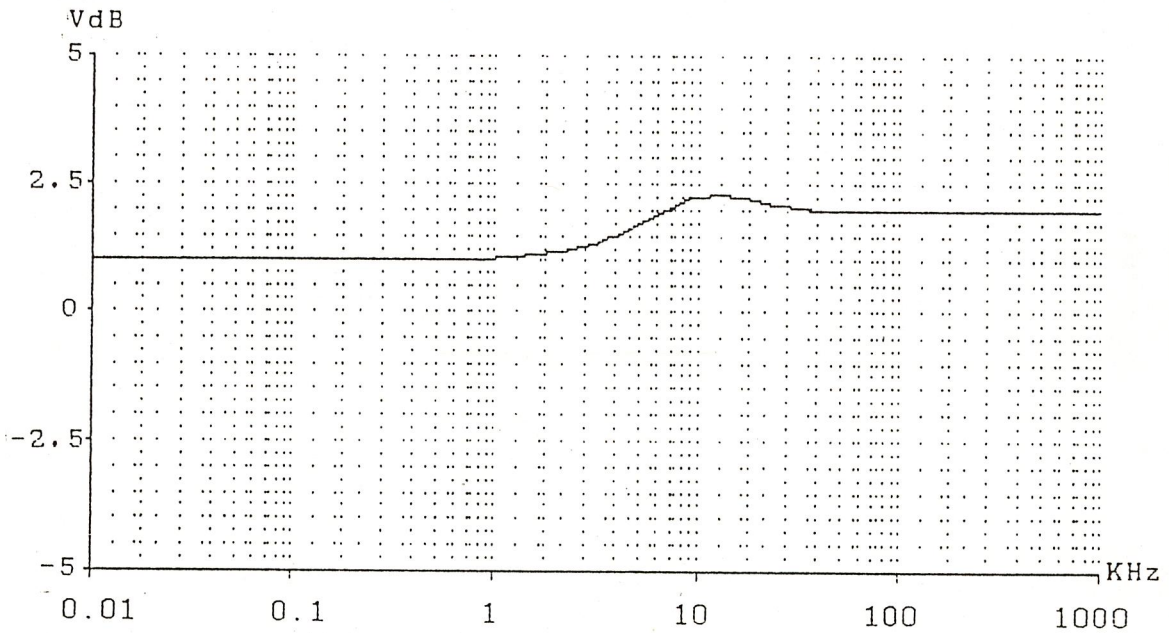
ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K ที่ $w = 0$ จะได้ $\cosh P = 1$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (5.35) จะได้

$$S_{K} = 1$$

และที่ ω เท่ากับ infinity จะได้

$$T(s) = \frac{S_k}{s^{\alpha+1}}$$

จากสมการ (5.35) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเห็นชีวิติตีของอิลิเมนต์ K ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเห็นชีวิติตีของ K จะมีค่าต่ำคือมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเห็นชีวิติตีของ K มีค่าเท่ากับ $\alpha+1$

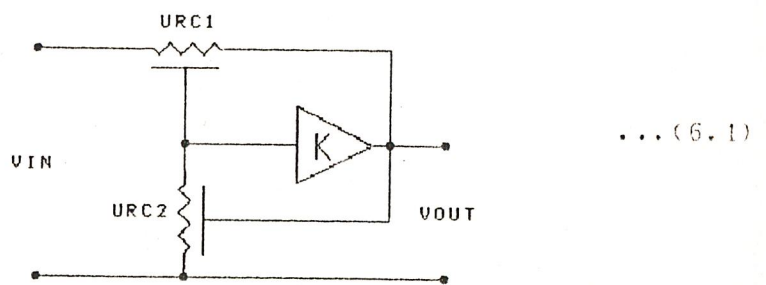


รูปที่ 5.12 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

บทที่ 6

การออกแบบวงจรกรองความถี่สูง

สำหรับวงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทริบิวท์อาซี จะเสนอวงจร 3 รูปแบบโดยรูปแบบแรกจะใช้ op-amp 1 ตัว ร่วมกับ URC จำนวน 2 ตัว สามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = SR_1C_1$, $P_2 = SR_2C_2$ จากวงจรในรูปที่ 6.1 เขียนเป็นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันได้คือ



รูปที่ 6.1 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทริบิวท์อาซี

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (6.1) จะได้

$$T(S) = \frac{R_1 \sinh P_1}{K \begin{vmatrix} 2P_1 (\cosh P_1 - 1) + P_2 \cosh P_2 & -P_1 (\cosh P_1 - 1) - P_2 (\cosh P_2 - 1) \\ R_1 \sinh P_1 & R_2 \sinh P_2 \\ R_1 \sinh P_1 & R_2 \sinh P_2 \end{vmatrix}} \dots (6.2)$$

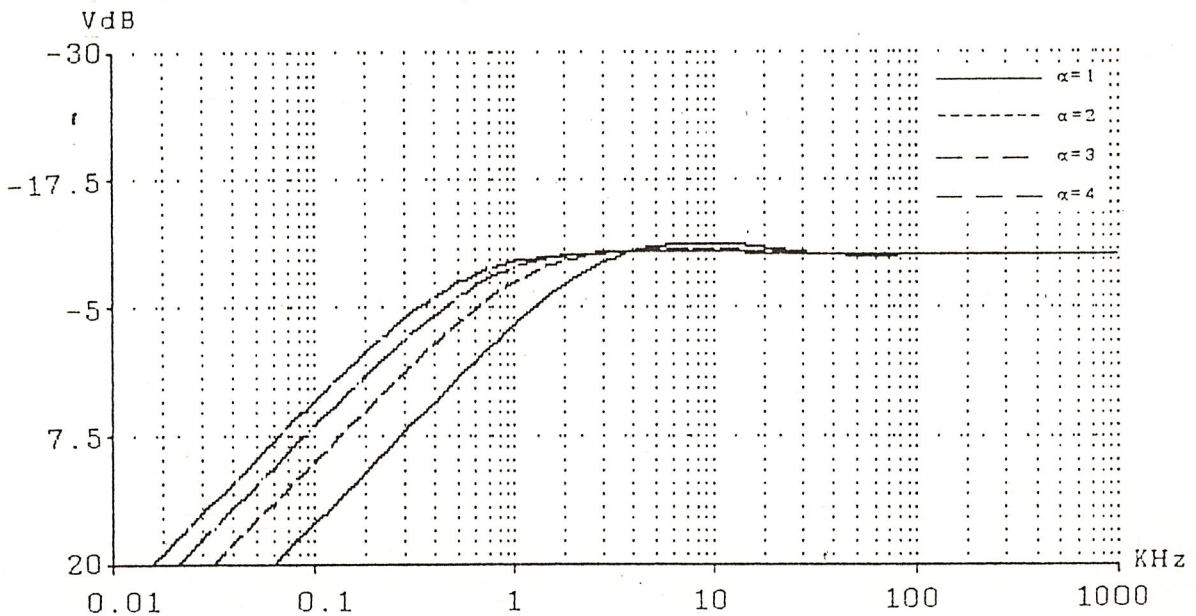
จากสมการ (6.2) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K=1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงดังสมการ (6.3)

$$T(S) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \dots (6.3)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (6.2) ถ้าให้ $K = \alpha$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(s) = \frac{\alpha - \alpha \cosh P}{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1} \quad \dots (6.4)$$



รูปที่ 6.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (6.3) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $w = 1.73, 0.925, 0.632$ และ 0.48 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ α มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดชันในย่านคัทออฟ

จากวงจรในรูปที่ 6.1 เราจะหาค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยอัตราขยายมีค่า $K = 1$ ฉะนั้นทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (6.1) จะได้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1} \quad \dots (6.5)$$

เมื่อหาเงื่อนไขชิตวิตติ์ในสมการ (6.5) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเงื่อนไขชิตวิตติ์ของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

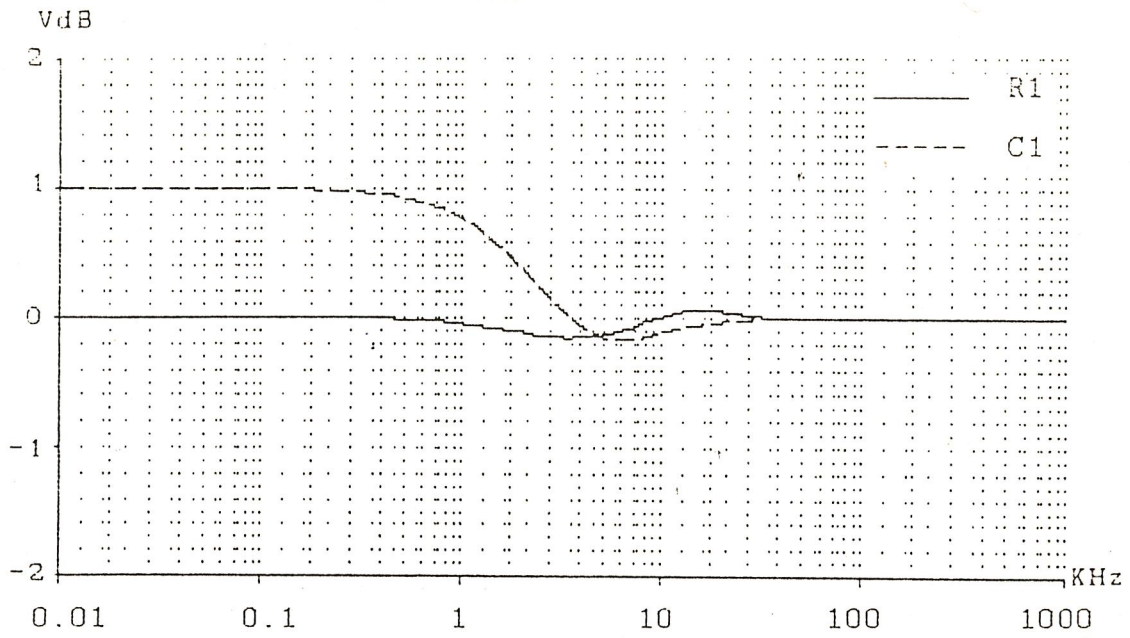
$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{\cosh P - 1} - \frac{\alpha P \sinh P + \coth P + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right] \quad \dots (6.6)$$

$$S_{R_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \alpha P \coth(\cosh P - 1) - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right] \quad \dots (6.7)$$

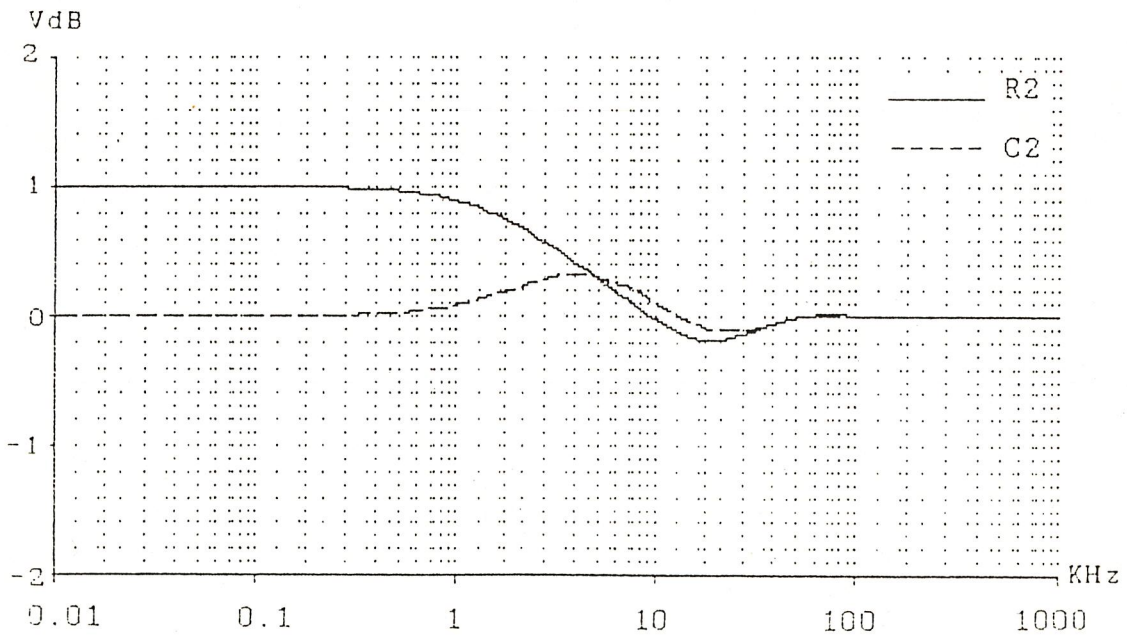
$$S_{C_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right] \quad \dots (6.8)$$

$$S_{C_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \alpha P \coth P (\cosh P - 1) + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right] \quad \dots (6.9)$$

จากสมการ (6.6)-(6.9) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้เงื่อนไขชิตวิตติ์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 6.3a และ R_2, C_2 ดังแสดงในรูปที่ 6.3b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเงื่อนไขชิตวิตติ์ที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่ $w = \infty$ ค่าเงื่อนไขชิตวิตติ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเงื่อนไขชิตวิตติ์ของ R_1, C_1 จะมีค่าต่ำกว่า C_1, R_2 โดยที่ $w=0$ ค่าเงื่อนไขชิตวิตติ์ของ R_1, C_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และ C_1, R_2 จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



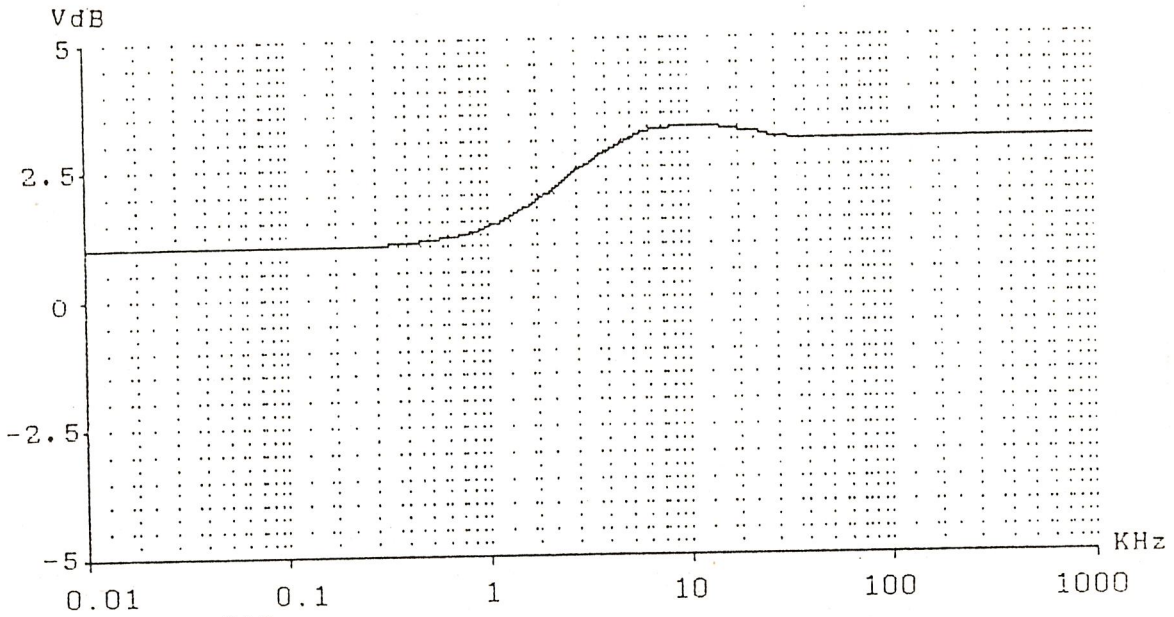
รูปที่ 6.3a แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1



รูปที่ 6.3b แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_2, C_2

ค่าเห็นที่ตีตัวของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 6.1 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (6.2) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเห็นที่ตีตัวของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_{K T(s)} = \frac{(2\alpha+1)\cosh P - 2\alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots (6.10)$$

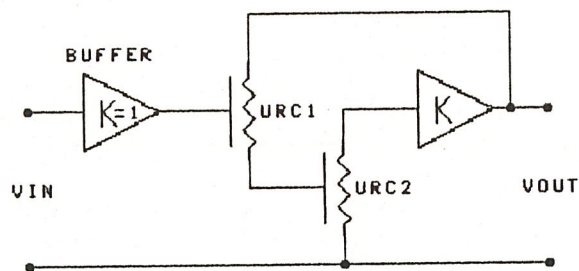


รูปที่ 6.4 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

จากสมการ (6.10) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้ค่าเห็นขีดวิบัติของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 6.4 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเห็นขีดวิบัติของ K จะมีค่าเท่ากับ $(2\alpha+1)/\alpha$ และในช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ $w=0$ ค่าเห็นขีดวิบัติของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง

สำหรับวงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทิฟดิสรีวิวที่อาศัยในรูปแบบที่ 2 สามารถเขียนเป็นวงจรได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = SR_1C_1$, $P_2 = SR_2C_2$ จากวงจรในรูปที่ 6.5 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

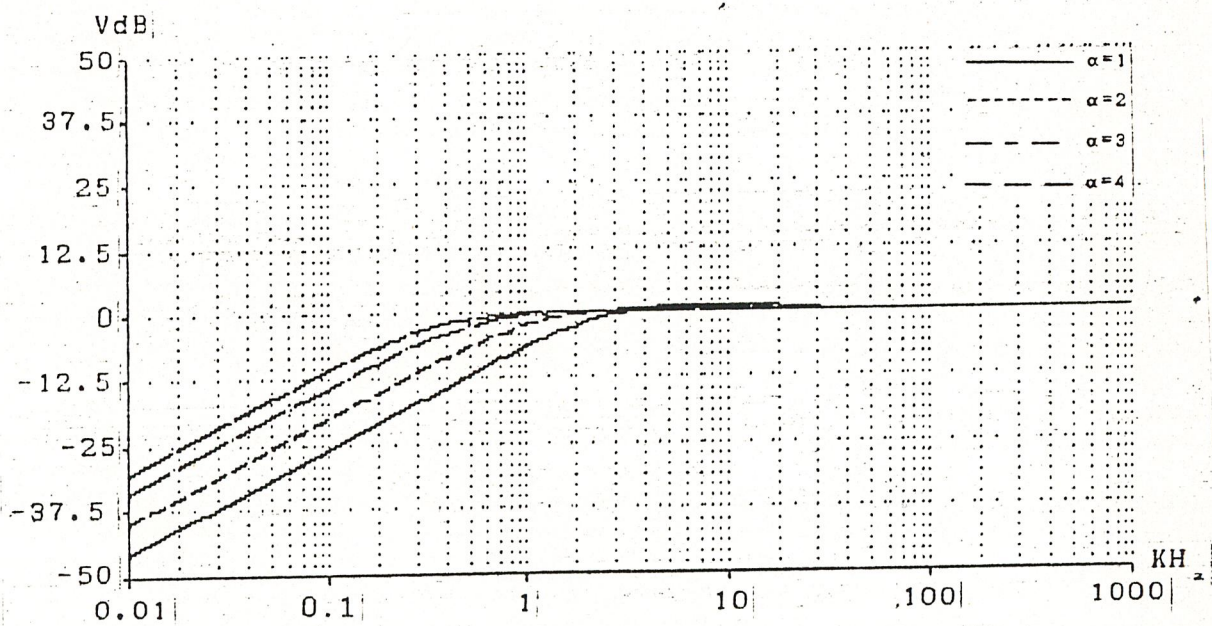
$$T(s) = \frac{K(\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 + \frac{R_1}{R_2}(\cosh^2 P_2) - K(\cosh P_2 - 1)} \quad \dots (6.11)$$



รูปที่ 6.5 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟดิสรีบริวท์อ่าซี

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (6.11) จะได้

$$T(S) = \frac{K(\cosh P - 1)^2}{\cosh^2 \left[\frac{R_1}{R_2} + 1 \right] - K \cosh P + K - \frac{R_1}{R_2}} \quad \dots (6.12)$$



รูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (6.12) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 6.6 และได้ค่าจุดคัทออฟ-3 dB ที่ $w = 1.73, 0.925, 0.48$ และ 0.32 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ α มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดชันในย่านคัทออฟ

จากวงจรในรูปที่ 6.5 เราจะหาค่าเห็นขั้วขิตวิติของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยอัตราขยายมีค่า $K = 1$ ฉะนั้นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (6.11) จะได้

$$T(s) = \frac{\sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_1 \cosh P_2 - \cosh P_2 + 1) + \frac{\sqrt{R_1 C_2}}{\sqrt{R_2 C_1}} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)} \dots (6.13)$$

เมื่อหาเห็นขั้วขิตวิติในสมการ (6.13) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเห็นขั้วขิตวิติของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

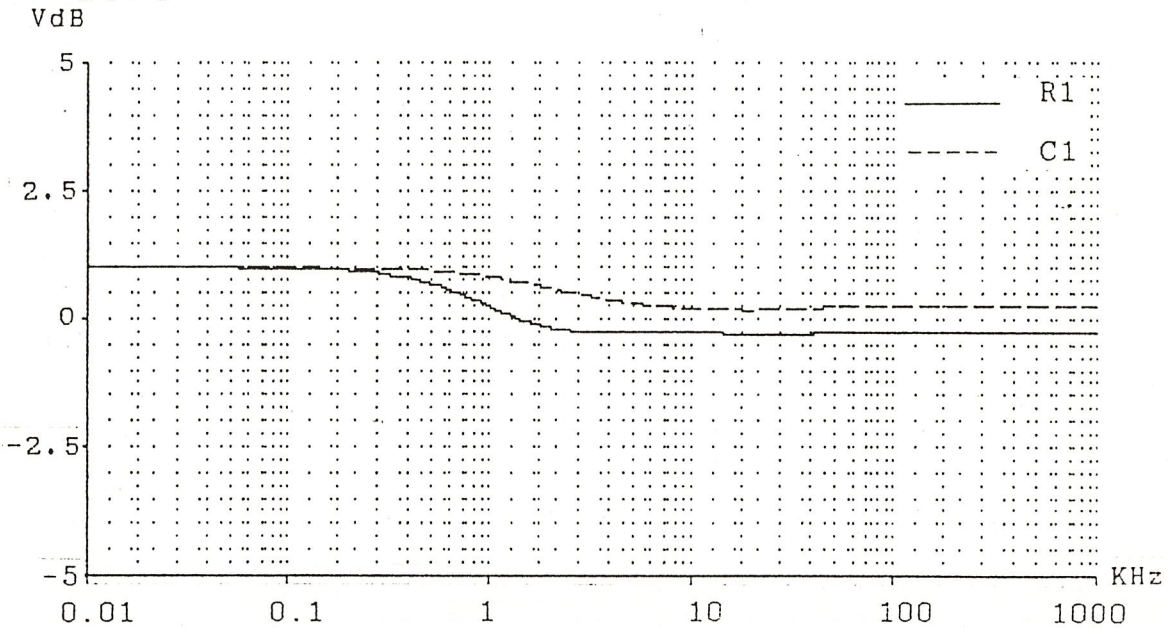
$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P + 1)}{\alpha (\coth^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (6.14)$$

$$S_{R_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P + P (\cosh P - 1) \coth P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P (\cosh P - 1) (\sinh P + \coth P \cosh P) + \alpha P \coth P + 2P \sinh P \cosh P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (6.15)$$

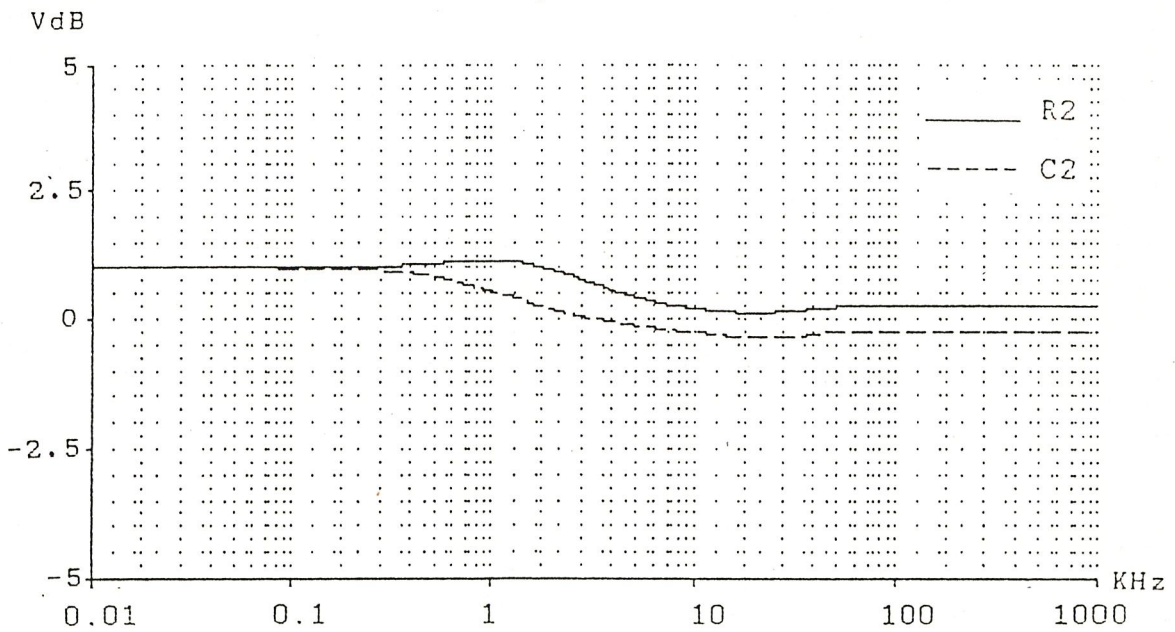
$$S_{C_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P - \alpha P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P - 1)}{(\cosh P - 1) \alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (6.16)$$

$$S_{C_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P + P (\cosh P_2 - 1) \coth P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P (\cosh P - 1) (\sinh P + \coth P \cosh P) + \alpha P \coth P + 2P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - \cosh P + 1) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (6.17)$$

จากสมการ (6.14)-(6.17) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้เซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 6.7a และ R_2, C_2 ดังแสดงในรูปที่ 6.7b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ช่วงความถี่ส่งผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่ $w = \text{infinity}$ ค่าเซ็นซิวิตีจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และที่ช่วงความถี่ย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ R_1, C_1 จะมีค่าต่ำกว่า C_2, R_2



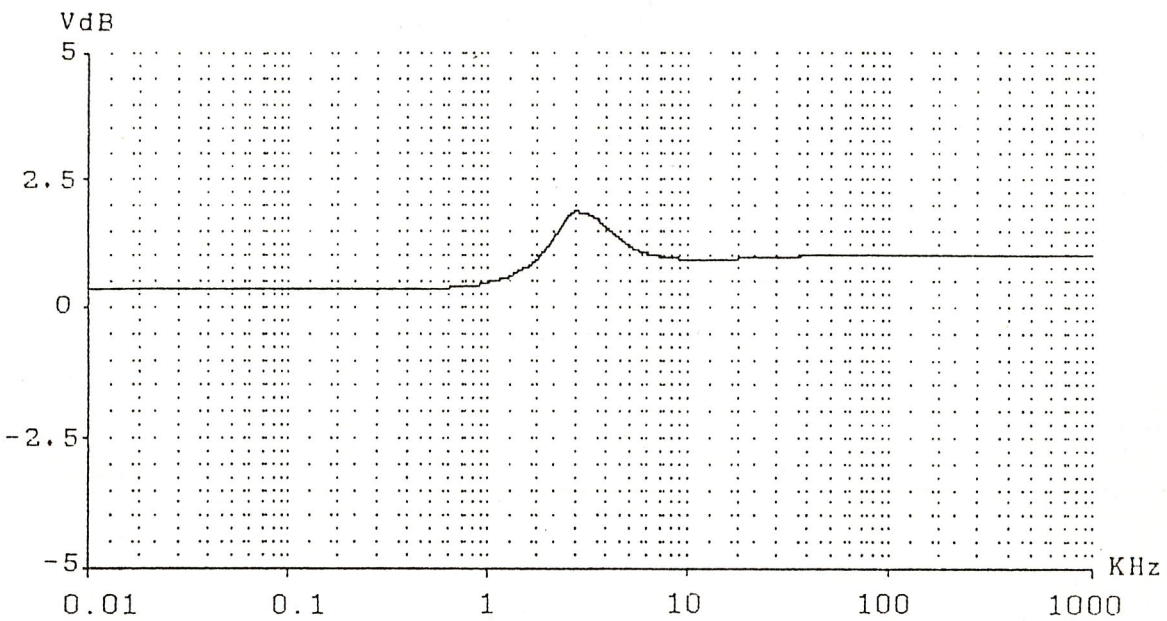
รูปที่ 6.7a แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1



รูปที่ 6.7b แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_2, C_2

ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 6.5 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (6.2) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K คือ

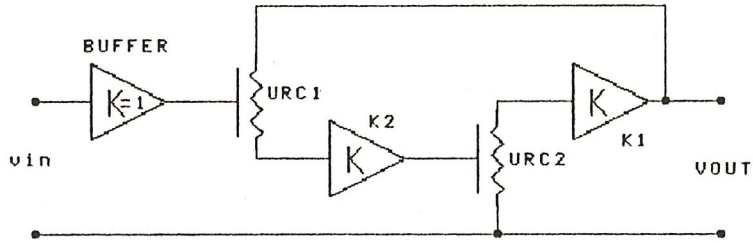
$$S_{\frac{T(s)}{K}} = \frac{\cosh^2 P(1+\alpha) - 1}{\cosh^2 P(1+\alpha) - \alpha \cosh P + \alpha - 1} \dots (6.18)$$



รูปที่ 6.8 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

สำหรับวงจรรองความถี่สูงแบบแอกทิฟดิสทริบิวท์อาชีในรูปแบบที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย Op-amp จำนวน 2 ตัว และ URC จำนวน 2 ตัวสามารถเขียนเป็นวงจรถัดได้ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = SR_1C_1$, $P_2 = SR_2C_2$ จากวงจรรูปที่ 6.5 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

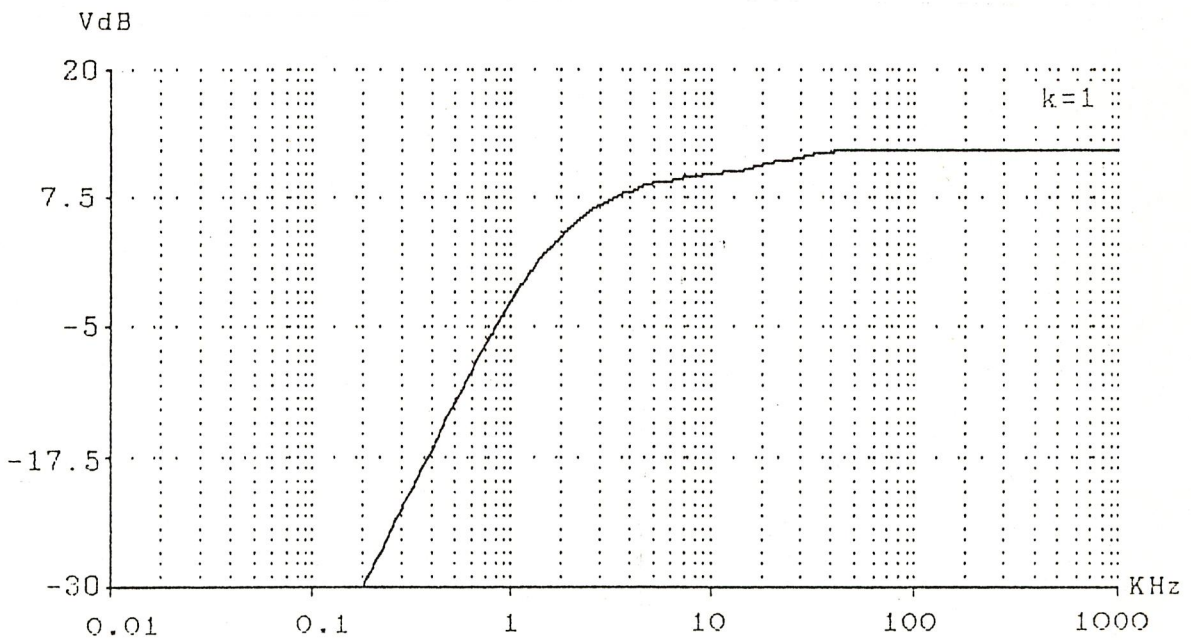
$$T(s) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1) (\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)} \dots (6.19)$$



รูปที่ 6.9 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (6.19) จะได้

$$T(S) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P - 1)^2}{\cosh^2 P - K_1 K_2 (\cosh P - 1)} \quad \dots (6.20)$$



รูปที่ 6.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (6.20) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 6.10 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $w = 0.96$, ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะไม่มีผลต่อผลตอบสนองทางขนาด

จากวงจรในรูปที่ 6.9 เราจะหาค่าเห็นขั้วขิตวิติของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยอัตราขยายมีค่า $K_1 = K_2$ ฉะนั้นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (6.19) จะได้

$$T(s) = \frac{K_1 K_2 (\cosh P_1 - 1)(\cosh P_2 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 (\cosh P_2 - 1)} \quad \dots (6.21)$$

เมื่อหาเห็นขั้วขิตวิติในสมการ (6.21) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเห็นขั้วขิตวิติของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

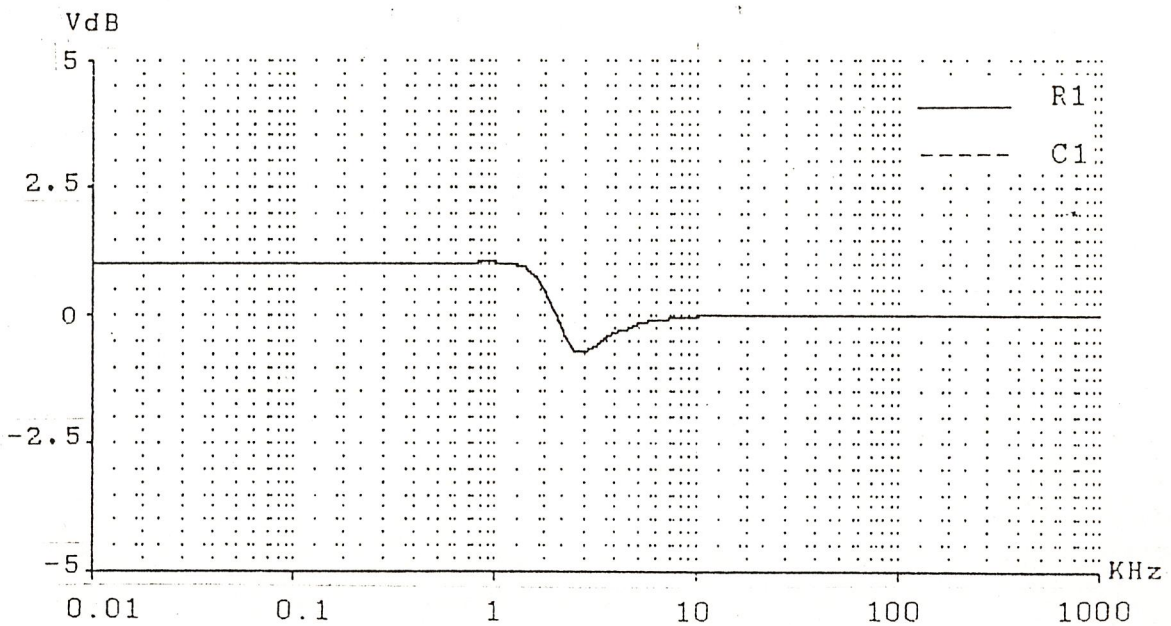
$$S_{R_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} P_1 \sinh P_1 \left[\frac{(1 - K_1 K_2) \cosh P_1 + K_1 K_2}{(\cosh P_1 - 1)(\cosh^2 P_1 - K_1 K_2 \cosh P_1 + K_1 K_2)} \right] \quad \dots (6.22)$$

$$S_{R_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} P_2 \sinh P_2 \left[\frac{\cosh P_2}{(\cosh P_2 - 1)(\cosh^2 P_2 - K_1 K_2 \cosh P_2 + K_1 K_2)} \right] \quad \dots (6.23)$$

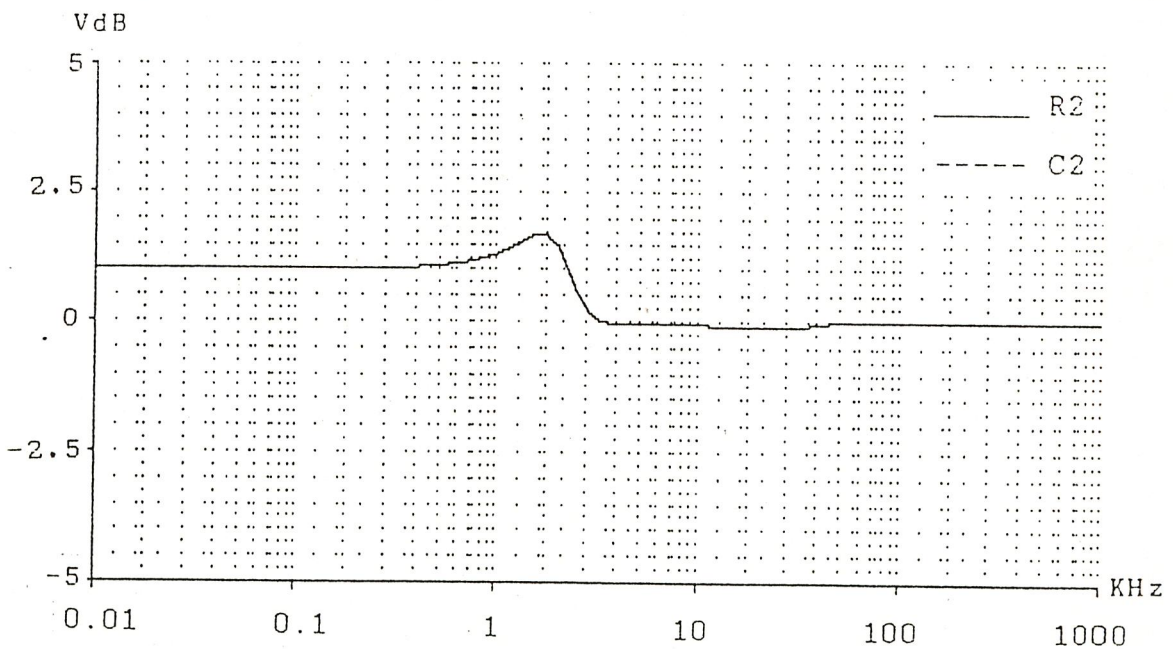
$$S_{C_1}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} P_1 \sinh P_1 \left[\frac{(1 - K_1 K_2) \cosh P_1 + K_1 K_2}{(\cosh P_1 - 1)(\cosh^2 P_1 - K_1 K_2 \cosh P_1 + K_1 K_2)} \right] \quad \dots (6.24)$$

$$S_{C_2}^{T(\infty)} = \frac{1}{2} P_2 \sinh P_2 \left[\frac{\cosh P_2}{(\cosh P_2 - 1)(\cosh^2 P_2 - K_1 K_2 \cosh P_2 + K_1 K_2)} \right] \quad \dots (6.25)$$

จากสมการ (6.22)-(6.25) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้เห็นขีตวิติของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 6.11a และ R_2, C_2 ดังแสดงในรูปที่ 6.11b ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ช่วงความถี่ส่งผ่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเห็นขีตวิติที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่ $w = \text{infinity}$ ค่าเห็นขีตวิติจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเห็นขีตวิติของ R_1, C_1 จะมีค่าต่ำกว่า C_2, R_2



รูปที่ 6.11a แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1

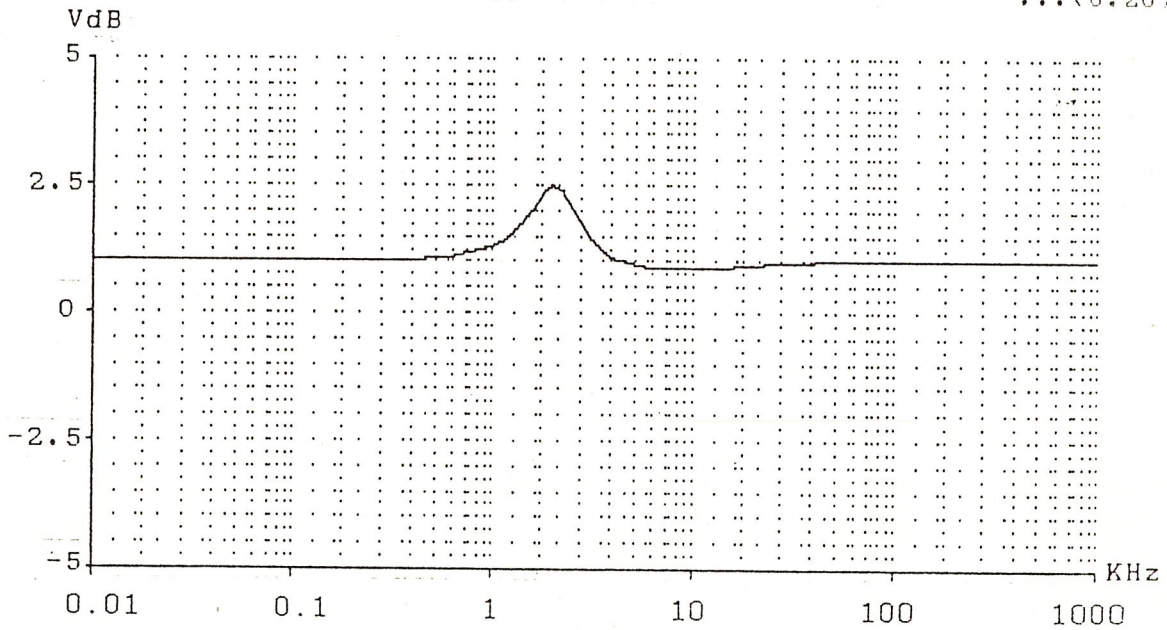


รูปที่ 6.11b แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_2, C_2

ค่าเห็นสิทธิวัตของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 6.9 เมื่อ K เป็น Amplifer ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (6.2) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเห็นสิทธิวัตของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_K^{T(s)} = \frac{\cosh P_1 \cosh P_2}{\cosh P_1 \cosh P_2 - K_1 K_2 \cosh P + K_1 K_2}$$

... (6.26)



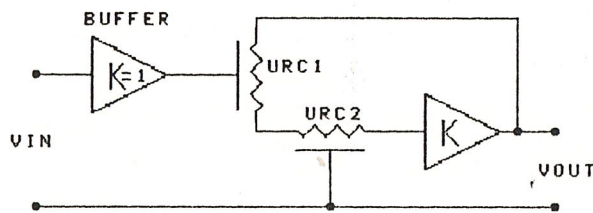
รูปที่ 6.12 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

บทที่ 7

การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

สำหรับวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์อาซีสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = SR_1C_1$, $P_2 = SR_2C_2$ จากวงจรในรูปที่ 6.1 Voltage Transfer Function สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$T(S) = \frac{K(\cosh P_1 - 1)}{\cosh P_1 \cosh P_2 + \frac{R_1}{R_2} \cosh^2 P_2 - \frac{R_1}{R_2} - K} \dots(7.1)$$

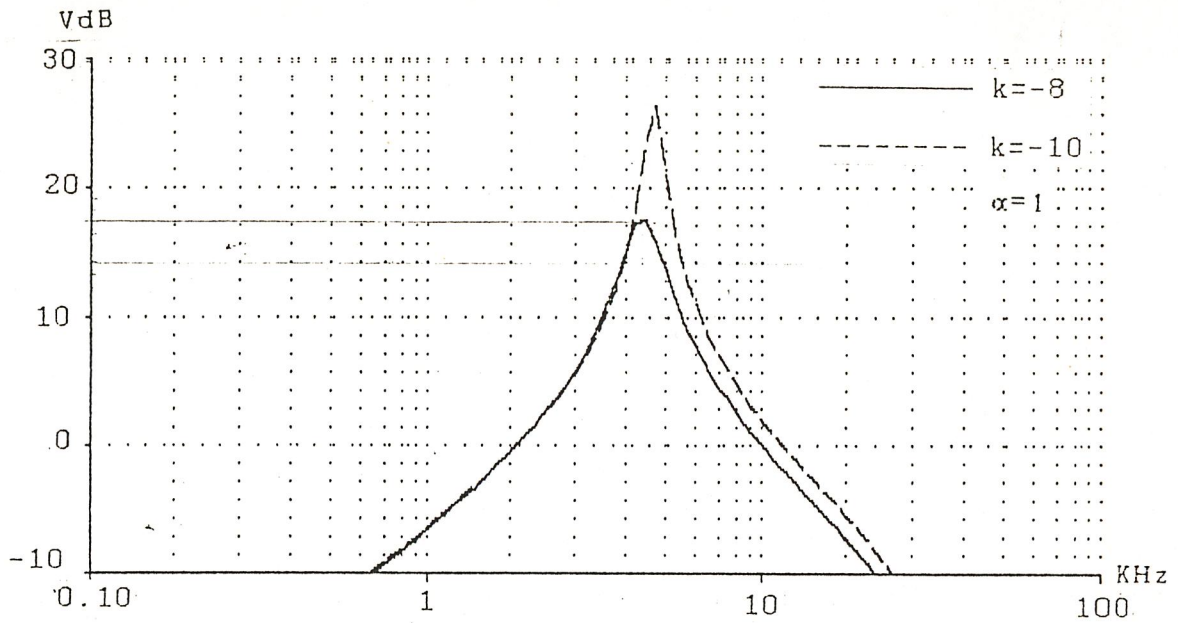


รูปที่ 7.1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์อาซี

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (7.1) จะได้

$$T(s) = \frac{K(\cosh P - 1)}{\cosh^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \left(K + \frac{R_1}{R_2} \right)} \dots(7.2)$$

จากสมการ (7.2) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = -8$ และ -10 , กำหนดค่า $\alpha = 1$ โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ผลตอบสนองทางขนาดดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

จากวงจรในรูปที่ 7.1 เราจะหาค่าเห็นชีวิติตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยอัตราขยายมีค่า $K = 1$ ฉะนั้นทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (7.1) จะได้

$$T(s) = \frac{K \sinh P_2 (\cosh P_1 - 1)}{\sinh P_2 (\cosh P_2 \cosh P_1 - K) + \sqrt{R_1 C_2} \sinh P_1 (\cosh^2 P_2 - 1)} \dots (7.3)$$

$$\sqrt{R_2 C_1}$$

เมื่อหาเห็นชีวิติตีในสมการ (6.5) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2 / R_1$ จะได้ค่าเห็นชีวิติตีของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

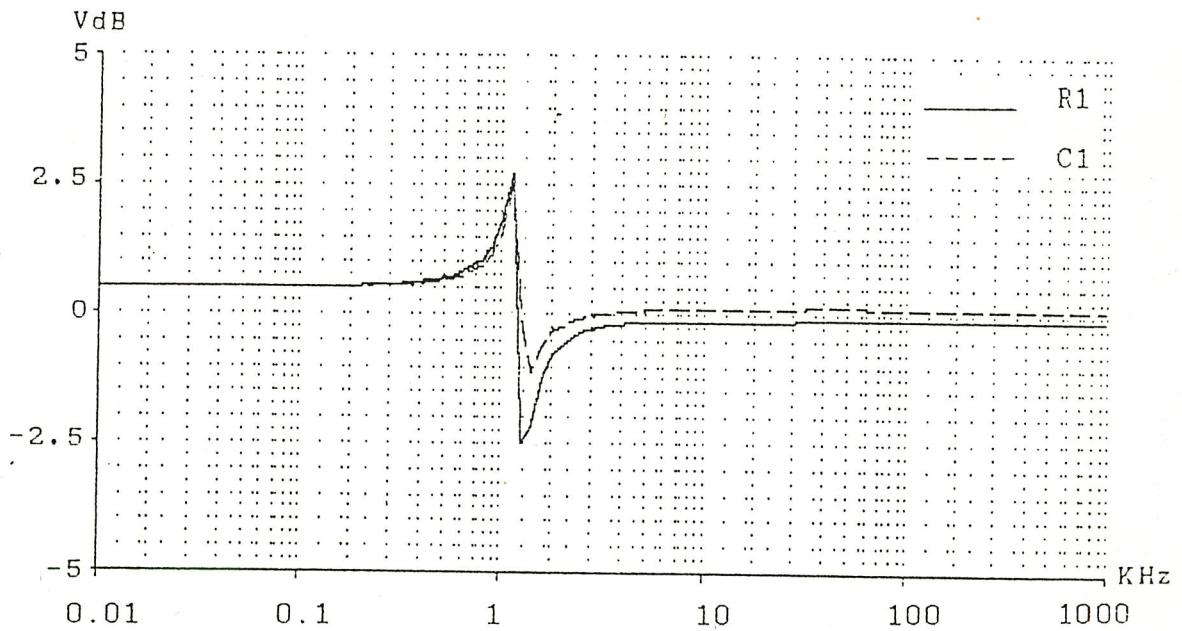
$$S_{R_1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P}{(\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \cosh P \sinh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P + 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (7.4)$$

$$S_{R_2}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - P \cosh P \sinh P (\alpha + 2) + \alpha (\cosh^2 P - K) P \coth P - (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (7.5)$$

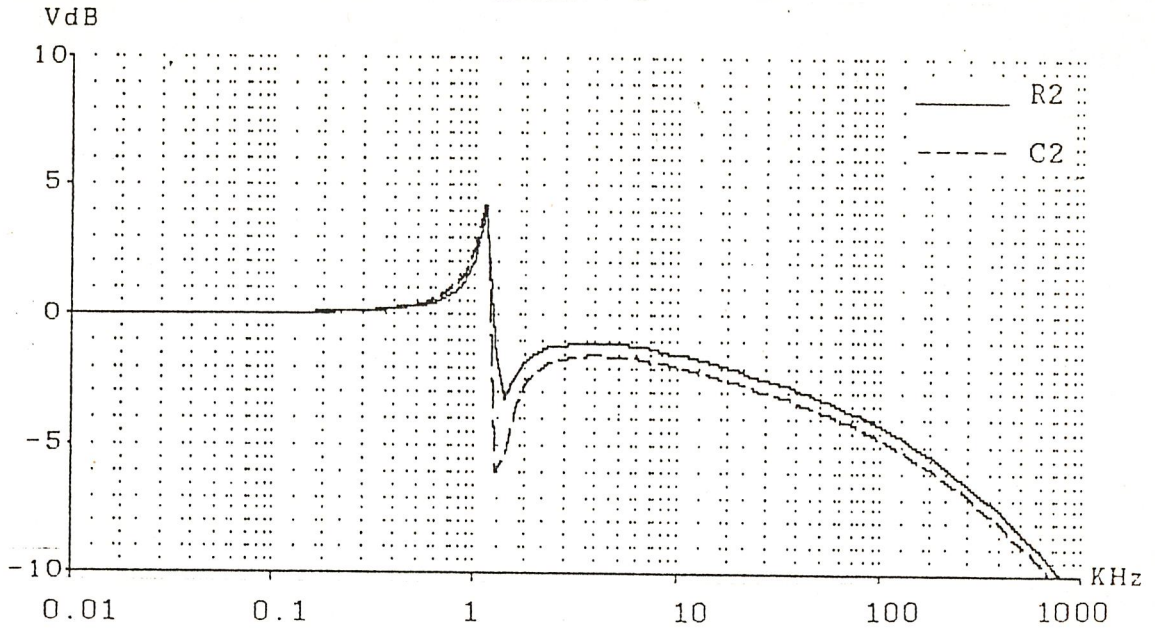
$$S_{c_1}^{T(\omega)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \sinh P - \alpha P \sinh P \cosh P + (\cosh^2 P - 1)(P \coth P - 1)}{(\cosh P - 1) \alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (7.6)$$

$$S_{c_2}^{T(\omega)} = \frac{1}{2} \left[\frac{P \coth P - \frac{P_2 \cosh P \sinh P (\alpha + 2) + \alpha (\cosh^2 P - K) P \coth P + (\cosh^2 P - 1)}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)}}{\alpha (\cosh^2 P - K) + (\cosh^2 P - 1)} \right] \dots (7.7)$$

จากสมการ (7.4)-(7.7) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1$ จะได้เห็นชีวิตัวของอิลิเมนต์ R_1, C_1 แสดงดังในรูปที่ 7.3a และ R_2, C_2 แสดงในรูปที่ 7.3b



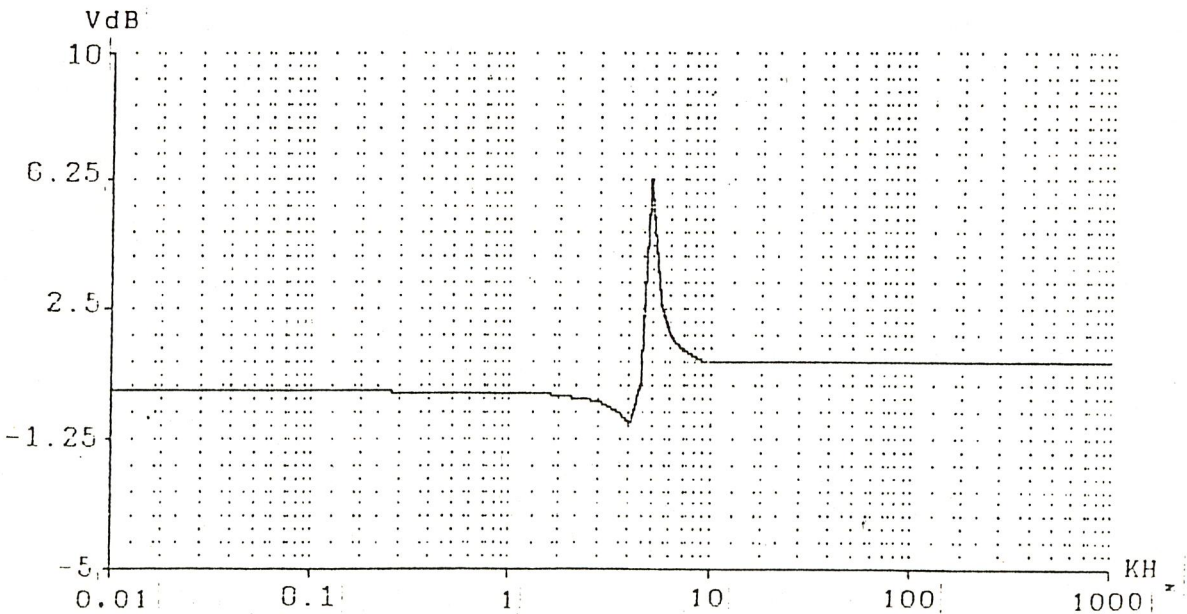
รูปที่ 7.3a แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1



รูปที่ 7.3b แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_2, C_2

ค่าเห็นขีตวิติของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 7.1 เมื่อ K เป็น Amplifer ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (7.2) แล้วกำหนดให้ $K = -10$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเห็นขีตวิติของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_{\mathbf{k}}^{T(s)} = \frac{(\alpha+1)\cosh^2 P - 1}{(\alpha+1)\cosh^2 P - \alpha - 1} \dots(7.8)$$



รูปที่ 7.4 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

บทที่ 8

ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice ทำการ Simulate เพื่อหา Frequency response หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ Frequency Response ที่ได้จากการทดลอง ที่วัดจากเครื่อง Network Analyser โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกเป็นผลการทดลองของวงจร Low Pass Filter ในส่วนที่ 2 จะเป็นผลการทดลองของวงจร High Pass Filter และในส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดลองของวงจร Band Pass Filter ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี

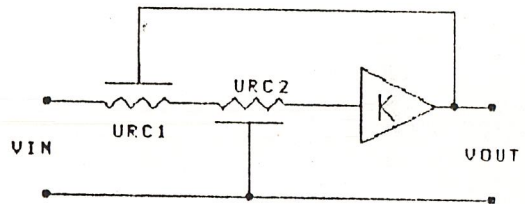
8.1 Low Pass Filter แบบที่ 1

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

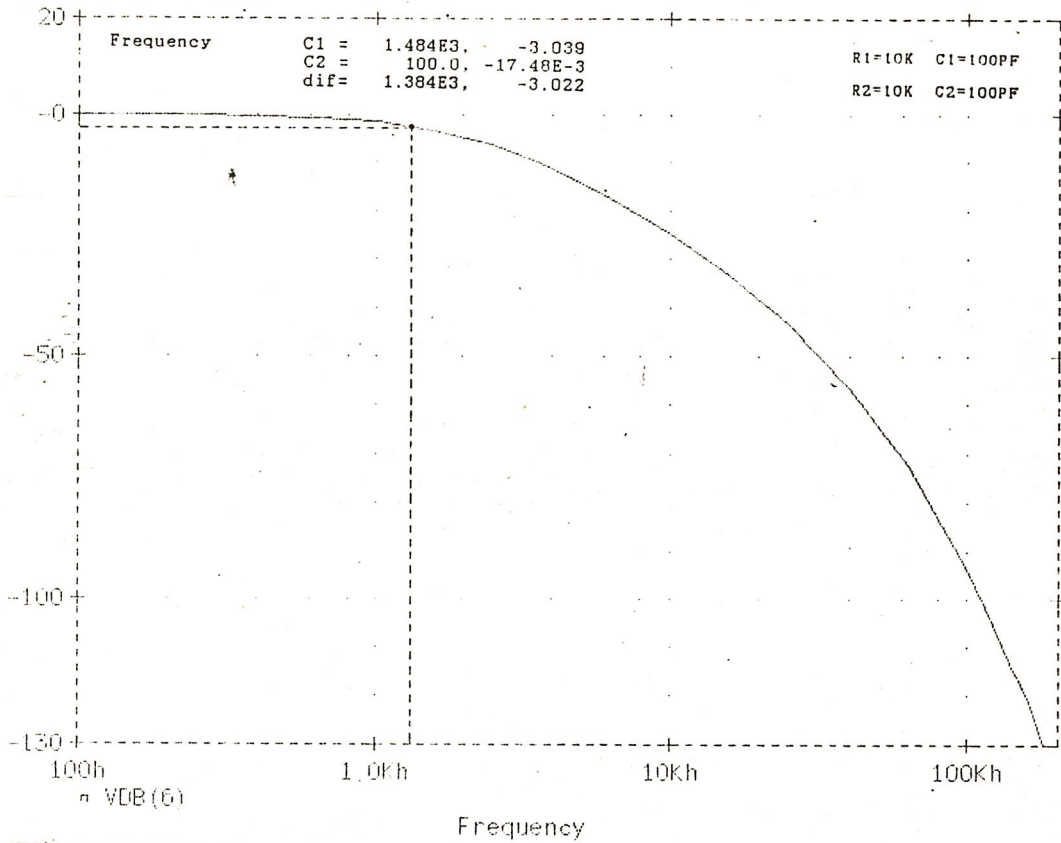
**URC1_12.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XURC1 1 3 2 URC1
XURC2 2 0 4 URC1
XBUFFER2 4 3 BUFFER
XBUFF1 3 6 BUFFER
RL 6 0 100
.AC DEC 5 100 200KHZ
.PLOT AC VDB(6)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```



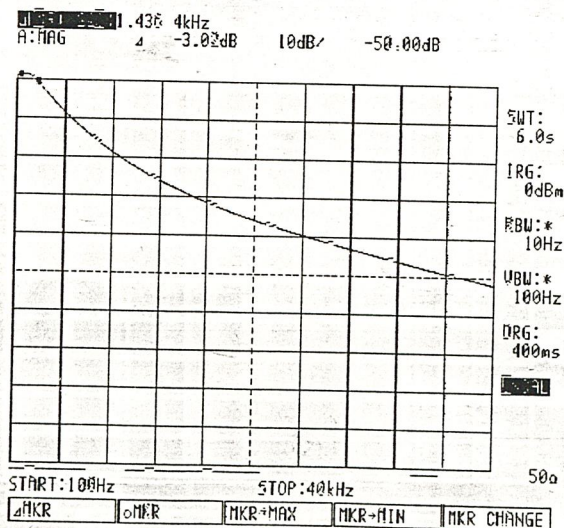
Frequency Response ที่ได้จาก การ Simulate แสดงดังรูป 8.1

**URCI_12.CIR
Date/Time run: 03/16/94 01:14:30 Temperature: 27.0



รูปที่ 8.1

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2

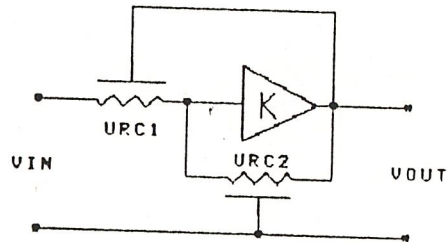
8.2 Low Pass Filter แบบที่ 2

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

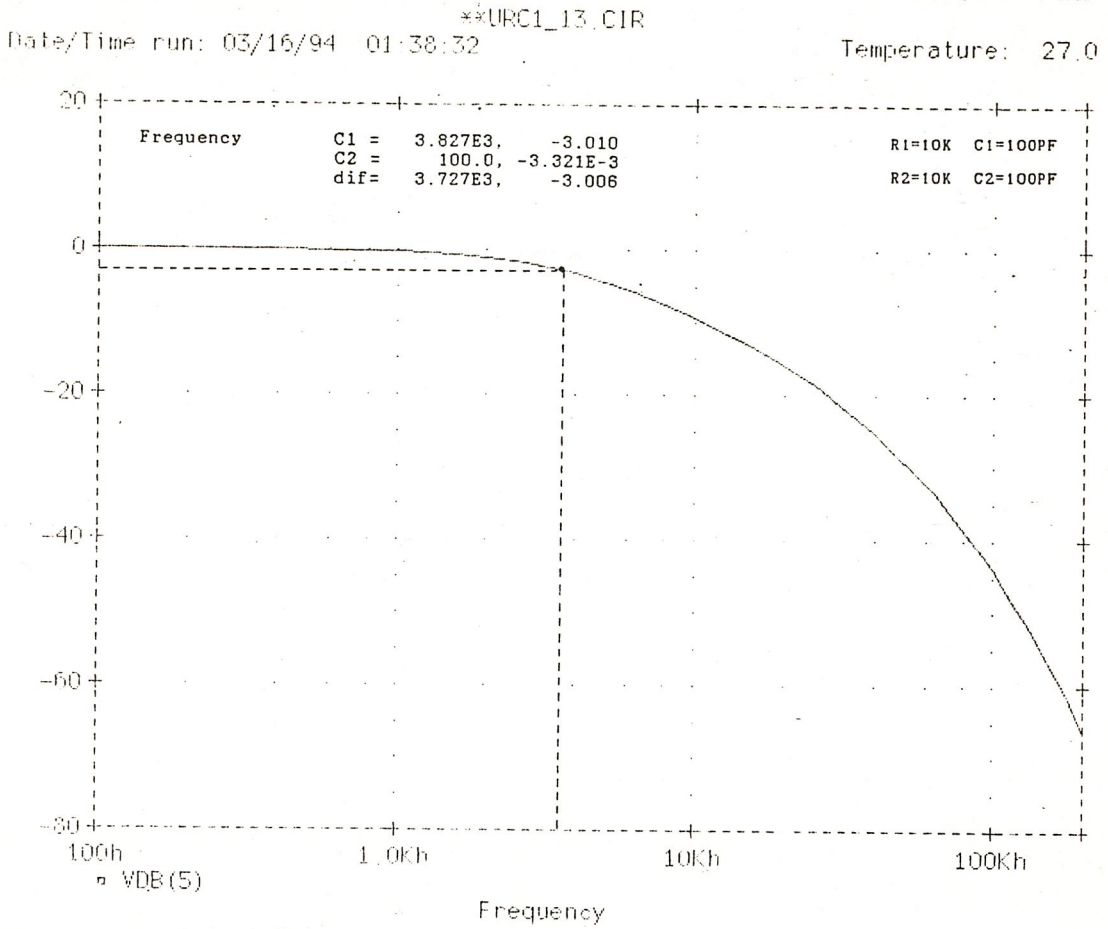
```

**URC1_13.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XURC1 1 3 2 URC1
XURC2 2 0 3 URC1
XBUFF2 2 3 BUFFER
XBUFF1 3 5 BUFFER
RL 5 0 100
.AC DEC 5 100 200KHZ
.PLOT AC VDB(5)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```

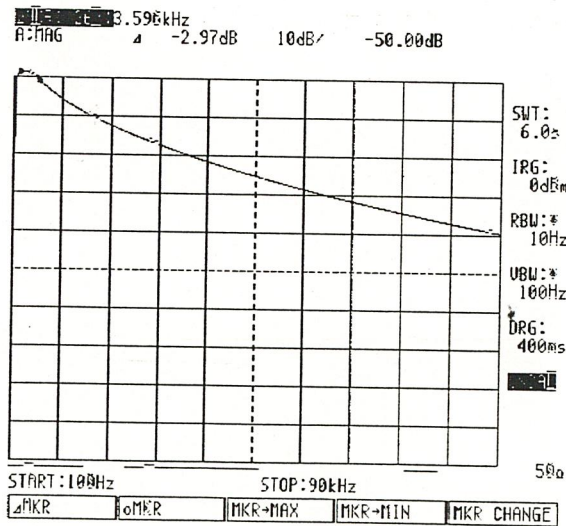


Frequency Response ที่ได้จากการ Simulate แสดงดังรูป 8.3



รูปที่ 8.3

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4

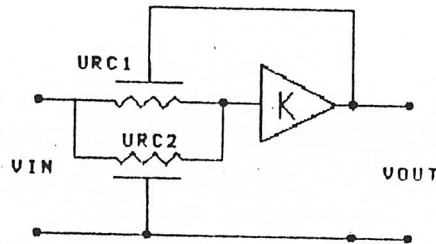
8.3 Low Pass Filter แบบที่ 3

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

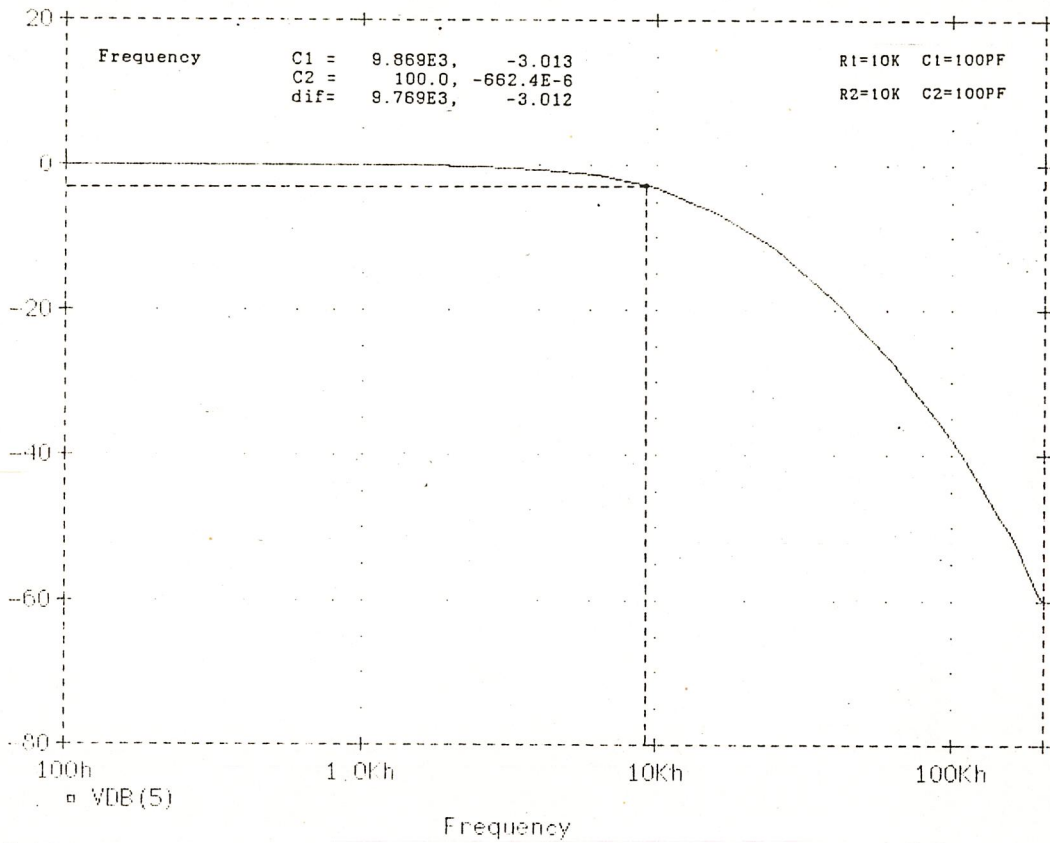
URC1_14.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XURC1 1 3 2 URC1
XURC2 1 0 2 URC1
XBUFF2 2 3 BUFFER
XBUFF1 3 5 BUFFER
RL 5 0 100
.AC DEC 5 100 200KHZ
.PLOT AC VDB(5)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```



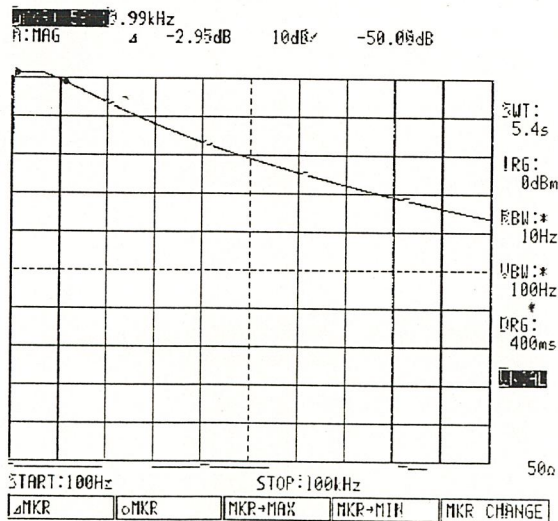
Frequency Response ที่ได้จาก การ Simulate แสดงดังรูป 8.5

URC1_14.CIR
 Date/Time run: 03/16/94 01:48:25 Temperature: 27.0



รูปที่ 8.5

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6

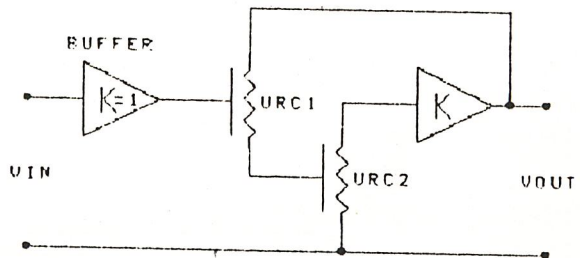
8.4 High Pass Filter แบบที่ 1

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

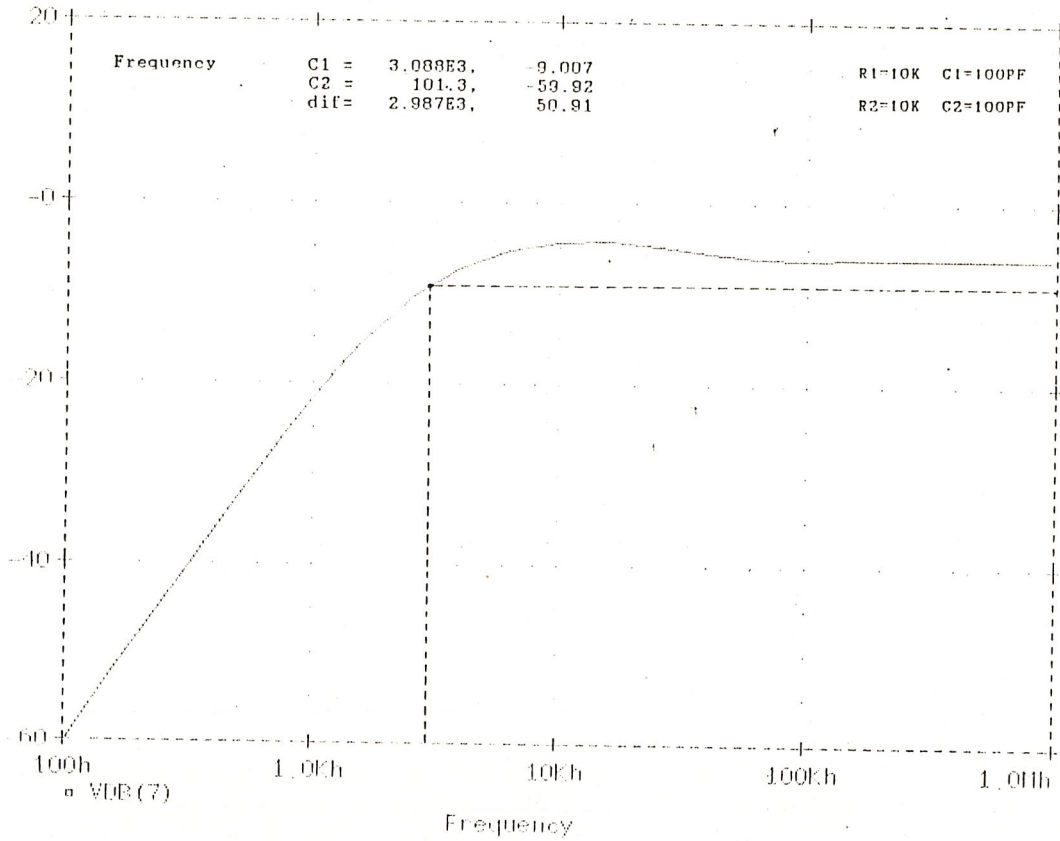
**URC2_11.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XBUFF1 1 2 BUFFER
XURC1 3 2 4 URC1
XURC2 5 4 0 URC1
XBUFF3 5 3 BUFFER
XBUFF2 3 7 BUFFER
RL 7 0 100
.AC DEC 5 100 1MEGHZ
.PLOT AC VDB(7)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```



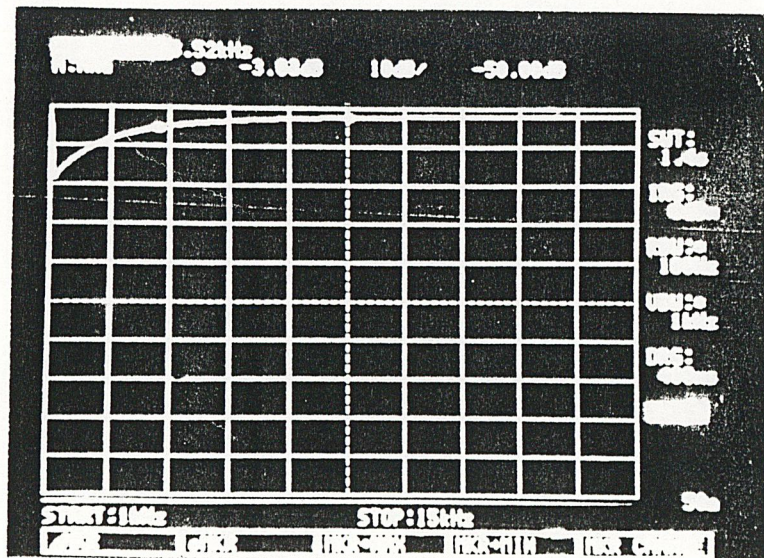
Frequency Response ที่ได้จากการ Simulate แสดงดังรูป 8.7

Date/Time run: 03/16/94 01:59:20 **URC2_11.CIR Temperature: 27.0



รูปที่ 8.7

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.8



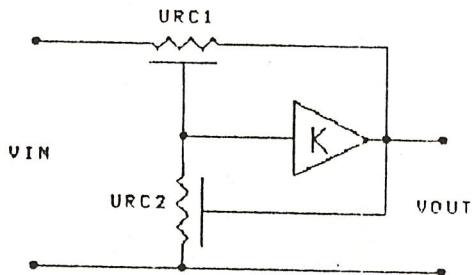
รูปที่ 8.8

8.5 High Pass Filter แบบที่ 2

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

URC2_12.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XBUFF1 1 8 BUFFER
XURC1 8 3 2 URC1
XURC2 0 2 3 URC1
XBUFF3 3 2 BUFFER
XBUFF2 2 7 BUFFER
RL 7 0 100
.AC DEC 5 100 1MEGHZ
.PLOT AC VDB(7)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END
    
```

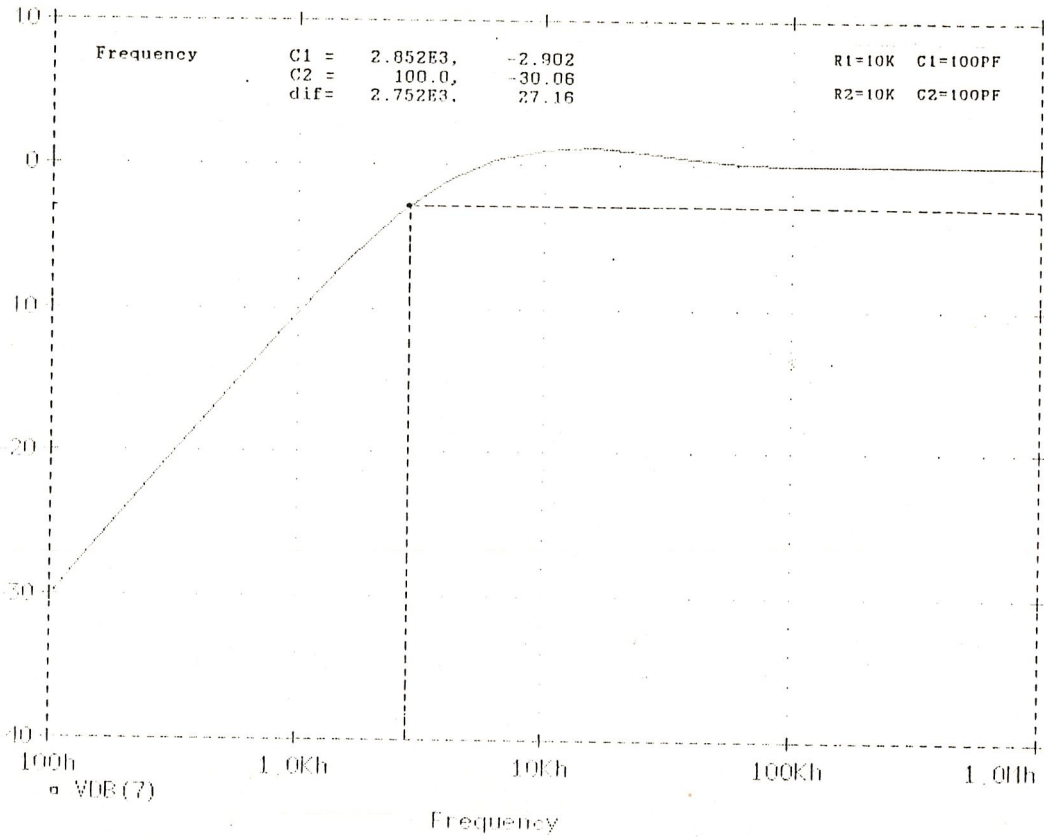


Frequency Response ที่ได้จากการ Simulate แสดงดังรูป 8.9

URL2_12.CIR

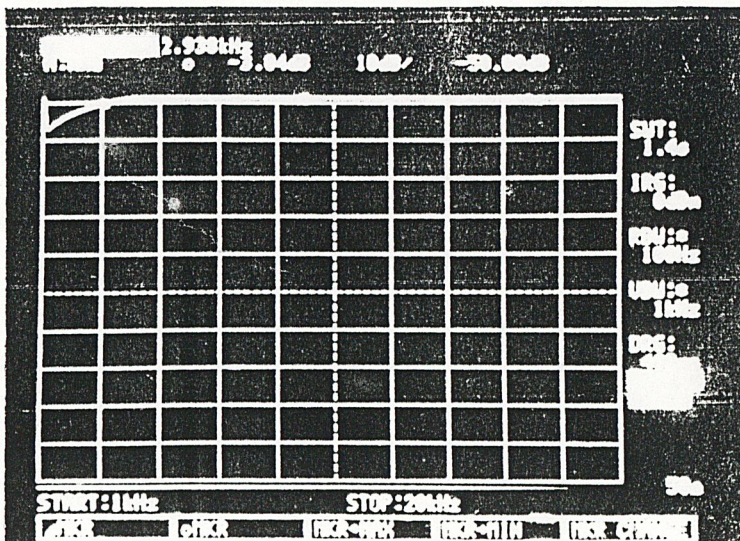
Date/Time run: 03/16/94 02:05:19

Temperature: 27.0



รูปที่ 8.9

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10

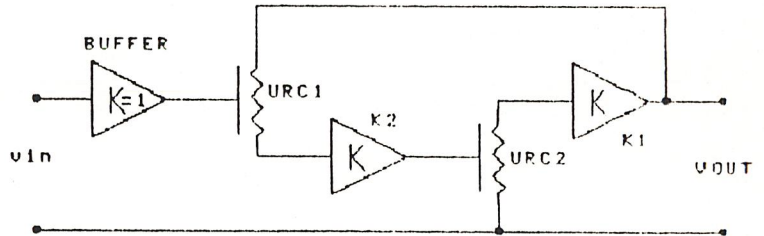
8.6 High Pass Filter แบบที่ 3

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

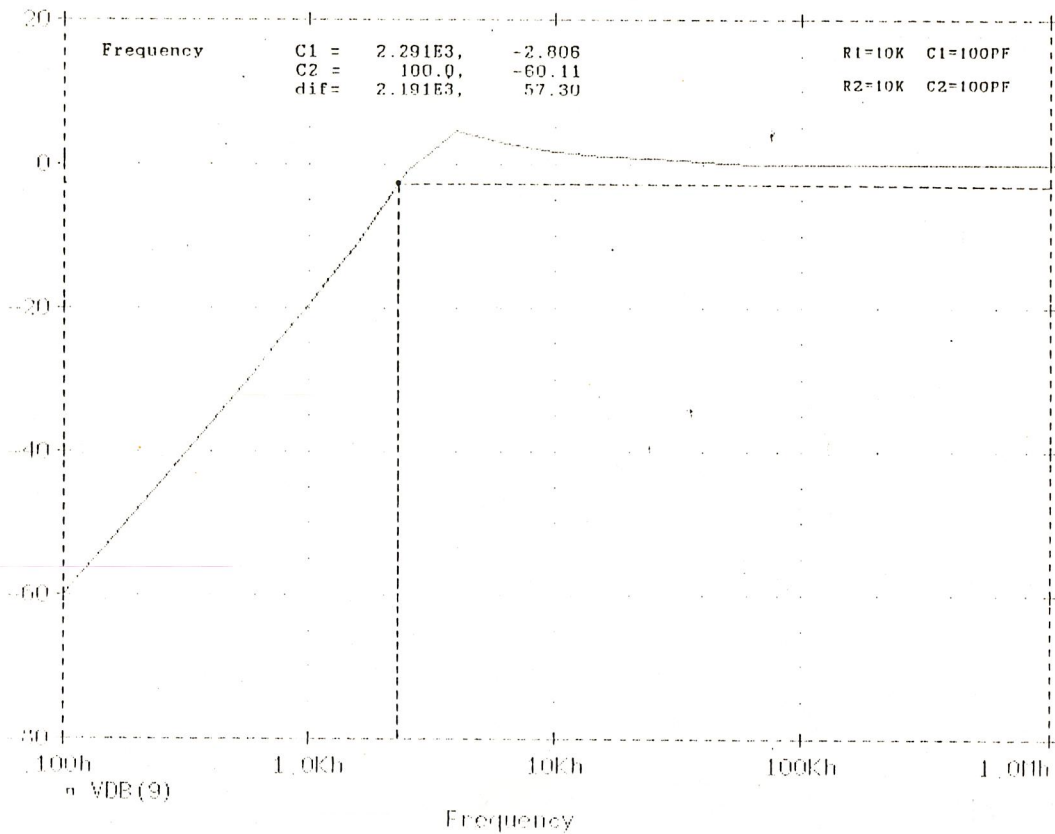
URC2_13.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 5K
R2 4 5 10K
R3 5 6 10K
R4 6 7 10K
R5 7 8 10K
R6 8 9 10K
R7 9 10 10K
R8 10 11 10K
R9 11 12 10K
R10 12 13 10K
R11 13 3 5K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XBUFF1 1 2 BUFFER
XURC1 3 2 4 URC1
XBUFF3 4 6 BUFFER
XURC2 7 6 0 URC1
XBUFF4 7 3 BUFFER
XBUFF2 3 9 BUFFER
RL 9 0 100
.AC DEC 5 100 1MEGHZ
.PLOT AC VDB(9)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```



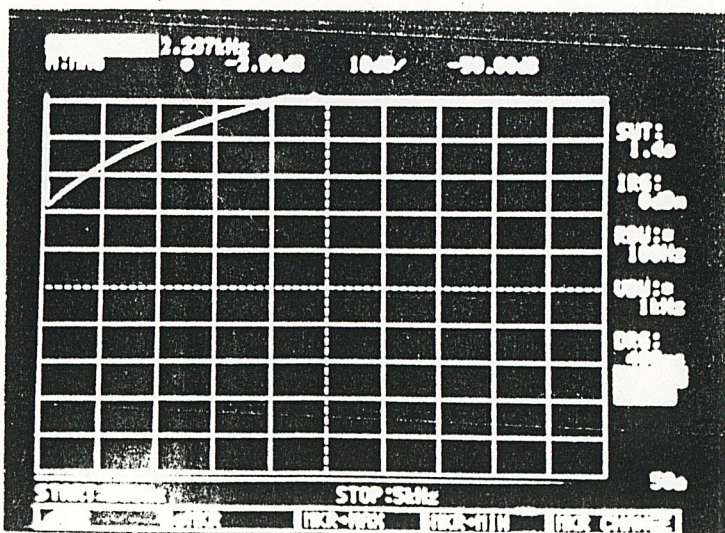
Frequency Response ที่ได้จากการ Simulate แสดงดังรูป 8.11

URC2_13.CIR
 Date/Time run: 03/16/94 02:25:44 Temperature: 27.0



รูปที่ 8.11

ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 8.12



รูปที่ 8.12

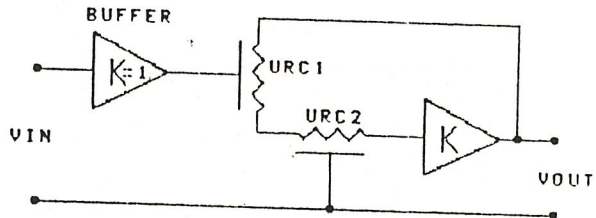
8.7 Band Pass Filter

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

```

URC3_11.CIR
*****
* SUBCIRCUIT OF BUFFER *
*****
.SUBCKT BUFFER 1 2
RIN1 1 2 1E6
ROUT1 2 4 1
EOP1 4 0 1 2 6E4
.ENDS BUFFER
*****
* SUBCIRCUIT OF GAIN *
*****
.SUBCKT GAIN 2 1 3
RIN2 2 1 1E6
ROUT2 3 4 1
EOP2 4 0 2 1 6E4
.ENDS GAIN
*****
* SUBCIRCUIT OF URC1 *
*****
.SUBCKT URC1 1 2 3
R1 1 4 4.1K
R2 4 5 8.2K
R3 5 6 8.2K
R4 6 7 8.2K
R5 7 8 8.2K
R6 8 9 8.2K
R7 9 10 8.2K
R8 10 11 8.2K
R9 11 12 8.2K
R10 12 13 8.2K
R11 13 3 4.1K
C1 4 2 100P
C2 5 2 100P
C3 6 2 100P
C4 7 2 100P
C5 8 2 100P
C6 9 2 100P
C7 10 2 100P
C8 11 2 100P
C9 12 2 100P
C10 13 2 100P
.ENDS URC1
VIN 1 0 AC 1
XBUFF1 1 2 BUFFER
XURC1 9 2 3 URC1
XURC2 3 0 4 URC1
XBUFF2 4 5 BUFFER
XGAIN 0 6 9 GAIN
RI 5 6 1K
RF 6 9 10K
XBUFF3 9 7 BUFFER
RL 7 0 100
.AC DEC 50 100 100KHZ
.PLOT AC VDB(7)
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE
.END

```

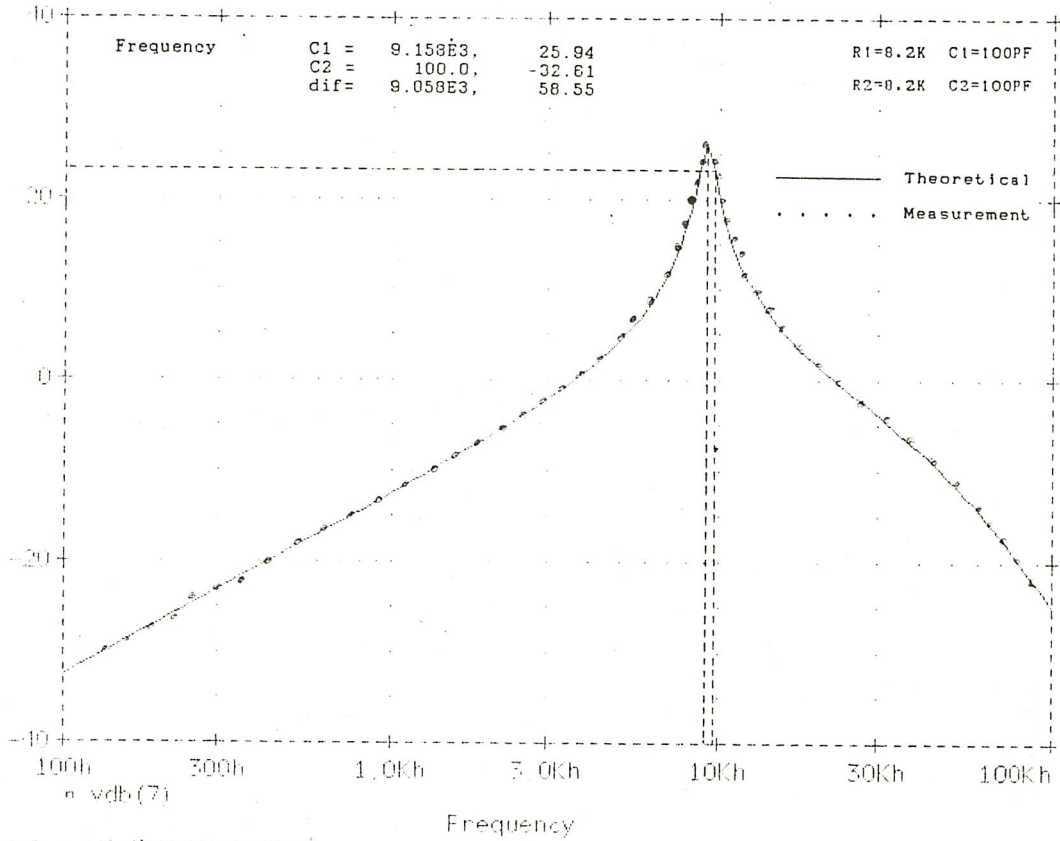


Frequency Response ที่ได้จากการ Simulate และการทดลอง แสดงดังรูป 8.13

UR03_11.CIR

Date/Time run: 03/16/94 07:10:54

Temperature: 27.0



รูปที่ 8.13

บทสรุป

วงจรรวมที่ผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีที่มีขนาดเล็กกว่าและมีความหนาแน่นสูงกว่าวงจรรวมที่เป็นพวกลัมดีอิลีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบวงจรรองความถี่ในจำนวนอิลีเมนต์ที่เท่ากันวงจรรวมแบบแอกทีฟติสวจรรองความถี่ต่ำ , วงจรรองความถี่สูง และวงจรรองแถบความถี่ผ่าน โดยที่ในแต่ละวงจรรวมมีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดค่าของคุณลักษณะผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามต้องการ โดยที่วงจรรวมดังกล่าวจะมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำ ซึ่งในแต่ละแบบจะมีค่าความไวแตกต่างกันส่วนค่า Parasitic Capacitors ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์ออสซิลเลเตอร์กับ Substrate ของไอซีนั้น ในวงจรรองความถี่ต่ำ , วงจรรองความถี่สูง และวงจรรองแถบความถี่ผ่าน จะไม่ผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจรรวม จึงสามารถนำวงจรรวมดังกล่าวไปผลิตขึ้นตามกรรมวิธี LSI ที่มีขนาดเล็กมากได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. นิกร สุขุมตันติ , ผศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช , อ.จักรี
ทิฆภาคย์วิศิษฐ์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาการ ตลอดจนช่วยแนะนำและให้คำ
ปรึกษา ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรมทุกท่านที่ให้คำชี้แนะ และช่วยเหลือ
จนทำให้ปริญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. อติคม ฤกษ์บุตร , "คู่มือการใช้ SPICE เบื้องต้น พร้อมตัวอย่างโปรแกรมใช้งาน",
วิทยาลัยมหานคร., 2535
2. ทฤษฎีโครงข่ายไฟฟ้าและสายส่ง (Networks & Transmission Lines Theory)
ถวิล กิ่งทอง
3. Muhammad H. Rashid, "SPICE for Circuit and Electronics Using
P Spice" , Prentice Hall., 1990
4. PAUL W. TUINENGA , Spice A Guide to Circuit Simulation and
Analysis Using P Spice
5. Mitsuo Teramoto , Shirou sudo, Active distributed RC
anitalasing/smoothing filter
6. Analog Filter Design, M.E. VAN VALKENBURG
Department of Electrical Engineering University of Illinois at
Urbana-Champaign