

# การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบเมอร์โรเมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้

DESIGN OF MURROMAF FILTERS WITH  
PREASSIGNED PAIRS OF TRANSMISSION ZEROS  
AT FINITE PRESCRIBED FREQUENCIES

ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

YUTTAPONG RUNGSUNSERI

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ. ดร. ไพรัช ธีชัยพงษ์

Prof. Dr. Pairash Thajchayapong

*B.Sc. (1<sup>st</sup> Hons, London)*

*A.C.G.I., Ph.D. (Cantab)*

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทคัดย่อ	iii
ABSTRACT	iv
บทนำ	1
<b>บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้น</b>	<b>3</b>
1.1 ผลตอบสนองของเนตเวิร์คฟังก์ชัน	3
1.2 การประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด	5
1.3 ฟังก์ชันบิดเตอร์เวิร์ธ	7
1.4 ฟังก์ชันแบบบิดเตอร์เวิร์ธซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีไรต์ได้	9
1.5 ฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ	10
<b>บทที่ 4 การลดอำนาจจerkของควมถี่</b>	<b>12</b>
2.1 วงจรซัลเลนและคีย์	13
2.1.1 วงจรซัลเลนและคีย์ลำดับที่สอง	13
2.1.2 วงจรซัลเลนและคีย์ลำดับที่สาม	16
2.2 วงจรบ็อคเตอร์	17
2.2.1 วงจรบ็อคเตอร์ลำดับที่สอง	17
2.2.2 วงจรบ็อคเตอร์ลำดับที่สาม	20
2.3 การสเกล	24
2.3.1 การสเกลทางควมถี่	24
2.3.2 การสเกลทางขนาด	24
<b>บทที่ 3 การออกแบบวงจrkของควมถี่แบบเมอร์โรแมฟ</b>	<b>26</b>
<b>ซึ่งสามารถกำหนดควมถี่ซีไรต์ได้</b>	
3.1 การออกแบบฟังก์ชัน	26
3.2 ผลตอบสนองเฟสและเวลาหน่วง	32
3.3 ตัวอย่างการออกแบบ	34
3.4 การแปลงควมถี่	57

บทที่ 4 กาสทตลอดวงจจ	60
บทที่ 5 บทสรุป	64
กติกษอมปะกาศ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	67
ภาคผนวกที่ 1 คู่มือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป	68
ภาคผนวกที่ 2 รายละเอียดของโปรแกรม	85
ไฟล์ที่ 1 : MURROMAF.PAS	85
ไฟล์ที่ 2 : APPROX.PAS	87
ไฟล์ที่ 3 : RESPONSE.PAS	93
ไฟล์ที่ 4 : BOCTOR.PAS	97
ไฟล์ที่ 5 : POLRT.PAS	104
ภาคผนวกที่ 3 ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ	108

## บทคัดย่อ

ในอดีตที่ผ่านมา เราคุ้นเคยกับวงจรรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ธ ซึ่งให้ผลตอบสนองขนาดแบนราบเรียบที่สุดในย่านผ่านสัญญาณ การสร้างวงจรใช้วิธีคาสเคดด้วยวงจรลำดับที่สอง ทำให้มีอัตราการค้ำทอเฟที่ค่อนข้างต่ำ แต่อาจทำให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนวงจรที่นำมาคาสเคดกัน

ต่อมา ในปี ค.ศ. 1977 มีนักวิจัย 2 ท่านชื่อ ไบอี่ และ ฟรีโมลี (*MARIO BIEY and AMEDEO PREMOLI*) ได้ค้นพบวงจรรองความถี่ชนิดใหม่ เรียกว่า แบบเมอร์โรแมฟ (*MURROMAF*) ซึ่งให้สมรรถนะการลดทอนสัญญาณดีกว่าแบบบัตเตอร์เวิร์ธ โดยวิธีการช้อนรากจริงของฟังก์ชันให้สามารถนำไปสร้างวงจรด้วยวิธีคาสเคดวงจรลำดับที่สาม ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบในจำนวนวงจรที่เท่ากัน แบบเมอร์โรแมฟย่อมมีอัตราการค้ำทอเฟสูงกว่าแบบบัตเตอร์เวิร์ธแน่นอน

อย่างไรก็ตาม วงจรรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟก็มีข้อเสียที่อัตราการค้ำทอเฟยังไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งไม่สามารถกำหนดให้เกิดการลดทอนสัญญาณสูงสุดที่ความถี่ใด ๆ ที่ต้องการได้ จึงไม่อาจนำไปใช้กำจัดสัญญาณรบกวนรอบความถี่นั้น ๆ วิทยานิพนธ์นี้ ได้ค้นพบวิธีการใหม่ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยคิดวิธีการออกแบบวงจรรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรในย่านหยุดสัญญาณได้หลายจุดพร้อมกัน อันมีผลให้อัตราการค้ำทอเฟของวงจรมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งสามารถเลือกกำจัดสัญญาณรบกวนรอบ ๆ ความถี่ที่ต้องการได้หลายจุด จึงเป็นวงจรรองความถี่ที่มีประโยชน์ในการใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

## ABSTRACT

The well-known Butterworth filter is normally realized by cascading second-order blocks. In 1977, Mario Biey and Amedeo Premoli introduced a new class of filter, known as the MURROMAF (multiple-real-root maximally flat). The main feature of this type of filter is that it is realized by third-order blocks. This is possible because of the coincident multiple real pole nature of the approximating function. In comparison with the classical Butterworth filter, MURROMAF offers a shaper cutoff rate for the same number of building blocks.

However the MURROMAF filter still has relatively low cutoff rate due to its all-pole nature. Secondly, the noises around a prescribed frequency cannot be suppressed either. To solve these problems, this thesis proposes a design technique for a MURROMAF filter with preassigned pairs of transmission zeros at finite prescribed frequencies. It provides the advantages of a shaper cutoff and also an effective noise suppression around particular frequencies. Hence, a new class of RC-active filters.

## บทนำ

การออกแบบวงจรกรองความถี่ชนิดใหม่ จำเป็นจะต้องเริ่มจากการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่ให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ในรูปแบบที่ต้องการ สัมพันธ์กับรูปแบบการสร้างวงจร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่ชนิดใหม่ ที่เรียกว่า **วงจรถองความถี่แบบเมอส์โรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโอดี** โดยอ้างอิงกับวิธีการสร้างวงจรแบบคาสเคดด้วยวงจรแอกทีฟ RC เพื่อความเข้าใจที่สมบูรณ์ ต่อความเป็นมาของการค้นพบวงจรถองความถี่นี้ จึงได้แบ่งเนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น 5 บท ดังนี้

**บทที่ 1** เป็นการอ้างอิงถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ควรทำความเข้าใจเป็นอันดับแรก ได้แก่ เรื่องการพิจารณาผลตอบสนองของเนทเวิร์คฟังก์ชัน และหลักการประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด (maximally flat approximation) ต่อจากนั้น จึงกล่าวถึงฟังก์ชันกรองความถี่ 3 ชนิด ซึ่งเป็นที่มาของการค้นพบฟังก์ชันใหม่ในที่นี้ ประกอบด้วย ฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ, ฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ธซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโอดี และฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ

**บทที่ 2** พิจารณาถึงการสร้างวงจรจริง (realisation) โดยวิธีการคาสเคดด้วยวงจรแอกทีฟ RC 2 ประเภท ได้แก่ วงจร**ซัลเลนและคีย์** (Sallen and Key) และวงจร**บ็อคเตอร์** (Boctor) ทั้งที่เป็นวงจรถองความถี่ลำดับที่สอง (second-order) และวงจรถองความถี่ลำดับที่สาม (third order) เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการสร้างวงจรถองความถี่ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่กำหนด

**บทที่ 3** จึงเป็นการอธิบายวิธีการทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันแบบใหม่ที่ต้องการอย่างละเอียด เริ่มจากการหาทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรถองความถี่ด้วยวิธีการประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด แล้วจึงพิจารณาผลตอบสนองอื่น ๆ ที่ตามมา พร้อมทั้งตัวอย่างการออกแบบ ตอนท้ายของบทนี้ยังได้กล่าวถึงวิธีการแปลงความถี่ เพื่อหาฟังก์ชันกรองความถี่สูงผ่านจากฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านที่หามาได้อีกด้วย

**บทที่ 4** เป็นการแสดงผลการทดลองของตัวอย่างฟังก์ชันที่ออกแบบขึ้นตัวอย่างหนึ่ง เพื่อยืนยันว่าฟังก์ชันชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานในเชิงปฏิบัติได้จริง

บทที่ 5 เป็นบทสุดท้าย ที่สรุปผลและวิจารณ์ถึงข้อดีและข้อเสียของฟังก์ชันแบบใหม่นี้ ตลอดจนเสนอแนะแนวทางการวิจัยที่สามารถพัฒนาต่อไปได้

และเพื่อให้ผู้อ่านที่สนใจจะนำวงจรรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ไปใช้งาน จึงได้เพิ่มภาคผนวก ซึ่งประกอบด้วยคู่มือการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ตลอดจนรายละเอียดของตัวโปรแกรม (source-listing) ให้อีกด้วย



## บทที่ 1

### ความรู้เบื้องต้น

การออกแบบวงจรกรองความถี่ จะต้องเริ่มต้นจากการหาฟังก์ชันกรองความถี่ที่ให้ผลตอบสนองขนาดใกล้เคียงกับฟังก์ชันในอุดมคติมากที่สุด กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันที่ยอมให้สัญญาณความถี่ในย่านผ่านสัญญาณ (passband) ผ่านออกไปโดยไม่มีการสูญเสียหรือผิดเพี้ยน และสามารถกำจัดสัญญาณความถี่ในย่านหยุดสัญญาณ (stopband) ได้โดยสิ้นเชิง แต่เนื่องจากวงจรใด ๆ สามารถแทนได้แต่เฉพาะฟังก์ชันที่อยู่ในรูปโพลีโนเมียลเศษส่วนเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลตอบสนองชนิดต่าง ๆ ของฟังก์ชันชนิดนี้ และวิธีการประมาณฟังก์ชันเศษส่วนให้มีผลตอบสนองขนาดในลักษณะที่ใกล้เคียงกับฟังก์ชันกรองความถี่ในอุดมคติ

#### 1.1 ผลตอบสนองของเนทเวิร์คฟังก์ชัน [8], [10], [15]

ผลตอบสนองของเนทเวิร์คฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่

- ผลตอบสนองขนาด (Magnitude Response)
- ผลตอบสนองเฟส (Phase Response)
- ผลตอบสนองเวลาหน่วง (Time Delay Response)

ผลตอบสนองทั้งสามชนิดนี้จะถูกพิจารณาเปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงไปก่อนอื่น จะพิจารณาความสัมพันธ์ของผลตอบสนองขนาดและเฟสกับตำแหน่งโพลและซีโรของเนทเวิร์คฟังก์ชันใด ๆ

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของเนทเวิร์คทั่วไป สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$G(s) = H \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_n)} \quad (1.1.1)$$

โดยที่

$H =$  อัตราขยาย ซึ่งมีค่าคงที่

$z_i (i=1,2,\dots,m) =$  ตำแหน่งซีโรอันดับที่  $i$

$p_i (i=1,2,\dots,n) =$  ตำแหน่งโพลอันดับที่  $i$

พิจารณาผลตอบสนองในภาวะเสถียรของสัญญาณรูปไซน์ ซึ่ง  $s$  มีค่าเท่ากับ  $j\omega$

$$G(j\omega) = H \frac{(j\omega - z_1)(j\omega - z_2) \cdots (j\omega - z_m)}{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \cdots (j\omega - p_n)} \quad (1.1.2)$$

ถ้าให้  $s_i$  แทน  $z_i$  หรือ  $p_i$  โดยที่

$$s_i = \alpha_i + j\beta_i$$

จะได้แต่ละเทอมของซีโรหรือโพลเป็น

$$(j\omega - s_i) = -\alpha_i + j(\omega - \beta_i) = M_i e^{j\theta_i}$$

ซึ่งมีขนาด

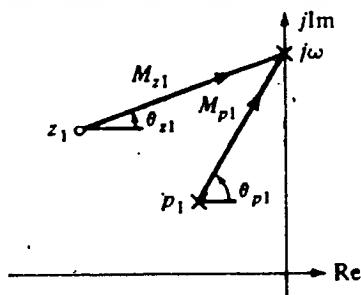
$$M_i = \sqrt{\alpha_i^2 + (\omega - \beta_i)^2}$$

และเฟส

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{\omega - \beta_i}{-\alpha_i}$$

สมการ (1.1.2) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= H \frac{M_{z1} e^{j\theta_{z1}} M_{z2} e^{j\theta_{z2}} \cdots M_{zm} e^{j\theta_{zm}}}{M_{p1} e^{j\theta_{p1}} M_{p2} e^{j\theta_{p2}} \cdots M_{pn} e^{j\theta_{pn}}} \\ &= H \frac{M_{z1} M_{z2} \cdots M_{zm}}{M_{p1} M_{p2} \cdots M_{pn}} e^{j(\theta_{z1} + \theta_{z2} + \cdots + \theta_{zm} - \theta_{p1} - \theta_{p2} - \cdots - \theta_{pn})} \\ &= M(\omega) e^{j\theta(\omega)} \end{aligned} \quad (1.1.3)$$



รูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออาจสรุปได้ว่าผลตอบสนองขนาด  $M(\omega)$  คือค่าของ  $H$  คูณกับผลคูณของขนาดของเวกเตอร์ที่ลากจากตำแหน่งซีโรไปยังความถี่  $\omega$  บนแกนจินตภาพ ทหารด้วยผลคูณของเวกเตอร์ที่ลากจากตำแหน่งที่ลากจากตำแหน่งโพลไปยังความถี่  $\omega$  เดียวกัน ส่วนผลตอบสนองเฟส  $\theta(\omega)$  คือผลรวมของมุมเวกเตอร์ซีโรลบด้วยผลรวมของมุมเวกเตอร์โพล ดังแสดงในรูปที่ 1.1

ผลตอบสนองเวลาหนึ่ง หาได้จากการพิจารณาสัญญาณในโดเมนของเวลา โดยสมมติสัญญาณอินพุต  $v_1$  ซึ่งป้อนให้กับเนทเวิร์คที่มีค่าหนึ่งเวลา  $D$  จึงจะให้สัญญาณเอาต์พุต  $v_2$  นั่นคือ

$$v_2(t) = v_1(t - D) \quad (1.1.4)$$

เนื่องจากสัญญาณใด ๆ เกิดจากองค์ประกอบของสัญญาณรูปไซน์เสมอ จึงกำหนด

$$v_1 = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.1.5)$$

ดังนั้น

$$v_2 = A \sin[\omega(t - D) + \phi]$$

หรือ

$$v_2 = A \sin(\omega t - \omega D + \phi) \quad (1.1.6)$$

จาก (1.1.5) และ (1.1.6) จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตมีเฟสต่างจากสัญญาณอินพุต คือ

$$\theta = -\omega D \quad (1.1.7)$$

นิยามของฟังก์ชันหนึ่งเวลาได้จากการหาอนุพันธ์ของ (1.1.7) เทียบกับ

$$D = \frac{-d\theta}{d\omega} \quad (1.1.8)$$

ดังนั้น ผลตอบสนองเวลาหนึ่ง ก็คือค่าลบของการอนุพันธ์ผลตอบสนองเฟสนั่นเอง

## 1.2 การประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด [11]

การประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด (Maximally flat magnitude approximation) ทำได้โดยเริ่มพิจารณาจากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันขนาดกับทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของเนทเวิร์คใด ๆ ที่ว่า

$$|N(j\omega)|^2 = N(j\omega)N^*(j\omega) = N(j\omega)N(-j\omega) \quad (1.2.1)$$

แต่เนื่องจาก

$$N(s) = \frac{h_0 + h_1s + h_2s^2 + h_3s^3 + h_4s^4 + \dots}{d_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4 + \dots} \quad (1.2.2)$$

$$N(j\omega) = \frac{h_0 - b_2\omega^2 + h_4\omega^4 - \dots + j(h_1\omega - h_3\omega^3 + \dots)}{d_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots + j(a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots)} \quad (1.2.3)$$

แทนค่า (1.2.3) ลงทางขวามือของ (1.2.1) จะได้คุณสมบัติข้อแรกของ  $|N(j\omega)|^2$  ที่มีค่าเป็นอัตราส่วน

ของโพลีโนเมียลกำลังคู่ จากสมการ (1.2.1) ถ้าให้  $\omega = s/j$  และกำหนดฟังก์ชัน  $T(s^2)$  ดังนี้

$$T(s^2) = |N(j\omega)|^2 \Big|_{\omega=s/j} = N(s)N(-s) \quad (1.2.4)$$

จาก (1.2.4) จะเห็นว่าตำแหน่งโพลและซีโรของ  $T(s^2)$  มีความสมมาตรทางควอดแดรนต์ (quadrantal symmetry) ในระนาบของ  $s$  เสมอ กล่าวคือมีค่าอยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรทั้งทางซีกขวาและซ้ายของระนาบอ้างอิง จากจุดกำเนิด ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นที่ทำให้  $T(s^2)$  มีค่าเท่ากับผลคูณ  $N(s)N(-s)$  โดยทั่วไปโพลีโนเมียล เศษและส่วนของ  $T(s^2)$  สามารถแยกองค์ประกอบได้อยู่ใน 3 รูปแบบดังนี้

- 1)  $s^4 + as^2 + b$  มีรากเป็นจำนวนเชิงซ้อนที่สมมาตรทางควอดแดรนต์
- 2)  $s^2 - a$  ( $a > 0$ ) มีรากเป็นจำนวนจริงที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดไปทางซ้ายและขวาของระนาบเท่ากับ  $\sqrt{a}$
- 3)  $s^2 + a$  ( $a > 0$ ) มีรากเป็นจำนวนจินตภาพบนแกน  $j\omega$  ที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่ากับ  $\sqrt{a}$  เช่นกัน

จากที่กล่าวมา จะเห็นว่าถ้ากำหนดฟังก์ชันขนาดกำลังสอง  $|N(j\omega)|^2$  ของฟังก์ชันเศษส่วน  $N(s)$  มาให้ โดยมีเงื่อนไขว่า

- 1) ฟังก์ชัน  $|N(j\omega)|^2$  เป็นอัตราส่วนของโพลีโนเมียลกำลังคู่ในเทอม  $\omega$
- 2) ฟังก์ชัน  $T(s^2)$  ซึ่งนิยามใน (1.2.4) ต้องมีจำนวนโพลหรือซีโรบนแกน  $j\omega$  เป็นลำดับของเลขจำนวนคู่

เงื่อนไขทั้งสองนี้ยอมพอเพียงสำหรับการแยกองค์ประกอบของ  $T(s^2)$  ให้อยู่ในรูปผลคูณ  $N(s)N(-s)$  โดยการเลือกเอาครึ่งหนึ่งของโพลทั้งหมดจาก  $T(s^2)$  ได้แก่ โพลที่อยู่ทางซีกซ้ายมือของระนาบ กับครึ่งหนึ่งของคู่โพลบนแกน  $j\omega$  ให้เป็นโพลของ  $N(s)$  และในทำนองเดียวกัน ก็เลือกเอาครึ่งหนึ่งของซีโรจาก  $T(s^2)$  ซึ่งอาจจะเป็นซีโรทางซีกซ้ายมือหรือขวามือก็ได้ กับครึ่งหนึ่งของซีโรบนแกน  $j\omega$  ให้เป็นซีโรของ  $N(s)$  การจำกัดให้เลือกใช้โพลทางซีกซ้ายมือของระนาบจาก  $T(s^2)$  นี้เนื่องมาจากการพิจารณาในด้านเสถียรภาพของฟังก์ชันนั่นเอง

ฟังก์ชันขนาดกำลังสองที่อธิบายมานี้สามารถนำไปใช้ได้ทั่วไป สำหรับในที่นี้แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันขนาดกำลังสองที่ซึ่งความถี่ในย่านต่ำ ๆ ตั้งแต่ศูนย์ มีความราบเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งทำได้โดยการให้สมการอนุพันธ์อันดับที่ต่าง ๆ เท่าที่เป็นไปได้ของฟังก์ชันมีค่าเป็นศูนย์ที่  $\omega = 0$  rad/s ฟังก์ชันชนิดนี้เรียกว่า แมกซิแมลลีแฟลท (Maximally Flat) ก่อนอื่น พิจารณาฟังก์ชันขนาดกำลังสอง  $|N(j\omega)|^2$  ในรูปแบบทั่วไปคือ

$$|N(j\omega)|^2 = H^2 \frac{1 + b_1\omega^2 + b_2\omega^4 + \dots}{1 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4 + \dots} \quad (1.2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหารโพลีโนเมียลเศษด้วยโพลีโนเมียลส่วน จะได้

$$|N(j\omega)|^2 = H^2[1 + (b_1 - a_1)\omega^2 + (b_2 - a_2 + a_1^2 - a_1 b_1)\omega^4 + \dots] \quad (1.2.6)$$

และมาพิจารณาอนุกรมแมคลอรีน (MacLaurin series) หรือการกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) รอบจุดกำเนิดของฟังก์ชัน  $F(\omega)$  ใด ๆ ซึ่งอยู่ในรูป

$$F(\omega) = F(0) + \frac{F^{(1)}(0)}{1!}\omega + \frac{F^{(2)}(0)}{2!}\omega^2 + \frac{F^{(3)}(0)}{3!}\omega^3 + \frac{F^{(4)}(0)}{4!}\omega^4 \dots$$

เมื่อ  $F^{(i)}(0)$  คืออนุพันธ์อันดับที่  $i$  ของ  $F(\omega)$  ซึ่งแทนค่า  $\omega=0$  เปรียบเทียบสมการนี้กับสมการของ  $|N(j\omega)|^2$  ใน (1.2.6) จะเห็นว่าเนื่องจากธรรมชาติของ  $|N(j\omega)|^2$  ที่มีอนุพันธ์อันดับจำนวนที่เป็นศูนย์อยู่แล้ว และเพื่อที่จะให้อนุพันธ์อันดับที่สองมีค่าเป็นศูนย์จะต้องให้สัมประสิทธิ์  $a_1$  เท่ากับ  $b_1$  ในทำนองเดียวกัน สำหรับอนุพันธ์อันดับที่สี่จะเป็นศูนย์ต่อเมื่อ  $a_2$  เท่ากับ  $b_2$  เป็นต้น ดังนั้น รูปทั่วไปของฟังก์ชันขนาดกำลังสอง  $|N(j\omega)|^2$  ใน (1.2.5) จะมีความราบเรียบที่สุดก็ต่อเมื่อ

$$a_i = b_i$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เท่าที่จะเป็นไปได้

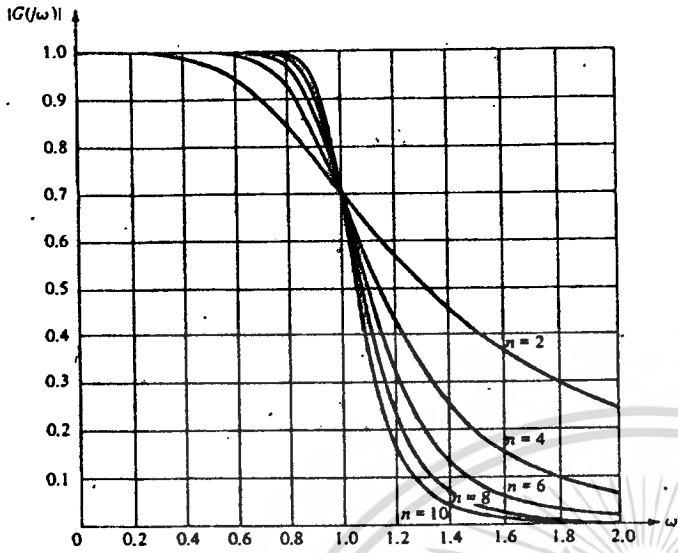
### 1.3 ฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ [8], [9], [11]

ฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ เป็นฟังก์ชันที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันลำดับที่สอง ซึ่งมีรูปแบบฟังก์ชันขนาดกำลังสอง คือ

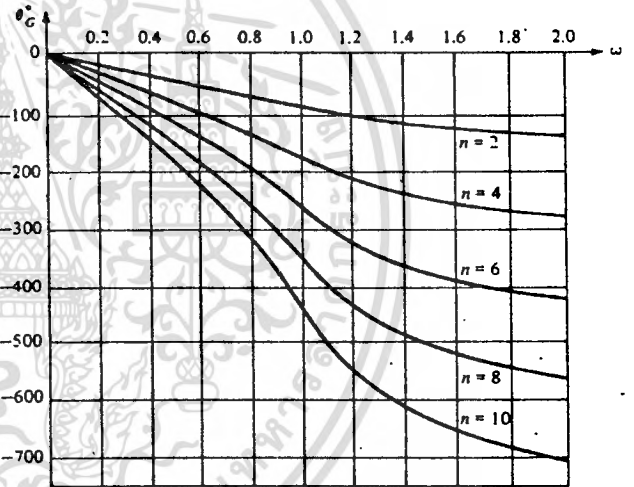
$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}}$$

โดยที่  $n$  เป็นลำดับของฟังก์ชัน ซึ่งอาจเป็นเลขจำนวนคู่หรือจำนวนคี่ก็ได้ โดยถ้า  $n$  เป็นจำนวนคู่ โพลของฟังก์ชันจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนที่จับคู่คอนจูเกตกัน การสร้างวงจรมีวิธีคาดเดาต้องใช้วงจรลำดับที่สองทั้งหมด แต่ถ้า  $n$  เป็นเลขจำนวนคี่ แสดงว่าฟังก์ชันประกอบด้วยโพลจริงหนึ่งโพล กับส่วนที่เหลือซึ่งเป็นโพลเชิงซ้อนที่จับคู่คอนจูเกตกัน การสร้างวงจรมีวิธีคาดเดาจะใช้วงจรลำดับที่สามได้เพียงวงจรถ้วน นอกนั้น ต้องใช้วงจรลำดับที่สอง

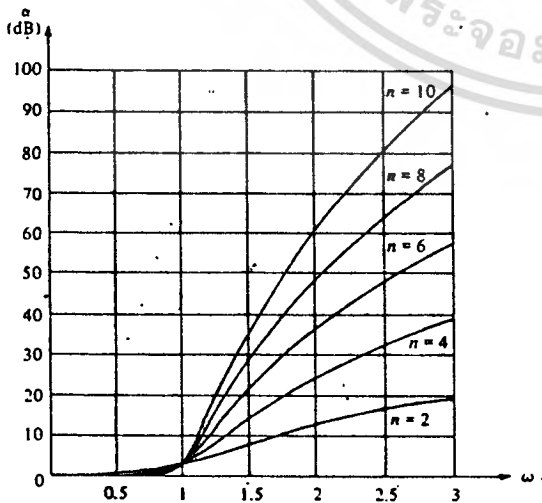
รูปที่ 1.2 แสดงผลตอบสนองขนาดและเฟสของฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธที่ค่า  $n$  ต่าง ๆ กัน



(ก) ผลตอบสนองขนาด



(ข) ผลตอบสนองเฟส



(ค) ผลตอบสนองสูญเสีย

018229

รูปที่ 1.2

#### 1.4 ฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ธซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรว์ได้ [8]

มีรูปแบบฟังก์ชันขนาดกำลังสอง ดังนี้

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{\prod_{i=1}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i}}{\prod_{i=1}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i} + \prod_{i=1}^r (\omega_{0i}^2 - 1)^{2m_i} \omega^{2n}}$$

$r$  = จำนวนตำแหน่งของซีโรว์

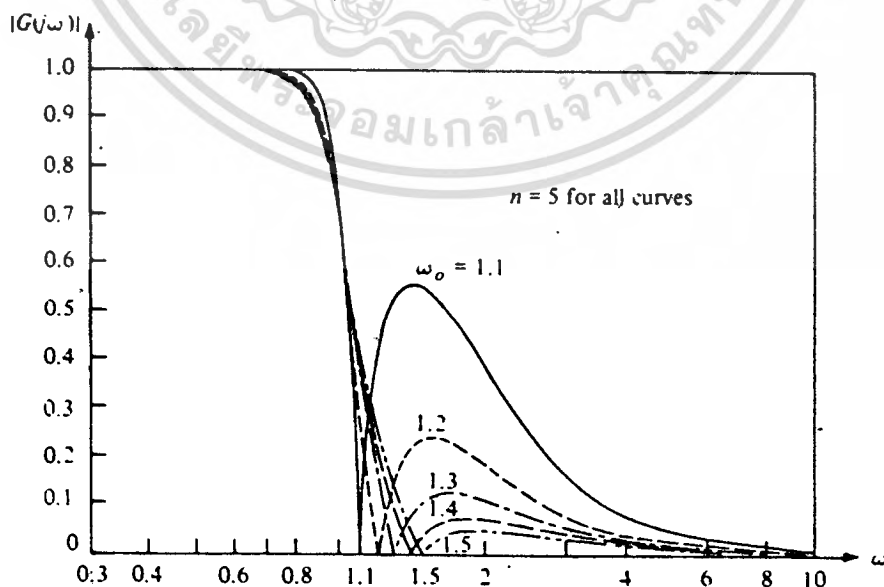
$\omega_{0i}$  = ความถี่ที่กำหนดให้เกิดซีโรว์ตำแหน่งที่  $i$  มีค่ามากกว่า 1 เสมอ

$m_i$  = จำนวนการซ้อนของซีโรว์ในตำแหน่งที่  $i$

$n$  = ลำดับของฟังก์ชัน

ค่าของ  $n$  อาจเป็นจำนวนคู่หรือคี่ก็ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดผลเช่นเดียวกับกรณีฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธที่ได้อธิบายมาแล้ว ตำแหน่งซีโรว์คือค่า  $\omega_{0i}$  ซึ่งสามารถกำหนดได้อย่างอิสระตามความต้องการ เพื่อให้เกิดตำแหน่งที่มีการลดทอนสัญญาณสูงสุด ใช้ประโยชน์ในการกำจัดสัญญาณรบกวนรอบ ๆ ความถี่ที่ทราบค่าได้หลายตำแหน่ง อีกทั้งมีผลให้อัตราการคัทออฟสูงขึ้นอีกด้วย

รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นถึงผลของการเลื่อนตำแหน่งซีโรว์จาก 1.1 ถึง 1.5 ซึ่งมีผลต่อความชันที่จุดคัทออฟ และค่าการลดทอนสัญญาณต่ำสุดในย่านหยุดสัญญาณที่ให้ผลในทางตรงกันข้ามเสมอ ส่วนเฟสของฟังก์ชันในย่านผ่านสัญญาณยังคงเหมือนกับฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ



รูปที่ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ฟังก์ชันเมอริโรแมฟ [2], [3]

ฟังก์ชันเมอริโรแมฟเป็นฟังก์ชันในลักษณะเดียวกันกับฟังก์ชันของบัตเตอร์เวิร์ท ซึ่งปรับปรุงให้สามารถสร้างวงจรแบบคาสเคดด้วยวงจรลำดับที่สามทั้งหมดได้ เพื่อให้มีลำดับของฟังก์ชันที่สูงกว่า ในขณะที่ใช้วงจรส่วนย่อยจำนวนเท่ากัน โดยวิธีการกำหนดให้มีโพลจริงที่ซ้อนอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน เท่ากับจำนวนคู่ของโพลเชิงซ้อน จึงมีรูปแบบของฟังก์ชันขนาดกำลังสอง เป็นดังนี้

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{(1+\alpha^2\omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha\omega)^{2i} \right]}$$

โดยที่

$\mu$  = จำนวนโพลจริงที่ซ้อนกัน

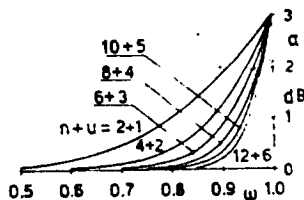
$\alpha$  = ตัวประกอบการสเกล ที่ทำให้  $|G(j\omega)|^2 = 1$

$n$  = จำนวนโพลเชิงซ้อน

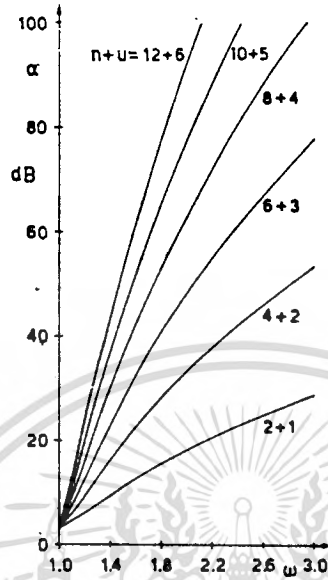
ลำดับของฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ  $n - \mu$  โดยที่  $\mu$  ควรเท่ากับ  $n/2$  เพื่อให้สามารถสร้างวงจรด้วยการคาสเคดส่วนย่อยลำดับที่สามได้ทั้งหมด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์  $a_i$  ( $i=0,1,\dots,n$ ) หาได้จาก

$$a_i = (-1)^i \binom{n+i-1}{i}$$

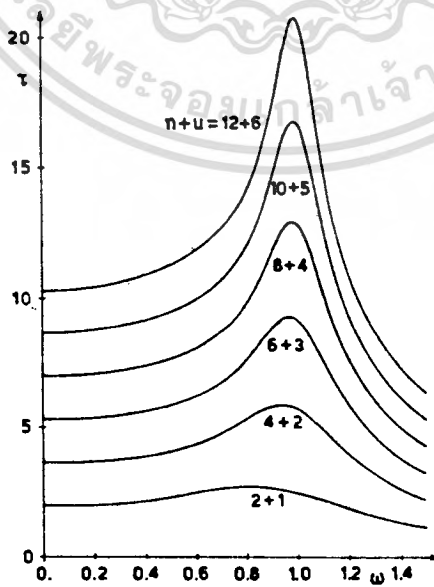
รูปที่ 1.4 แสดงผลตอบสนองสูญเสียของฟังก์ชันเมอริโรแมฟลำดับที่  $n + \mu$  ต่าง ๆ กัน โดยให้  $\mu = n/2$  เสมอ รูป (ก) แสดงผลตอบสนองในย่านผ่านสัญญาณ ส่วนรูป (ข) แสดงในย่านหยุดสัญญาณ สำหรับผลตอบสนองเวลาหนึ่งของฟังก์ชันเมอริโรแมฟลำดับเดียวกันก็ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.5 เช่นกัน



(ก) ย่านผ่านสัญญาณ



(ข) ย่านหยุดสัญญาณ  
รูปที่ 1.4



รูปที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การสร้างวงจรถอดความถี่

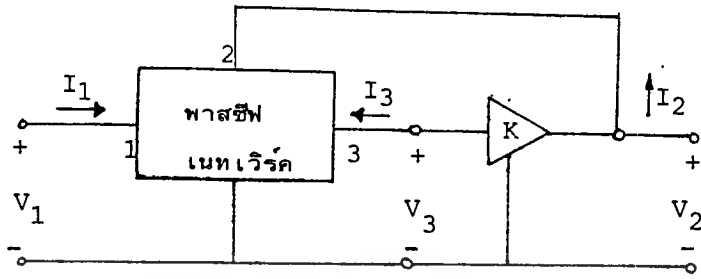
การสร้างวงจรถอดความถี่แบบแอกทีฟ RC สำหรับเนทเวิร์คฟังก์ชันหนึ่ง ๆ อาจทำได้ 2 วิธี คือ

1) **วิธีคาสเคด** โดยการแยกองค์ประกอบของเนทเวิร์คฟังก์ชัน ให้อยู่ในรูปผลคูณของเทอมลำดับที่สอง (second-order) หรือเทอมลำดับที่สาม (third-order) ในกรณีที่มีโพลจริงคู่อยู่ด้วย แต่ละเทอมสามารถนำมาสร้างวงจรถอดความถี่แบบแอกทีฟ RC ที่มีรูปแบบเดียวกันได้ แล้วจึงนำมาคาสเคดด้วยการต่ออนุกรมกัน วิธีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น

- เนื่องจากวงจรถอดความถี่แต่ละส่วนแทนด้วยเทอมลำดับที่สองหรือลำดับที่สามเท่านั้น ทำให้รูปแบบวงจรถอดความถี่ไม่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อย การคำนวณหาค่าอุปกรณ์จึงทำได้ง่าย และสามารถสร้างวงจรถอดความถี่โดยใช้ค่าอุปกรณ์มาตรฐานได้
- แต่ละวงจรถอดความถี่เป็นอิสระต่อกัน สามารถปรับค่าอุปกรณ์ให้ได้คุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดในแต่ละเทอมได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรถอดความถี่อื่น

2) **วิธีโดยตรง** คือการออกแบบวงจรถอดความถี่หนึ่งที่ใช้แทนเนทเวิร์คฟังก์ชันทั้งหมด จึงทำให้รูปแบบวงจรถอดความถี่ซับซ้อน การปรับแต่งค่าอุปกรณ์แต่ละตัวในวงจรถอดความถี่ส่งผลกระทบต่อกัน และรูปแบบของวงจรถอดความถี่จะแตกต่างกันออกไปตามลำดับสูงสุดของเนทเวิร์คฟังก์ชัน

ในที่นี้ เลือกใช้วิธีคาสเคด โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟประเภท VCVS (Voltage Controlled Voltage Source) ซึ่งในเชิงปฏิบัติคือวงจรถอดความถี่ขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสที่ใช้โอเปอเรชันแนล แอมพลิฟายเออร์ (Operational Amplifier) การออกแบบเริ่มจากพิจารณาเนทเวิร์ค 3 พอร์ต (three port network) ที่ต่อร่วมกับ VCVS ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1

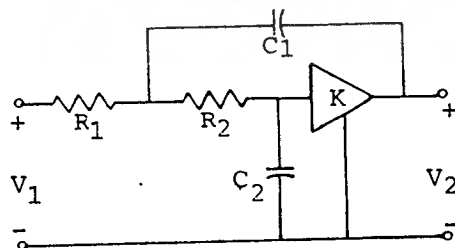
โดยคุณสมบัติของ VCVS ซึ่ง  $I_3(s) = 0$  และ  $V_2(s) = kV_3(s)$  สามารถหาโพลเดจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของรูปที่ 2.1 ได้

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{-KY_{31}(s)}{Y_{33}(s) + KY_{32}(s)}$$

ต่อจากนี้ จะอธิบายถึงรูปแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 2 แบบ แบบแรกเสนอโดย ซัลเลนและคีย์ (Sallen and Key) สำหรับฟังก์ชันที่มีแต่โพลทั้งหมด (all poles function) แบบที่สองเสนอโดย บ็อคเตอร์ (Boctor) สำหรับฟังก์ชันที่มีโพลร่วมกับซีโรบนแกนจินตภาพ พร้อมทั้งวิธีการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในวงจร โดยแต่ละแบบมีทั้งวงจรที่ใช้แทนฟังก์ชันลำดับที่สองและลำดับที่สาม

## 2.1 วงจรซัลเลนและคีย์

### 2.1.1 วงจรซัลเลนและคีย์ลำดับที่สอง [9], [11]



รูปที่ 2.2

โวลเตจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรูปที่ 2.2 คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K1/R_1R_2C_1C_2}{s^2 + (1/R_1C_1 + 1/R_2C_1 + 1/R_2C_2 + K/R_2C_2)s + 1/R_1R_2C_1C_2} \quad (2.1.1)$$

รูปทั่วไปของฟังก์ชันลำดับที่สอง คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{H_0\omega_n^2}{s^2 + (\omega_n/Q)s + \omega_n^2} \quad (2.1.2)$$

โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของ (2.1.1) กับ (2.1.2) จะได้

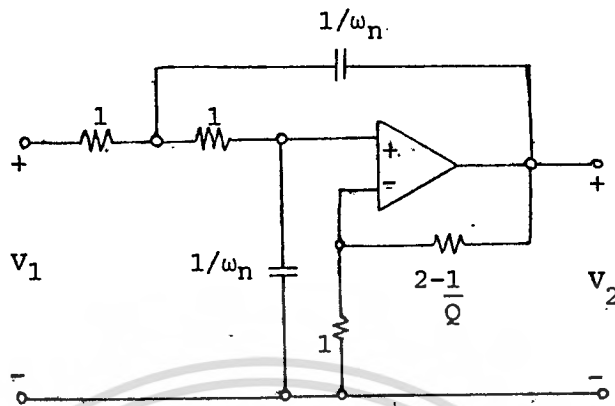
$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \\ \frac{1}{Q} &= \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1} + (1-K)\frac{1}{R_2C_2} \\ H_0 &= K \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องการทราบค่า 5 ตัว ได้แก่  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $K$  ในขณะที่มีเพียง 3 สมการ จึงสามารถกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมได้อย่างอิสระใน 3 ลักษณะ ซึ่งจะทำให้ตัวแปรที่เหลือมีสูตรคำนวณแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับวงจรที่ใช้งานจริงแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

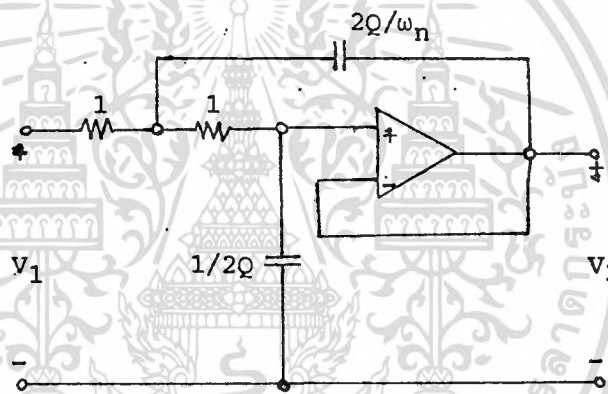
ตารางที่ 2.1 : วงจรซัลเลนและคีย์ลำดับที่สอง

ทางเลือก	เงื่อนไขที่กำหนด	ตัวแปรที่เหลือ
แบบที่ 1	$R_1 = R_2 = 1$ $C_1 = C_2 = C$	$C = 1/\omega_n$ $K = 3-1/Q$
แบบที่ 2	$K = 1$ $R_1 = R_2 = 1$	$C_1 = 2Q/\omega_n$ $C_2 = 1/2Q$
แบบที่ 3	$K = 2$ $R_1C_1 = R_2C_2$ $R_1 = 1$	$C_1 = 1/\omega_n$ $C_2 = 1/Q\omega_n$ $R_2 = Q$

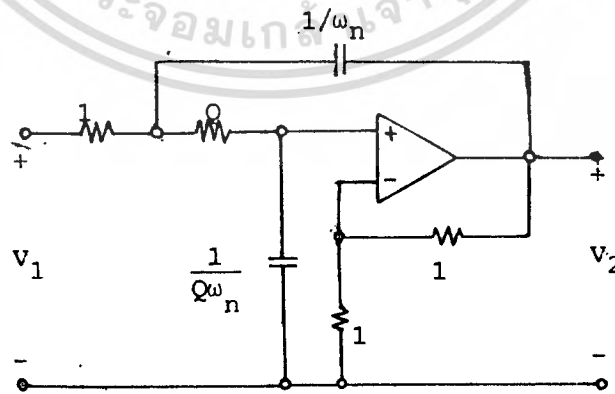
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบที่ 1



(ข) แบบที่ 2

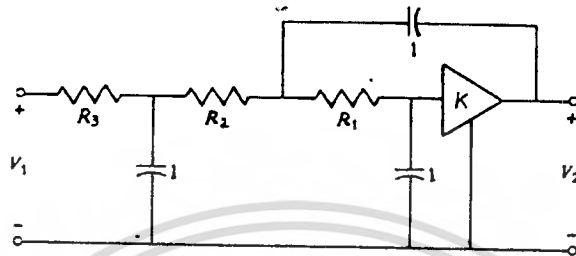


(ค) แบบที่ 3

รูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 วงจรขั้วเลนและคีย์ลำดับที่สาม [4], [5], [11]



รูปที่ 2.4

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จึงให้ C ทุกตัวมีค่าเป็น 1 ซึ่งทำให้โวลเตจทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรูปที่ 2.4 คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K}{R_1 R_2 R_3 s^3 + [2R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3 (2 - K)] s^2 + [R_1 + R_3 + (R_2 + R_3) (2 - K)] s + 1} \quad (2.1.3)$$

รูปทั่วไปของฟังก์ชันลำดับที่สาม คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{H}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (2.1.4)$$

โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของ (2.1.3) กับ (2.1.4) จะได้

$$a_3 = R_1 R_2 R_3$$

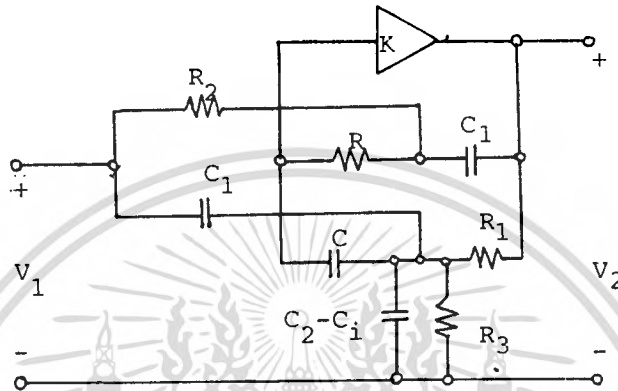
$$a_2 = 2R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2 (2 - K)$$

$$a_1 = R_1 + R_3 + (R_1 + R_2) (2 - K)$$

จากสมการทั้งสามนี้ สามารถหาค่าของ  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ได้หลังจากที่กำหนดค่า  $K$

## 2.2 วงจรบิโอคเตอร์ [6]

### 2.2.1 วงจรบิโอคเตอร์ลำดับที่สอง



รูปที่ 2.5

โวลเตจทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรูปที่ 2.5 คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{C_i}{C_2} \cdot \frac{s^2 + \frac{C_2}{C_i} \frac{1}{RR_2C_1C_3}}{s^2 + \frac{1}{R_3C_2}s + \frac{1}{RR_2C_1C_3}} \quad (2.2.1)$$

โดยที่

$$C_s = \frac{CC_2}{C + C_2}$$

รูปทั่วไปของฟังก์ชันลำดับที่สองซึ่งมีซีโรที่ตำแหน่ง  $\pm j\omega_0$  คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = K \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + (\omega_n/Q)s + \omega_n^2} \quad (2.2.2)$$

โดยที่

$$Q = \frac{Q_R}{1 - KG_0}$$

ถ้ากำหนด  $K = 1$  แล้วทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่าง (2.2.1) กับ (2.2.2) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\omega_0^2}{\omega_n^2}$$

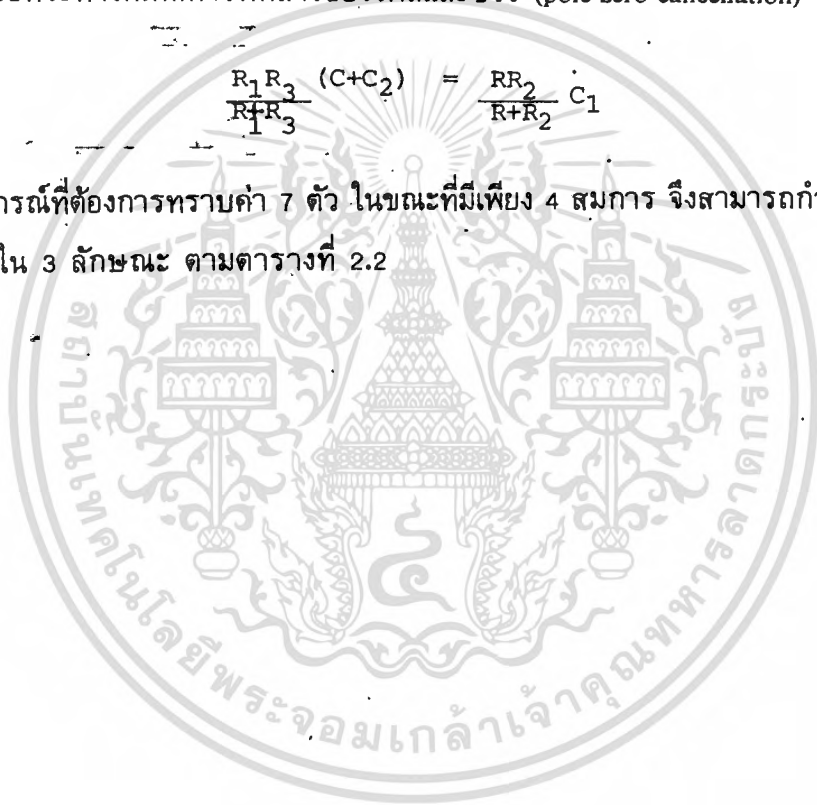
$$\omega_n^2 = \frac{1}{RR_2 C_1 C_2}$$

$$\frac{\omega_n}{Q} = \frac{1}{R_3 C_2}$$

และจากเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการหักล้างของโพลและซีโร (pole-zero cancellation)

$$\frac{R_1 R_3 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_3} = \frac{R R_2}{R + R_2} C_1$$

เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่ต้องการทราบค่า 7 ตัว ในขณะที่มีเพียง 4 สมการ จึงสามารถกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมได้อย่างอิสระใน 3 ลักษณะ ตามตารางที่ 2.2

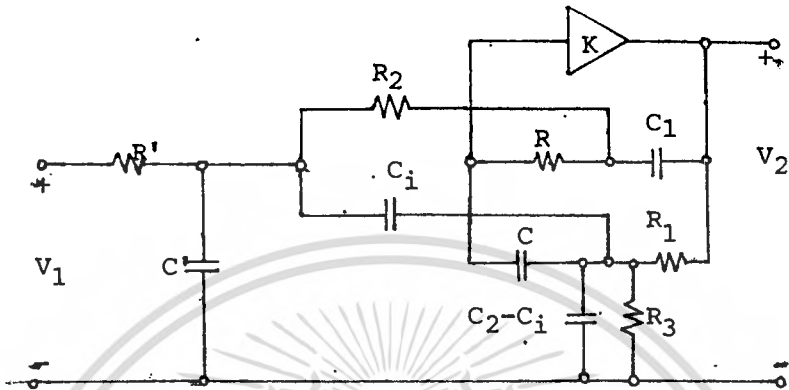


ตารางที่ 2.2 : วงจรมีออคเตอร์ลำดับที่สอง

	$R=R_2, C=C_2, Q_R=\frac{1}{4}$	$C=C_2, C=C_1, Q_R=\frac{1}{4}$	$C=C_2, C=C_1, RC=R_2C_i$
RC	$\frac{1}{\omega n}$	$\frac{2}{\omega n}$	$\frac{\sqrt{2}}{\omega_0}$
$C_1$	2C	C	C
$C_2$	C	C	C
$C_i$	$\frac{C \omega n^2}{\omega_0^2}$	$\frac{C \omega n^2}{\omega_0^2}$	$\frac{C \omega n^2}{\omega_0^2}$
$R_1$	$\frac{R}{2 - \frac{1}{Q}}$	$\frac{R}{6 - \frac{2}{Q}}$	$R \left[ 2 \left( 1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \frac{\sqrt{2} \omega n}{Q \omega_0} \right]^{-1}$
$R_2$	R	$\frac{R}{2}$	$\frac{R \omega_0^2}{\omega^2 n}$
$R_3$	QR	$\frac{QR}{2}$	$\frac{\omega_0 QR}{\sqrt{2} \omega n}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 วงจรบล็อคเตอร์ลำดับที่สาม



รูปที่ 2.6

โวลเตจทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรูปที่ 2.6 คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{C_i}{C_2} \frac{\gamma \frac{s^2 + \frac{C_2}{RR_2C_1C_s}}{R'C's^3 + As^2 + Bs + D}}{\quad} \quad (2.2.3)$$

โดยที่

$$A = \frac{\gamma}{R'C'} + \frac{1}{R_3C_2} + (1-\gamma) \left( \frac{1}{RC} + \frac{1}{R_3(C_2-C_1)} - \frac{1}{R_3C_2} \right)$$

$$B = \frac{\gamma}{R'R_3C'C_2} + \frac{1}{RR_2C_1C_s} + (1-\gamma) \left( \frac{1}{RR_3C(C_2-C_1)} - \frac{1}{RR_2C_1C_s} \right)$$

$$D = \frac{\gamma}{R'C'RR_2C_1C_s}$$

$$\gamma = \frac{C'C_2}{C'C_2 + C_1(C_2 - C_1)}, \quad 0 < \gamma \leq 1$$

และ

$$C_s = \frac{CC_2}{C + C_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทั่วไปของฟังก์ชันลำดับที่สามซึ่งมีขั้วที่ตำแหน่ง  $\pm j\omega_0$  คือ

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{\omega_r}{s+\omega_r} \cdot \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{s^2+\omega_0^2}{s^2+\frac{\omega_n}{Q}s+\omega_n^2} \quad (2.2.4)$$

โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่าง (2.2.3) กับ (2.2.4) จะได้

$$\omega_r + \frac{\omega_n}{Q} = A \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\omega_r \omega_n}{Q} + \omega_n^2 = B \quad (2.2.6)$$

$$\omega_r \omega_n^2 = D \quad (2.2.7)$$

$$\omega_0^2 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{1}{RR_2 C_1 C_s} \quad (2.2.8)$$

เพื่อที่จะให้ค่าของ  $\omega_n$  และ  $Q$  ไม่ขึ้นต่อกัน จะต้องให้

$$R'C' = RC \quad (2.2.9)$$

จาก (2.2.5) - (2.2.9) แก้สมการได้เป็น

$$\omega_r = \frac{1}{RC}$$

$$\omega_n^2 = \frac{\gamma}{RR_2 C_1 C_s}$$

$$\frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} = \frac{\gamma C_i}{C_2}$$

$$\frac{\omega_n}{Q} = \frac{1}{R_3 C_2} \cdot \frac{1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}}{1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติม

$$C_2 = C$$

และ

$$1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} = \alpha \frac{1 - \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}}{\gamma \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}}, \quad \alpha \geq 1$$

และจากเงื่อนไขเดียวกันกับวงจรลำดับที่สองที่ว่า

$$\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} (C + C_2) = \frac{R R_2}{R + R_2} C_1$$

$$RC = R_2 C_1$$

สามารถคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ทุกตัวในเทอมของ R และ  $\alpha$  ได้ตามตารางที่ 2.3 โดยในช่องแรกจะเป็นค่าต่อรูปทั่วไปที่กำหนด  $\alpha$  ได้อย่างอิสระ ส่วนในช่องหลังเป็นกรณีเฉพาะที่กำหนดให้

$$\alpha = 1 + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}$$

ตารางที่ 2.3 : วงจรบ็อคเตอร์ลำดับที่สาม

	คำตอบรูปทั่วไป	กรณี $\alpha = 1 + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}$
RC	$\frac{1}{\omega r}$	$\frac{1}{\omega r}$
$C_1$	$\frac{C_2 \omega r^2}{\omega_0^2}$	$\frac{C_2 \omega r^2}{\omega_0^2}$
$C_2$	C	C
$C_i$	$\frac{C \cdot 1 \cdot (\alpha - 1 + \omega_n^2)}{\alpha \cdot \omega_0^2}$	$C \cdot \frac{2\omega_n^2}{\omega_n^2 + \omega_0^2}$
$C'$	$C \cdot \frac{1}{\alpha(\alpha - 1)} \cdot \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} \cdot (\alpha - 1 + \omega_n^2)$	$C \cdot \frac{2\omega_n^2}{\omega_n^2 + \omega_0^2}$
$R_1$	$R \cdot \frac{\alpha \omega r}{\omega_n} \left[ \frac{\omega_0^2}{\omega \omega_r} (2\alpha - 1 + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}) - \frac{1}{Q} \right]^{-1}$	$R \cdot \frac{\omega r (1 + \omega_n^2)}{\omega_n} \left[ \frac{\omega_n (3 + \frac{\omega_0^2}{\omega_n^2}) - \frac{1}{Q}}{\omega_r} \right]^{-1}$
$R_2$	$R \cdot \frac{\alpha}{\alpha - 1 + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}}$	$R \cdot \frac{\omega_n^2 + \omega_0^2}{2\omega_n^2}$
$R_3$	$\frac{R \cdot Q \omega r \alpha}{\omega_n}$	$\frac{R \cdot Q \omega r (1 + \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2})}{\omega_n}$
$R'$	$\frac{R \cdot \omega_0^2 \cdot \alpha (\alpha - 1)}{\omega_n^2 \cdot \frac{\alpha - 1 + \omega_n^2}{\omega_0^2}}$	$\frac{R \cdot \omega_n^2 + \omega_0^2}{2\omega_n^2}$

## 2.3 การสเกล [9]

โดยทั่วไป นิยมให้ความถี่คutoff ของฟังก์ชันกรองความถี่ที่เกิดขึ้นที่  $\omega = 1$  อีกทั้งการคำนวณค่าอุปกรณ์ในวงจรกรองความถี่ก็นิยมเริ่มจากกำหนดค่า R หรือ C เท่ากับ 1 เช่นกัน เมื่อต้องการนำไปใช้งานที่ความถี่ใด จึงต้องทำการสเกลทางความถี่ (Frequency Scaling) ไปที่ความถี่นั้น และเพื่อให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ ก็จะต้องทำการสเกลทางขนาด (Magnitude Scaling) อีกด้วย

### 2.3.1 การสเกลทางความถี่

การสเกลทางความถี่ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์รีแอคทีฟ เช่น L และ C เท่านั้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าแปรตามความถี่ พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของ L

$$|Z_L| = \omega L$$

เพื่อที่จะให้อิมพีแดนซ์คงที่ การเปลี่ยนแปลงความถี่  $\omega$  จะต้องถูกชดเชยด้วยค่าที่สอดคล้องกันใน L

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

ในทำนองเดียวกันสำหรับ C

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

สรุปผลของการสเกลทางความถี่ด้วยตัวประกอบ  $K_f$  ที่มีต่อค่าของอุปกรณ์พาสซีฟได้ดังนี้

$$L_{\text{new}} = \frac{1}{k_f} L_{\text{old}} \quad (2.3.1)$$

$$C_{\text{new}} = \frac{1}{k_f} C_{\text{old}} \quad (2.3.2)$$

$$R_{\text{new}} = R_{\text{old}} \quad (2.3.3)$$

### 2.3.2 การสเกลทางขนาด

การสเกลทางขนาด คือการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทุกตัวในวงจรด้วยตัวประกอบ  $K_m$  โดยที่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์พาสซีฟมีค่าเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_R = R, \quad |Z_L| = \omega L, \quad |Z_C| = \frac{1}{\omega C}$$

ทำการสเกลทางขนาด โดยคูณด้วยค่า  $K_f$  จะได้

$$k_m Z_R = k_m R, \quad k_m |Z_L| = k_m \omega L, \quad k_m |Z_C| = \frac{1}{\omega C / k_m}$$

สรุปผลของการสเกลทางขนาดด้วยตัวประกอบ  $K_m$  ที่มีต่อค่าของอุปกรณ์พาสซีฟได้ดังนี้

$$R_{\text{new}} = K_m R_{\text{old}} \quad (2.3.4)$$

$$L_{\text{new}} = k_m L_{\text{old}} \quad (2.3.5)$$

$$C_{\text{new}} = \frac{1}{k_m} C_{\text{old}} \quad (2.3.6)$$

รวมผลของการสเกลทั้งสองชนิด จากสมการ (2.3.1) - (2.3.6)

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

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

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

## บทที่ 3

# การออกแบบวงจรสองความถี่แบบเมอร์โรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงฟังก์ชันกรองความถี่ 3 ชนิด เริ่มจากฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ ซึ่งเป็นฟังก์ชันพื้นฐานที่อ้างอิงกับวงจรลำดับที่สอง ต่อมาได้ปรับปรุงเป็นฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ธซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ เพื่อทำให้อัตราการคัทออฟสูงขึ้น และใช้กำจัดสัญญาณรบกวนรอบ ๆ ความถี่ที่ต้องการได้หลายจุด แต่ยังคงอ้างอิงกับวงจรลำดับที่สองเช่นกัน ฟังก์ชันท้ายสุดคือฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ (MURROMAF) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ ในด้านที่มีแต่เฉพาะโพลอย่างเดี่ยว และมีผลตอบสนองขนาดแบบราบเรียบที่สุดเหมือนกัน ต่างกันที่ฟังก์ชันเมอร์โรแมฟมีการช้อนโพลจริงได้หลายค่า เพื่ออ้างอิงกับวงจรลำดับที่สาม

บทที่ 2 ได้พิจารณาในด้านของการสร้างวงจรจริง ไม่ว่าจะเป็นวงจรชัลเลนและคีย์ หรือวงจรบ็อกเตอร์ จะเห็นว่าวงจรลำดับที่สามต้องการอุปกรณ์พาสซีฟเพิ่มขึ้นจากวงจรลำดับที่สองเพียง 2 ตัว คือตัวต้านทาน 1 ตัว และตัวเก็บประจุอีก 1 ตัว ในเชิงปฏิบัติ วงจรลำดับที่สามและวงจรลำดับที่สองจึงมีสมรรถนะที่เหมือนกันในด้านเซ็นซิวิตี (sensitivity) ปริมาณการใช้กำลังงานไฟฟ้า (power consumption) และการปรับแต่งวงจร (tuning) ในขณะที่วงจรลำดับที่สามให้สมรรถนะในการลดทอนสัญญาณได้ดีกว่า จึงเป็นข้อได้เปรียบของฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ

อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันเมอร์โรแมฟยังคงมีข้อด้อยในเรื่องอัตราการคัทออฟซึ่งยังไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งไม่สามารถเลือกกำจัดสัญญาณรบกวนในย่านหยุดสัญญาณได้ วิทยานิพนธ์นี้ได้ค้นพบวิธีการใหม่ในการออกแบบฟังก์ชันกรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ โดยอัตราการคัทออฟจะขึ้นอยู่กับความถี่ซีโรที่กำหนด ฟังก์ชันใหม่นี้จึงมีข้อดีที่เปรียบเทียบกับฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ธซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้เช่นกัน

### 3.1 การออกแบบฟังก์ชัน [1]

จากฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ [2], [3] ซึ่งมีฟังก์ชันขนาดกำลังสอง (Magnitude-Square Function) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|M(j\omega)|^2 = \frac{1}{(1+\alpha^2\omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha\omega)^{2i} \right]} \quad (3.1.1)$$

ฟังก์ชันใหม่ซึ่งต้องการให้สามารถกำหนดความถี่ซีโรได้หลายจุด จึงควรมีฟังก์ชันกำลังสองเป็นดังนี้

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{\prod_{i=1}^r (\omega^2 - \omega_{0i}^2)^{2m_i}}{(1+\alpha^2\omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha\omega)^{2i} \right]} \quad (3.1.2)$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{2m} b_i \omega^{2i}}{(1+\alpha^2\omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha\omega)^{2i} \right]} \quad (3.1.3)$$

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_r$$

โดยที่

- $n$  = จำนวนโพลเชิงซ้อน เป็นเลขจำนวนคู่
- $\mu$  = จำนวนโพลจริงที่ซ้อนกัน
- $\alpha$  = ตัวประกอบนอร์มัลไลซ์ (normalization factor) ที่ทำให้  $|H(j)|^2 = 1/2$
- $r$  = จำนวนตำแหน่งของความถี่ซีโร
- $\omega_{0i}$  = ความถี่ซีโรตำแหน่งที่  $i$
- $m_i$  = จำนวนการซ้อนกันของซีโรตำแหน่งที่  $i$

เพื่อให้ฟังก์ชัน (3.1.2) สามารถนำไปสร้างวงจรด้วยวงจรลำดับที่สามทั้งหมด ควรกำหนดให้

$$\mu = n/2$$

ซึ่งจะต้องใช้วงจรลำดับที่สามจำนวน  $n/2$  ส่วน

สำหรับค่าของ  $m$  ในเชิงคณิตศาสตร์สามารถกำหนดให้มีค่าได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึง  $m = (n+\mu)/2$  แต่ในเชิงปฏิบัติ เพื่อให้เหมาะสมกับวงจรลำดับที่สามซึ่งมีอยู่จำนวน  $n/2$  ส่วน จึงควรกำหนดให้

$$m \leq n/2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1.2) หลังจากกำหนดลำดับของฟังก์ชัน  $n + \mu$  ที่ต้องการ และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความถี่  $\omega$  อันได้แก่  $r$ ,  $m_i$  และ  $\omega_{0i}$  แล้ว ต้องการหาค่าของสัมประสิทธิ์  $a_i$  ( $i=0,1,\dots,n$ ) ด้วยวิธีการประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุดดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 1.2 (บทที่ 1) และค่าของตัวประกอบนอร์มัลไลซ์  $\alpha$  ที่ทำให้  $|H(j)|^2 = 1/2$

วิธีการหาคำตอบ จะต้องกระจายสมการ (3.1.2) ให้อยู่ในรูปของโพลีโนเมียลเศษส่วนในเทอม  $\omega^2$  สำหรับฟังก์ชันเศษ

$$\prod_{i=1}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i}$$

จะต้องทำการกระจายโพลีโนเมียล (binomial expansion) [12] แต่ละเทอมของ  $(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i}$  ( $i=1,2,\dots,r$ ) ให้เป็นโพลีโนเมียลย่อย ดังนี้

$$(\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i} = \sum_{K=0}^{2m_i} (-1)^K \binom{2m_i}{K} (\omega_{0i}^2)^{2m_i - K} \omega^{2K}$$

หลังจากนั้น จึงทำการคูณโพลีโนเมียลย่อยแต่ละเทอมเข้าด้วยกัน โดยใช้สูตรทั่วไปของการคูณโพลีโนเมียลที่ว่า

$$\sum_{i=0}^{m+n} P_i X^i = \sum_{i=0}^m M_i X^i \cdot \sum_{i=0}^n N_i X^i \quad (3.1.4)$$

เมื่อ

$$P_i = \sum_{K=0}^n M_{(i-K)} N_K$$

ในที่สุด จะได้ผลลัพธ์เป็นโพลีโนเมียลเศษส่วนในเทอม  $\omega^2$  อยู่ในรูป

$$\sum_{i=0}^{2m} b_i \omega^{2i} \quad ; \quad m = m_1 + m_2 + \dots + m_r$$

สำหรับฟังก์ชันส่วนของสมการ (3.1.2) เริ่มจากเทอม  $(1 + \alpha^2 \omega^2)^\mu$  ทำการกระจายโพลีโนเมียลจะได้

$$(1 + \alpha^2 \omega^2)^\mu = \sum_{i=0}^{\mu} \binom{\mu}{i} (\alpha \omega)^{2i}$$

แล้วจึงนำไปคูณกับโพลีโนเมียล  $\sum_{i=0}^n a_i (\alpha \omega)^{2i}$  จากสูตร (3.1.4) จะได้โพลีโนเมียลส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เนื่องจาก  $\alpha$  เป็นค่าตัวประกอบนอร์มัลไลซ์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 จึงสามารถใช้วิธีการหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์แบบไบนารีเสิร์ช (Binary Search) หรือแบบไฟโบนัคชีเสิร์ช (Fibonacci Search)

[14] จนกว่าจะได้ค่า  $\alpha$  ที่ทำให้สมการ (3.1.2) มีค่า  $|H(j)|^2 = \frac{1}{2}$

จากที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถเขียนไฟล์ชาร์ตแสดงวิธีการคำนวณหาฟังก์ชันขนาดกำลังสองที่ต้องการได้ดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1

### 3.2 ผลตอบสนองเฟสและเวลาหน่วง

เมื่อได้ฟังก์ชันขนาดกำลังสองที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณกลับมามาหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ โดยการแทนค่า  $\omega^2$  ด้วย  $-s^2$  ลงใน (3.1.2) แล้วคำนวณหาตำแหน่งโพลและซีโรทั้งหมด ซึ่งซีโรจะมีค่าเป็นจำนวนจินตภาพที่สมมาตรบนแกน  $j\omega$  เท่ากับ  $\pm\omega_{0i}$  จำนวน  $2m_i$  คู่ โพลจริงมีค่าซ้ำกันที่  $+1/\omega$  จำนวน  $\mu$  ค่า และที่  $-1/\alpha$  จำนวน  $\mu$  ค่าเช่นกัน โพลเชิงซ้อนมีค่าเชิงซ้อนซึ่งคอนจูเกตกันจำนวน  $n$  คู่ โดยการเลือกเอาเฉพาะโพลที่อยู่ทางซีกซ้ายมือของระนาบ  $s$  กับครึ่งหนึ่งของซีโรที่มีค่าซ้ำกัน ให้เป็นโพลและซีโรของฟังก์ชัน  $G(s)$

$$G(s) = H \frac{\prod_{i=1}^r (s^2 + \omega_{0i}^2)^{m_i}}{(s + \omega_r)^\mu \prod_{i=1}^{n/2} (s^2 + \frac{\omega_{ni}}{Q_i} s + \omega_{ni}^2)} \quad (3.2.1)$$

โดยที่  $H$  เป็นค่าคงที่ ที่ทำให้ขนาดของ  $G(s)$  เท่ากับหนึ่ง ที่ความถี่ศูนย์

$$= \frac{\omega_r^\mu \prod_{i=1}^{n/2} \omega_{ni}^2}{\prod_{i=1}^r \omega_{0i}^{2m_i}}$$

แทนค่า  $s = j\omega$  จะได้

$$G(j\omega) = H \frac{\prod_{i=1}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{m_i}}{(\omega_r + j\omega)^\mu \prod_{i=1}^{n/2} \left[ (\omega_{ni}^2 - \omega^2) + j\omega \frac{\omega_{ni}}{Q_i} \right]} \quad (3.2.2)$$

จาก (3.2.2) สามารถคำนวณหาผลตอบสนองเฟสได้

$$\theta(\omega) = \sum_{i=1}^r \theta_{0i}(\omega) - \mu \theta_r(\omega) - \sum_{i=1}^{n/2} \theta_{ci}(\omega) \quad (3.2.3)$$

เมื่อ

$$\theta_{0i}(\omega) = \begin{cases} 0 & ; \omega < \omega_{0i} \\ \pi/2 & ; \omega = \omega_{0i} \\ \pi & ; \omega > \omega_{0i} \end{cases}$$

$$\theta_r(\omega) = \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_r}$$

$$\begin{aligned} \theta_{ci}(\omega) &= \tan^{-1} \frac{\omega \cdot \omega_{ni} / Q_i}{\omega_{ni}^2 - \omega^2} \\ &= \tan^{-1} \frac{\omega \cdot \omega_{ni}}{Q_i (\omega_{ni}^2 - \omega^2)} \end{aligned}$$

สำหรับผลตอบสนองเวลาหน่วง ได้จาก (1.1.8) ซึ่งนำมาแสดงอีกครั้งดังนี้

$$D(\omega) = - \frac{d\theta(\omega)}{d\omega}$$

เวลาหน่วงของฟังก์ชันซึ่งมีผลตอบสนองเฟสใน (3.2.3) จึงเป็น

$$D(\omega) = - \sum_{i=1}^r \frac{d\theta_{oi}(\omega)}{d\omega} + \mu \frac{d\theta_r(\omega)}{d\omega} + \sum_{i=1}^{n/2} \frac{d\theta_{ci}(\omega)}{d\omega}$$

โดยทั่วไป จะสนใจเฉพาะเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นกับความถี่ในย่านผ่านสัญญาณ ( $0 < \omega < 1$ ) เท่านั้น ซึ่งช่วงความถี่นี้จะมีเฟสเนื่องจากซีโรเป็นศูนย์เท่ากันหมด ดังนั้นจึงเขียนผลตอบสนองเวลาหน่วงได้ใหม่ดังนี้

$$D(\omega) = \frac{\mu d\theta_r(\omega)}{d\omega} + \sum_{i=1}^{n/2} \frac{d\theta_{ci}(\omega)}{d\omega}$$

โดยที่

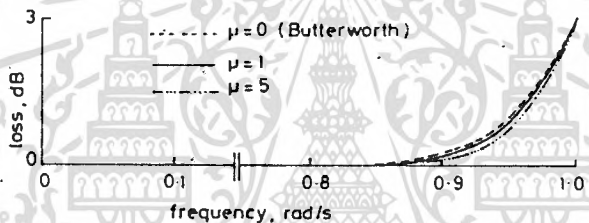
$$\frac{d\theta_r(\omega)}{d\omega} = \frac{\omega_r}{\omega^2 + \omega_r^2}$$

$$\frac{d\theta_{ci}(\omega)}{d\omega} = \frac{\omega_{ni} Q_i (\omega^2 + \omega_{ni}^2)}{Q_i^2 (\omega_{ni}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \omega_{ni}^2}$$

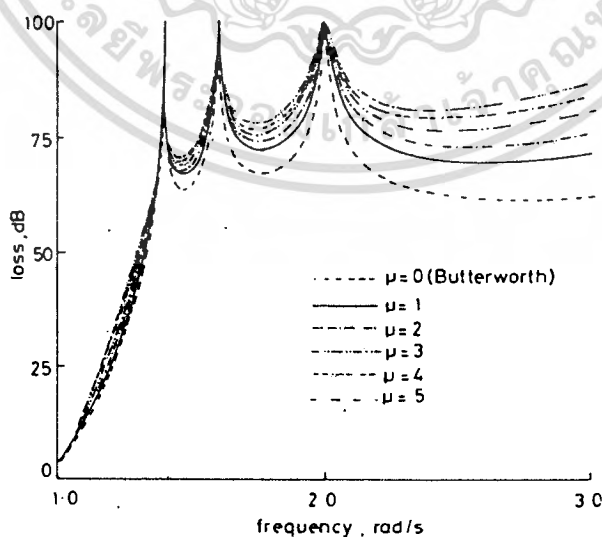
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ตัวอย่างการออกแบบ

เนื่องจากฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟซึ่งสามารถกำหนดความถี่โรว์ได้ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ทซึ่งสามารถกำหนดความถี่โรว์ได้ กล่าวคือ ฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ท ก็คือฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟกรณี  $\mu=0$  นั่นเอง เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นข้อดีของฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟที่เหนือกว่าฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ท จะขอยกตัวอย่างการออกแบบ 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างแรกเป็นกรณีที่ใช้วงจรจำนวนเท่า ๆ กัน โดยกำหนด  $n=10$ ,  $\omega_{01}=1.4$ ,  $\omega_{02}=1.6$ ,  $\omega_{03}=2.0$  และ  $m_1=m_2=m_3=1$  ในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นผลตอบสนองสูญเสียที่  $n$  ค่าต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ทให้สมรรถนะการลดทอนสัญญาณต่ำที่สุด และค่าสูญเสียจะสูงขึ้นตามค่า  $n$  จาก 1 ถึง 5 ตามลำดับ



(ก) ย่านผ่านสัญญาณ

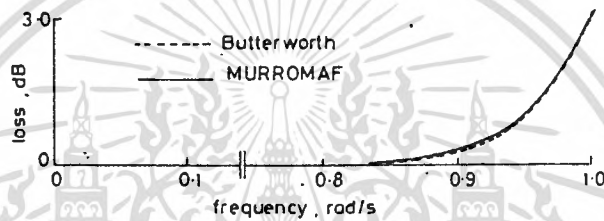


(ข) ย่านหยุดสัญญาณ

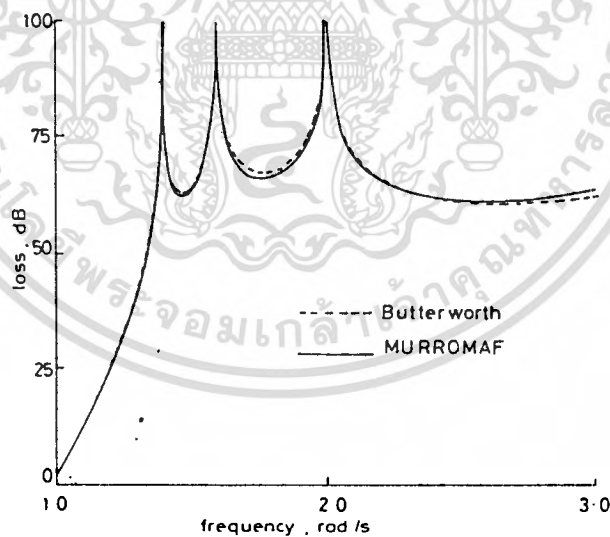
รูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่สอง แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟต้องการให้จำนวนวงจรน้อยกว่าฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ท เพื่อให้ได้ผลตอบสนองสูญเสียที่ใกล้เคียงกัน ในรูปที่ 3.2 แสดงผลตอบสนองสูญเสียเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันทั้งสอง ซึ่งกำหนดความถี่โวลต์ที่  $\omega_{01}=1.4, \omega_{02}=1.6, \omega_{03}=2.0$  และ  $m_1=m_2=m_3=1$  ขณะที่ฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ทต้องใช้ค่า  $n=10$  ฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟต้องการเพียง  $n=8$  และ  $\mu=4$  นั่นคือแบบบัตเตอร์เวิร์ทต้องใช้วงจรลำดับที่สองถึง 5 ส่วน ในขณะที่แบบเมอร์โรแมฟใช้วงจรลำดับที่สามเพียง 4 ส่วนเท่านั้น



(ก) ย่านผ่านสัญญาณ



(ข) ย่านหยุดสัญญาณ

รูปที่ 3.2

ตัวอย่างการออกแบบต่อจากนี้ไป แสดงผลของการออกแบบฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟซึ่งสามารถกำหนดความถี่โวลต์ได้ ในกรณีที่ลำดับของฟังก์ชันแต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปดังต่อไปนี้ (กำหนด  $m_1=m_2=\dots=m_r=1$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n	μ	r	ตารางที่	ผลตอบสนองของฟังก์ชัน (รูปที่)		
				สูญเสีย	เฟส	เวลาหน่วง
10	5	1	3.1	3.3	3.4	3.5
		2	3.2			
		3	3.3			
		4	3.4			
		5	3.5			
10	1	2	3.6	3.6	3.7	3.8
	2		3.7			
	3		3.8			
	4		3.9			
	5		3.10			
4	2	2	3.11	3.9	3.10	3.11
6			3.12			
8			3.13			

ผลลัพธ์ของการคำนวณที่แสดงในแต่ละตาราง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ส่วนที่ 1** แสดงตำแหน่งความถี่  $\omega_{mi}$  ที่เกิดการลดทอนสัญญาณต่ำที่สุด และค่าสูญเสีย  $\alpha_{si}$  ในหน่วยเดซิเบล ที่ความถี่นั้น เปรียบเทียบกับความถี่ซีโรที่กำหนดจำนวน  $r$  ตำแหน่ง
- ส่วนที่ 2** แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันขนาดกำลังสองที่คำนวณได้ ประกอบด้วย  $\alpha$ ,  $a_i$  และ  $b_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ )
- ส่วนที่ 3** แสดงตำแหน่งโพลจริง  $\omega_p$  และโพลเชิงซ้อน  $\sigma_i + j\beta_i$  พร้อมทั้งค่าของ  $\omega_{ni}$  และ  $Q_i$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งโพลเชิงซ้อนดังนี้

$$\omega_n^2 = \sigma^2 + \beta^2$$

$$Q = \frac{\omega_n}{2\sigma}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 :  $n = 10, \quad \mu = 5, \quad r = 1$

$i$	$\omega_{oj}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6316	62.5604

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.611614$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.506250E+01	0.506250E+01
1	-0.373423E+02	-0.450000E+01
2	0.143233E+03	0.100000E+01
3	-0.393367E+03	-
4	0.882614E+03	-
5	-0.173009E+04	-
6	0.307913E+04	-
7	-0.509733E+04	-
8	0.797652E+04	-
9	-0.119328E+05	-
10	0.172064E+05	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.635018$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.115844	0.996810	1.003519	4.331340
2	0.357423	0.965239	1.029290	1.439878
3	0.613615	0.880069	1.072867	0.874219
4	0.870578	0.723345	1.131872	0.650069
5	1.120045	0.483741	1.220043	0.544640

ตารางที่ 3.2 :  $n = 10, \mu = 5, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.5815	72.4128
2	1.80	2.0476	81.4657

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.464133$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.531441E+02	0.531441E+02
1	-0.517237E+03	-0.800442E+02
2	0.249629E+04	0.447201E+02
3	-0.818118E+04	-0.109800E+02
4	0.209471E+05	0.100000E+01
5	-0.453537E+05	-
6	0.871448E+05	-
7	-0.153249E+06	-
8	0.251778E+06	-
9	-0.392030E+06	-
10	0.584486E+06	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_p = 1.772632$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.109711	0.998005	1.004017	4.575739
2	0.341017	0.977257	1.035048	1.517589
3	0.598887	0.913504	1.092317	0.911956
4	0.878397	0.775863	1.171984	0.667115
5	1.167371	0.536300	1.284669	0.550240

ตารางที่ 3.3 :  $n = 10, \mu = 5, r = 3$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.30	1.3559	58.3396
2	1.50	1.6115	69.1379
3	1.80	2.1980	67.0669

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.462289$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.151785E+03	0.151785E+03
1	-0.266917E+04	-0.408241E+03
2	0.217119E+05	0.451419E+03
3	-0.110285E+06	-0.262558E+03
4	0.400838E+06	0.846886E+02
5	-0.113748E+07	-0.143600E+02
6	0.268646E+07	0.100000E+01
7	-0.553621E+07	-
8	0.102973E+08	-
9	-0.177024E+08	-
10	0.286064E+08	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 2.163149$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$\gamma_i$
1	0.093068	1.001584	1.005898	5.404119
2	0.298666	1.009631	1.052880	1.762640
3	0.559248	0.999867	1.145641	1.024268
4	0.894414	0.916664	1.280722	0.715956
5	1.293046	0.683990	1.462809	0.565645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 :  $n = 10, \mu = 5, r = 4$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.20	1.2356	54.6206
2	1.30	1.3810	57.3022
3	1.50	1.6416	58.4091
4	1.80	2.5288	43.7158

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.318325$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.314741E+03	0.314741E+03
1	-0.142418E+05	-0.128367E+04
2	0.288512E+06	0.226358E+04
3	-0.346844E+07	-0.225277E+04
4	0.277173E+08	0.138320E+04
5	-0.156909E+09	-0.536238E+03
6	0.658977E+09	0.128119E+03
7	-0.214307E+10	-0.172400E+02
8	0.564951E+10	0.100000E+01
9	-0.126498E+11	-
10	0.250467E+11	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 3.141439$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.074635	1.004057	1.006827	6.744981
2	0.241833	1.035783	1.063640	2.199119
3	0.471429	1.093357	1.190662	1.262822
4	0.841986	1.143349	1.419925	0.843200
5	1.465828	1.025824	1.789124	0.610278

ตารางที่ 3.5 :  $n = 10, \mu = 5, r = 5$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.10	1.1353	35.3968
2	1.20	1.2757	39.5783
3	1.40	1.5263	43.9343
4	1.70	1.8571	47.3439
5	2.00	4.0877	15.7408

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.131623$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.155856E+04	0.155856E+04
1	-0.480476E+06	-0.818903E+04
2	0.657160E+08	0.190077E+05
3	-0.525559E+10	-0.256444E+05
4	0.272651E+12	0.222532E+05
5	-0.962086E+13	-0.129684E+05
6	0.235417E+15	0.513689E+04
7	-0.399753E+16	-0.136496E+04
8	0.464113E+17	0.232769E+04
9	-0.357980E+18	-0.230000E+02
10	0.177515E+19	0.100000E+01

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 7.597465$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.054976	1.006344	1.007844	9.166267
2	0.181440	1.057436	1.072890	2.956599
3	0.361922	1.163545	1.218534	1.683423
4	0.663335	1.349275	1.503514	1.133299
5	1.363082	1.726197	2.199488	0.806807

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 :  $n = 10, \mu = 1, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6115	63.3248
2	2.00	2.3283	79.1535

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.861927$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.232430E+03	-0.112500E+03
2	0.335818E+03	0.570625E+02
3	-0.366303E+03	-0.125000E+02
4	0.369586E+03	0.100000E+01
5	-0.369586E+03	-
6	0.369586E+03	-
7	-0.369586E+03	-
8	0.369586E+03	-
9	-0.369586E+03	-
10	0.369586E+03	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_p = 1.160191$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.119065	0.996855	1.003941	4.215943
2	0.370592	0.963826	1.032617	1.393199
3	0.642770	0.864239	1.077062	0.837829
4	0.902234	0.664020	1.120245	0.620817
5	1.091087	0.362870	1.149846	0.526927

ตารางที่ 3.7 :  $n = 10, \mu = 2, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6115	65.1875
2	2.00	2.2982	83.0629

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.746799$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.363718E+03	-0.112500E+03
2	0.829895E+03	0.570625E+02
3	-0.136813E+04	-0.125000E+02
4	0.191670E+04	0.100000E+01
5	-0.246527E+04	-
6	0.301385E+04	-
7	-0.356242E+04	-
8	0.411099E+04	-
9	-0.465956E+04	-
10	0.520813E+04	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.339049$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.116085	0.997146	1.003880	4.323898
2	0.360639	0.967629	1.032650	1.431696
3	0.626638	0.880037	1.080343	0.862015
4	0.891736	0.703083	1.135570	0.636719
5	1.116902	0.426112	1.195425	0.535152

ตารางที่ 3.8 :  $n = 10, \mu = 3, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6065	66.6221
2	2.00	2.2732	86.1861

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.671533$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.492469E+03	-0.112500E+03
2	0.151500E+04	0.570625E+02
3	-0.328491E+03	-0.125000E+02
4	0.582636E+04	0.100000E+01
5	-0.913935E+04	0.000000E+00
6	0.132239E+05	0.000000E+00
7	-0.180800E+05	0.000000E+00
8	0.237076E+05	0.000000E+00
9	-0.301068E+05	0.000000E+00
10	0.372776E+05	0.000000E+00

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.489129$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.114006	0.997363	1.003858	4.402658
2	0.353804	0.970366	1.032854	1.459643
3	0.615772	0.890988	1.083067	0.879438
4	0.884803	0.729671	1.146863	0.648090
5	1.134423	0.469033	1.227562	0.541051

ตารางที่ 3.9 :  $n = 10, p = 4, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.5965	67.7954
2	2.00	2.2581	88.7620

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.616243$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.620244E+03	-0.112500E+03
2	0.239065E+04	0.570625E+02
3	-0.639340E+04	-0.125000E+02
4	0.136777E+05	0.100000E+01
5	-0.252929E+05	0.000000E+00
6	0.422881E+05	0.000000E+00
7	-0.657127E+05	0.000000E+00
8	0.966159E+05	0.000000E+00
9	-0.136047E+06	0.000000E+00
10	0.185055E+06	0.000000E+00

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.622737$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q$
1	0.112457	0.997532	1.003851	4.463280
2	0.348764	0.972436	1.033087	1.481071
3	0.607835	0.899076	1.085265	0.892731
4	0.879674	0.749148	1.155443	0.656745
5	1.146975	0.500812	1.251545	0.545585

ตารางที่ 8.10 :  $n = 10, \mu = 5, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6015	68.7222
2	2.00	2.2431	90.9313

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.573102$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.747522E+03	-0.112500E+03
2	0.345657E+04	0.570625E+02
3	-0.109704E+05	-0.125000E+02
4	0.274425E+05	0.100000E+01
5	-0.584176E+05	0.000000E+00
6	0.110832E+06	0.000000E+00
7	-0.193011E+06	0.000000E+00
8	0.314675E+06	0.000000E+00
9	-0.486933E+06	0.000000E+00
10	0.722285E+06	0.000000E+00

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.744889$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.111253	0.997667	1.003851	4.511556
2	0.344878	0.974058	1.033310	1.498083
3	0.601746	0.905309	1.087053	0.903248
4	0.875664	0.764093	1.162164	0.663590
5	1.156379	0.525495	1.270180	0.549206

ตารางที่ 3.11 :  $n = 4, \mu = 2, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6767	38.5888
2	2.00	3.2957	32.0748

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.521538$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.575600E+03	-0.112500E+03
2	0.184147E+04	0.570625E+02
3	-0.372849E+04	-0.125000E+02
4	0.579820E+04	0.100000E+01

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.917406$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.217226	1.000472	1.023783	2.356496
2	0.804948	0.936077	1.234578	0.766868

ตารางที่ 8.12 :  $n = 6, \mu = 2, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6466	47.8885
2	2.00	2.6291	51.5811

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.637414$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.438891E+03	-0.112500E+03
2	0.114245E+04	0.570625E+02
3	-0.203239E+04	-0.125000E+02
4	0.295902E+04	0.100000E+01
5	-0.388565E+04	-
6	0.481229E+04	-

ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.568839$

$i$	$\sigma_i$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q_i$
1	0.167384	0.997338	1.011287	3.020861
2	0.554399	0.948384	1.098540	0.990748
3	1.032568	0.707898	1.251925	0.606219

ตารางที่ 3.18 :  $n = 8, \mu = 2, r = 2$

$i$	$\omega_{oi}$	$\omega_{mi}$	$\alpha_{si}$ (dB)
1	1.50	1.6266	56.6863
2	2.00	2.4085	67.9815

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน :  $\alpha = 0.703145$

$i$	$a(i)$	$b(i)$
0	0.810000E+02	0.810000E+02
1	-0.389543E+03	-0.112500E+03
2	0.931524E+03	0.570625E+02
3	-0.157693E+04	-0.125000E+02
4	0.223908E+04	0.100000E+01
5	-0.290123E+04	—
6	0.356337E+04	—
7	-0.422552E+04	—
8	0.488766E+04	—

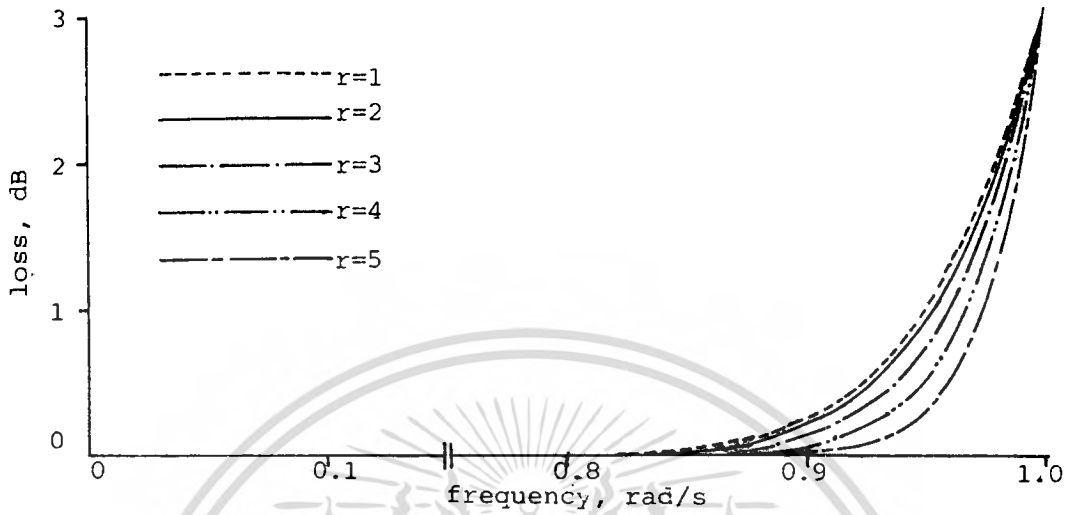
ตำแหน่งโพล :  $\omega_r = 1.422183$

$i$	$\sigma$	$\beta_i$	$\omega_{ni}$	$Q$
1	0.136905	0.996937	1.006294	3.675163
2	0.434410	0.959536	1.053291	1.212323
3	0.772133	0.827209	1.131576	0.732760
4	1.099685	0.537010	1.223800	0.556432

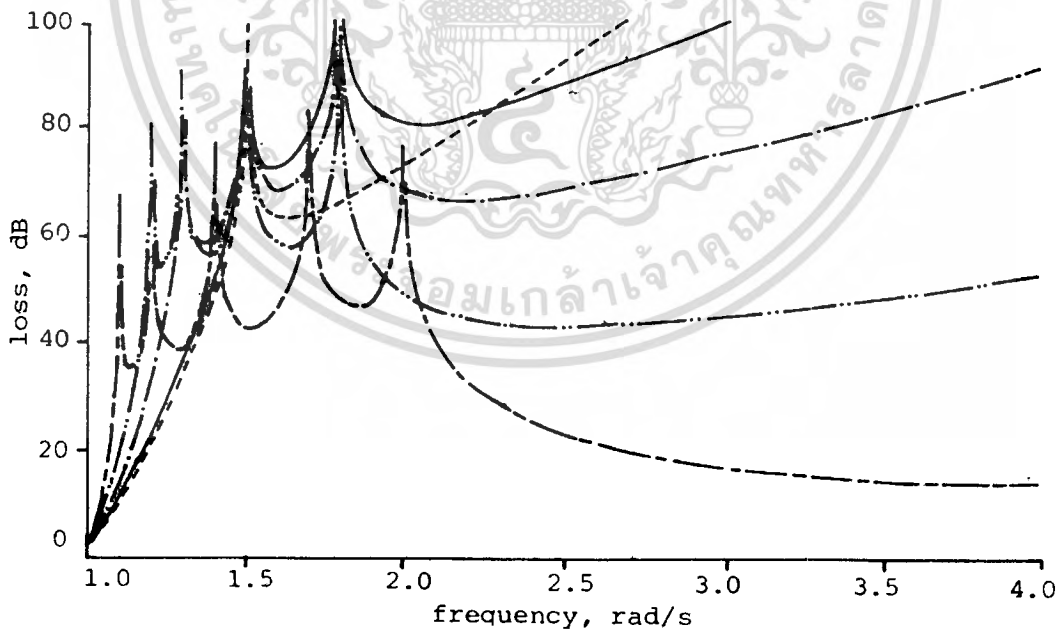
นอกจากตารางแสดงผลการคำนวณแล้ว ยังได้แสดงรูปผลตอบสนองสูญเสีย, เฟส และเวลาหน่วงของฟังก์ชันในแต่ละชุดเปรียบเทียบบนแกนเดียวกันอีกด้วย

พิจารณาผลตอบสนองสูญเสีย รูปที่ 3.3 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า  $r$  จาก 1 ถึง 5 ผลตอบสนองในย่านผ่านสัญญาณดีขึ้นตามการเพิ่มของจำนวนความถี่ซีโร ในทางตรงข้ามสำหรับที่ความถี่สูง ๆ ซึ่งความชันของการลดทอนสัญญาณมีค่าลดลง รูปที่ 3.6 แสดงผลของการเพิ่มจำนวนโพลจริงที่ซ้อนกันจาก 1 ถึง 5 ผลตอบสนองในย่านผ่านสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกันมาก จะสังเกตความแตกต่างได้ในย่านหยุดสัญญาณซึ่งให้สมรรถนะการลดทอนสัญญาณดีขึ้นเมื่อทำการซ้อนโพลจริงให้มากขึ้น รูปที่ 3.9 แสดงผลของของเพิ่มจำนวนโพลเชิงซ้อนจาก 4 ถึง 8 ซึ่งให้ผลแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งในย่านผ่านสัญญาณและย่านหยุดสัญญาณ โดยให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้นเมื่อ  $n$  มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

ส่วนผลตอบสนองเฟสและเวลาหน่วง มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก โดยอาจสังเกตได้ว่า เมื่อลำดับของฟังก์ชันเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดเวลาหน่วงสูงขึ้นด้วย เนื่องจากสัญญาณต้องผ่านวงจรหลายส่วนเพิ่มขึ้นนั่นเอง



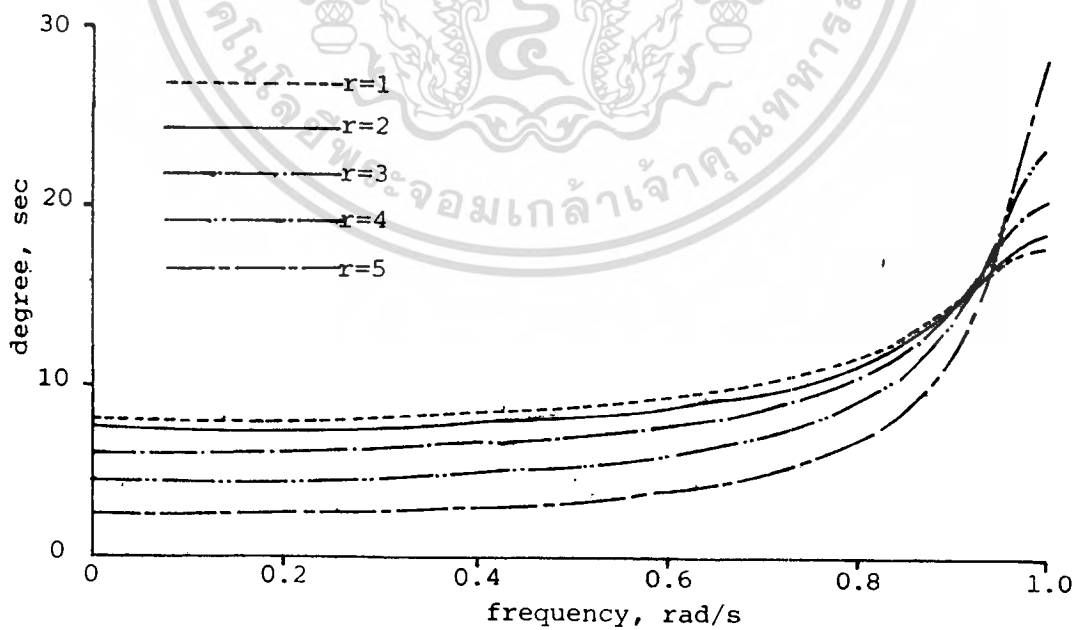
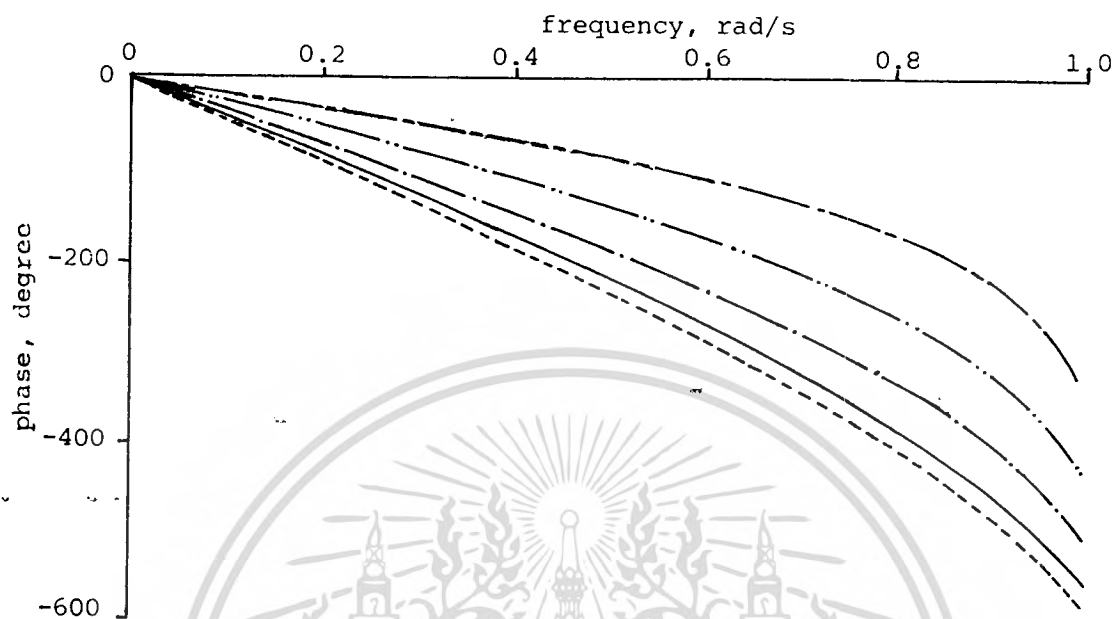
(ก) ย่านผ่านสัญญาณ



(ข) ย่านหยุดสัญญาณ

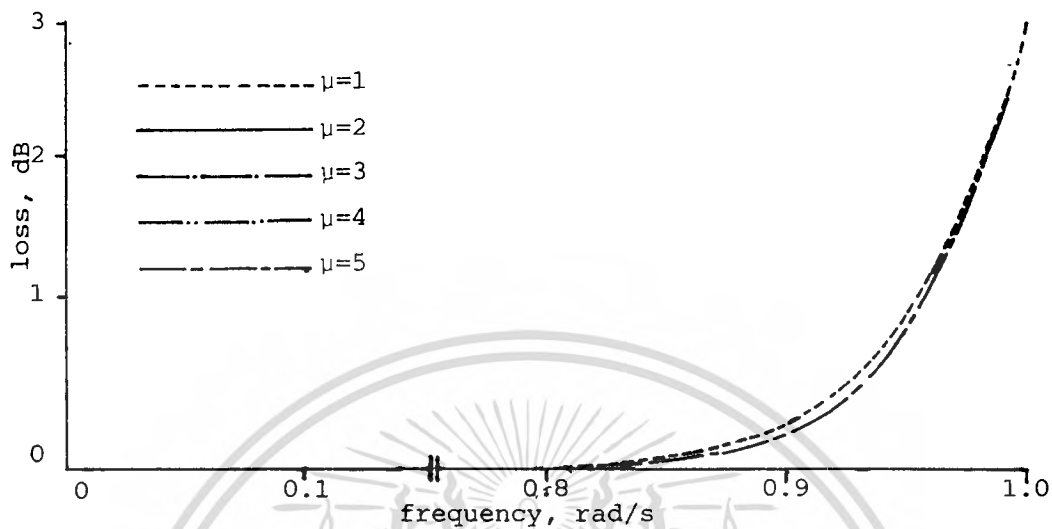
รูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

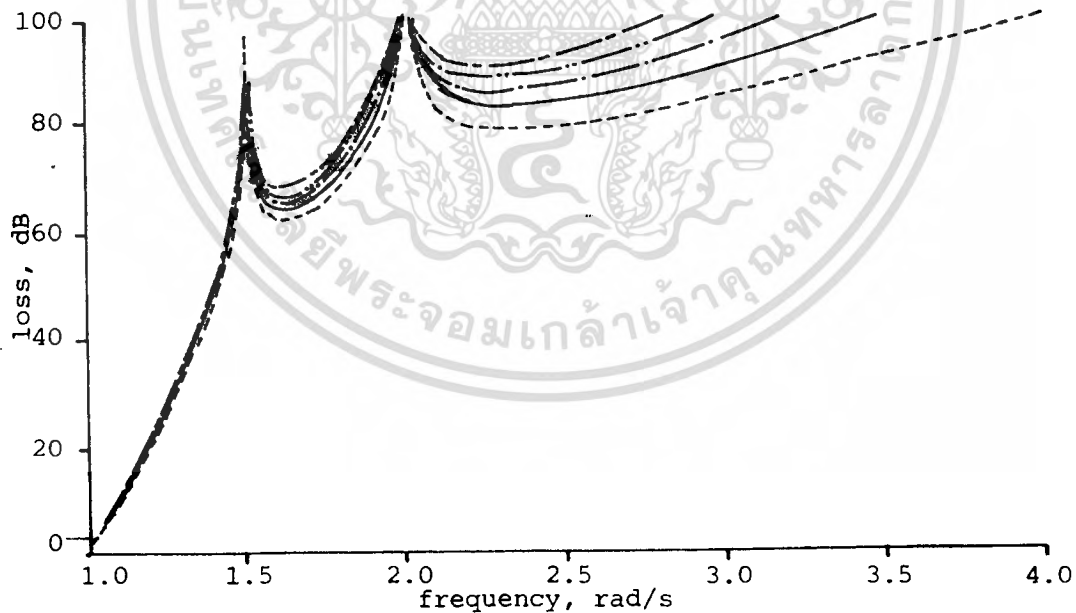


รูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



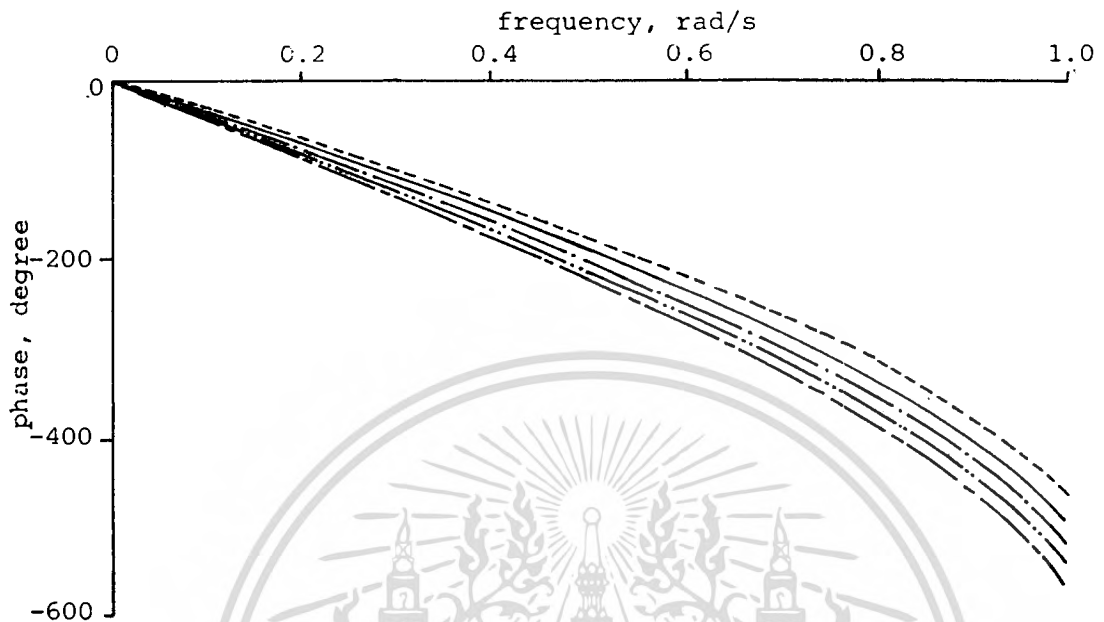
(ก) ย่านผ่านสัญญาณ



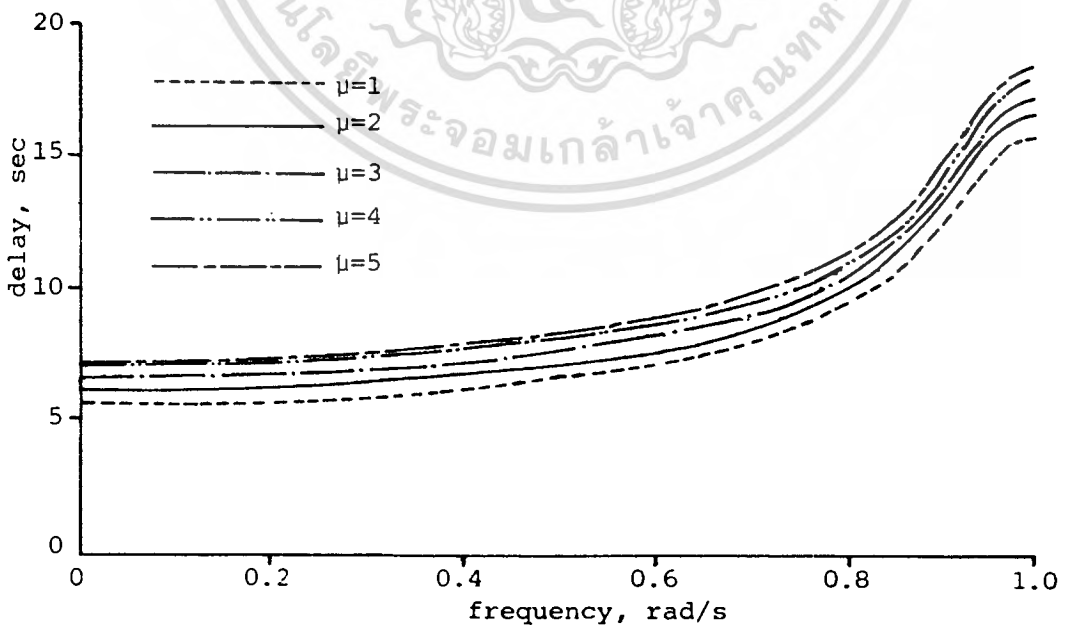
(ข) ย่านหยุดสัญญาณ

## รูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

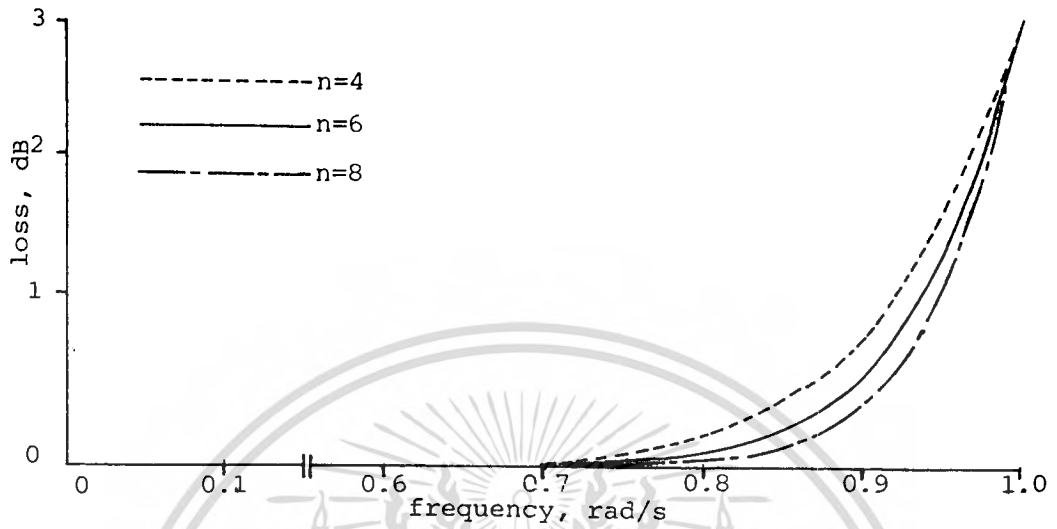


รูปที่ 3.7

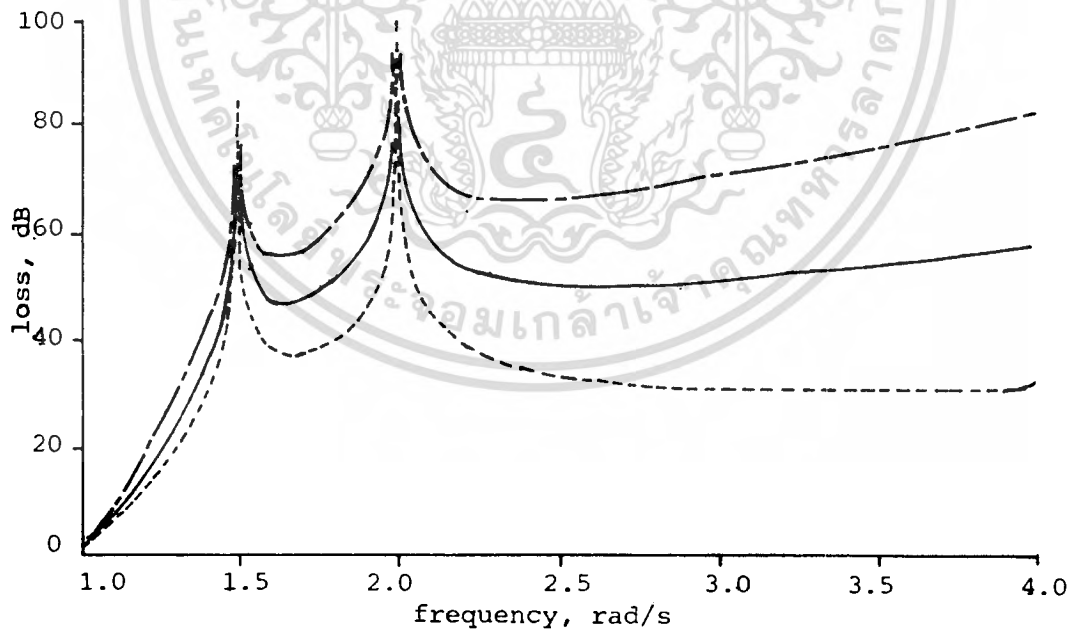


รูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



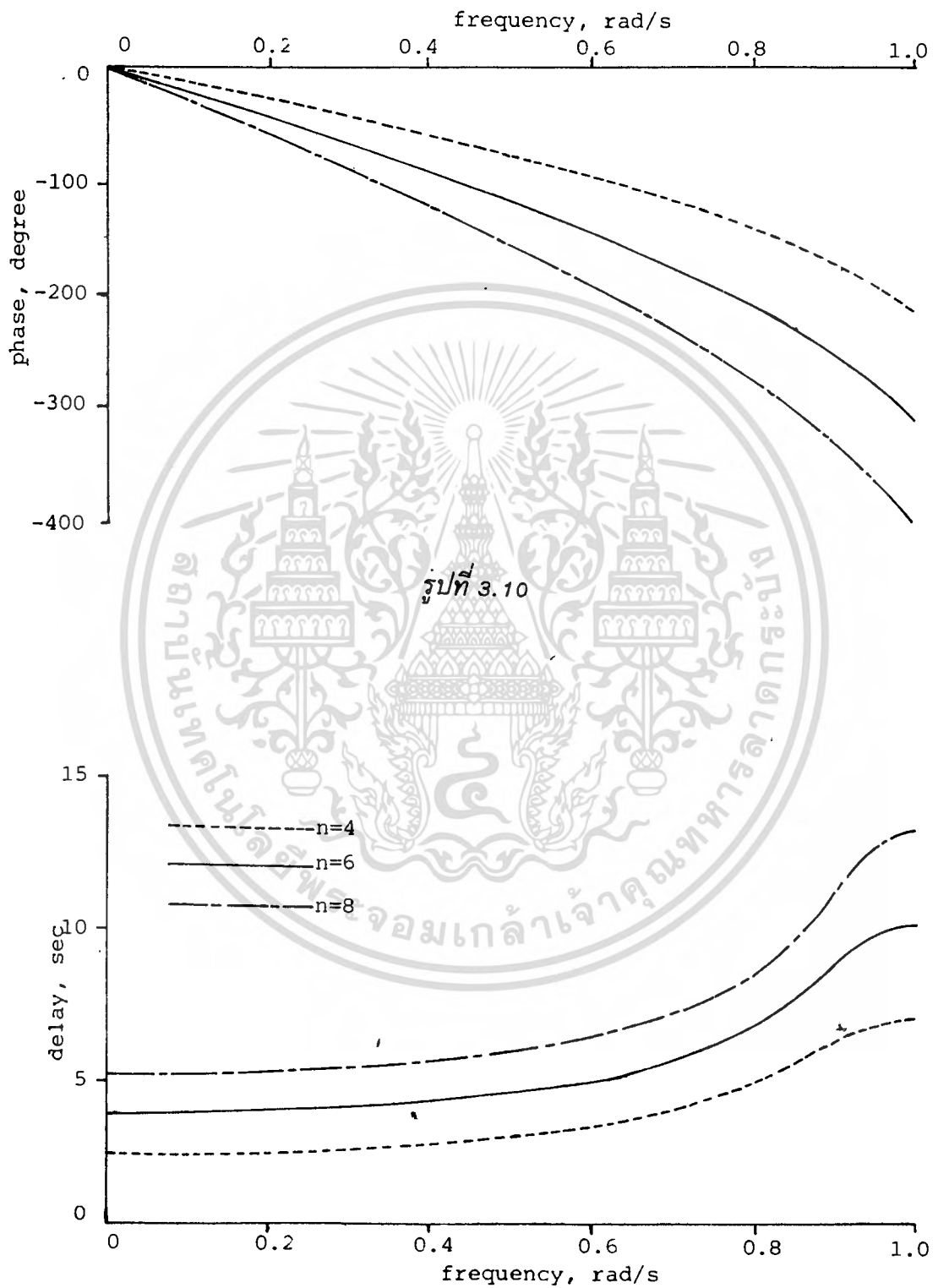
(ก) ย่านผ่านสัญญาณ



(ข) ย่านหยุดสัญญาณ

รูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การแปลงความถี่ [9]

การออกแบบวงจรกรองความถี่ โดยทั่วไปนิยมออกแบบเฉพาะฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านเท่านั้น แล้วจึงนำไปเป็นฟังก์ชันต้นแบบสำหรับฟังก์ชันผ่านความถี่ชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการ ด้วยวิธีการที่เรียกว่า *การแปลงความถี่*

**การแปลงความถี่** คือการหาความสัมพันธ์ทางความถี่ของฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านกับฟังก์ชันที่ต้องการ ซึ่งให้ผลตอบสนองขนาดที่สอดคล้องกันสำหรับทุก ๆ ค่าของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ในที่นี้กำหนดให้  $X(\omega)$  เป็นฟังก์ชันของการแปลงความถี่ในเทอมของความถี่ต้นแบบ  $\omega$  ของฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่าน

หลังจากทราบความสัมพันธ์ของ  $X(\omega)$  แล้ว สามารถทำการแปลงความถี่จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันโดยตรงด้วยฟังก์ชัน  $X(s)$  โดยการแทนค่า  $\omega = s/j$  และ  $X(\omega) = X(s)/j$

ฟังก์ชันของการแปลงความถี่ จากฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านไปยังฟังก์ชันกรองความถี่ชนิดอื่น ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.14 ซึ่งมีทั้งความสัมพันธ์ในฟังก์ชันขนาดและความสัมพันธ์ในทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน จะสังเกตได้ว่าสำหรับฟังก์ชันแบบเมอร์โรแมฟ ไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีแปลงความถี่เพื่อหาฟังก์ชันผ่านช่วงสัญญาณและฟังก์ชันกำจัดช่วงสัญญาณ เนื่องจาก  $X(s)$  เป็นฟังก์ชันลำดับที่สอง ซึ่งทำให้โพลจริงถูกแทนที่ด้วยโพลเชิงซ้อนทั้งหมด

ตารางที่ 3.14 : ฟังก์ชันการแปลงความถี่

ชนิดของฟังก์ชัน	$X(\omega)$	$X(s)$
กรองความถี่สูงผ่าน	$\frac{\omega_c}{\omega}$	$\frac{\omega_c}{s}$
กรองช่วงความถี่ผ่าน	$\frac{1}{BW} \cdot \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega}$	$\frac{1}{BW} \cdot \frac{s^2 + \omega_0^2}{s}$
กำจัดช่วงความถี่	$BW \cdot \frac{\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$	$BW \cdot \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$

$$* BW = \omega_2 - \omega_1$$

$$* \frac{1}{BW} = \omega_1 \cdot \omega_2$$

ในที่นี้ จึงพิจารณาเฉพาะการแปลงความถี่จากฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านไปยังฟังก์ชันกรองความถี่สูงผ่านเท่านั้น เริ่มจากฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเมอร์โรแมฟซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้

$$G_{LP}(s) = \frac{H \prod_{i=1}^r (s^2 + \omega_{0i}^2)^{m_i}}{(s + \omega_r)^{\mu} \prod_{i=1}^{n/2} [(s + P_i)(s + P_i^*)]} \quad (3.4.1)$$

ฟังก์ชันผ่านความถี่สูง ได้จากการแทนค่า  $s$  ด้วย  $1/s$

$$\begin{aligned} G_{HP}(s) &= G_{LP}\left(\frac{1}{s}\right) \\ &= \frac{H \prod_{i=1}^r \left(\frac{1}{s^2} + \omega_{0i}^2\right)^{m_i}}{\left(\frac{1 + \omega_r}{s}\right)^{\mu} \prod_{i=1}^{n/2} \left[\left(\frac{1}{s} + P_i\right)\left(\frac{1}{s} + P_i^*\right)\right]} \\ &= \frac{H s^{\mu+n-2m} \prod_{i=1}^r (1 + \omega_{0i}^2 s^2)^{m_i}}{(1 + \omega_r s)^{\mu} \prod_{i=1}^{n/2} [(1 + P_i s)(1 + P_i^* s)]} \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

จาก (3.4.1) และ (3.4.2) จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพลและซีโร ดังนี้

ซีโร เปลี่ยนจากตำแหน่ง  $\omega_{0i}$  ไปเป็น  $1/\omega_{0i}$  และเกิดซีโรขึ้นใหม่ที่จุดกำเนิดอีกจำนวน  $\mu + n - 2m$

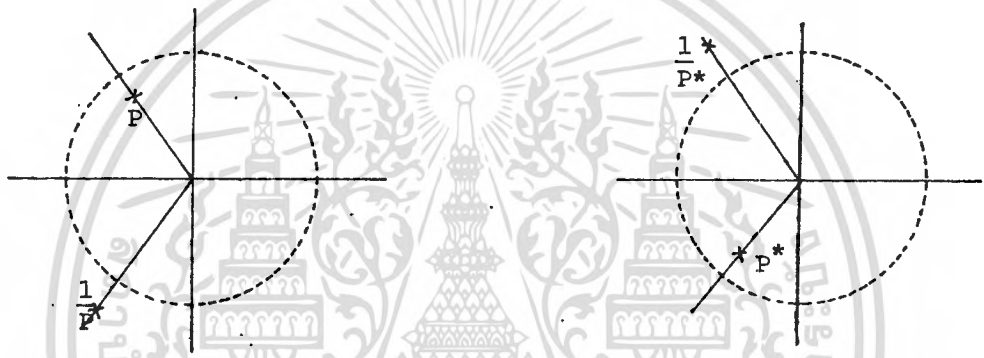
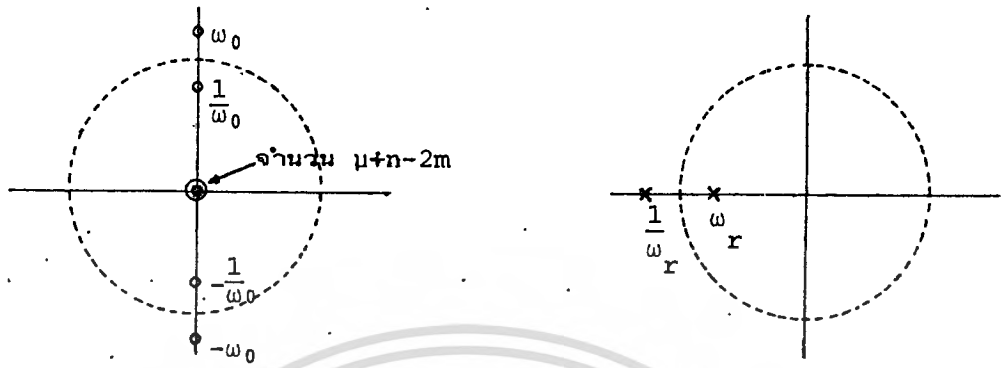
โพลจริง เปลี่ยนจากตำแหน่ง  $\omega_r$  ไปเป็น  $1/\omega_r$

โพลเชิงซ้อน ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูป  $P_i = M_i e^{j\alpha_i}$

ถูกเปลี่ยนตำแหน่งไปเป็น  $\frac{1}{P_i} = \frac{1}{M_i} e^{-j\alpha_i}$

เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจน จึงได้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพลและซีโรด้วยรูปที่

3.12 โดยเปรียบเทียบกับวงกลมหนึ่งหน่วย



รูปที่ 3.12

## บทที่ 4

### การทดลองวงจร

เพื่อเป็นการยืนยันให้เห็นว่า ฟังก์ชันกรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟซึ่งสามารถกำหนดความถี่อะไรได้สามารถนำไปใช้งานในเชิงปฏิบัติได้จริง จึงได้ทำการทดลองวงจรสำหรับฟังก์ชันหนึ่งทีออกแบบขึ้น โดยกำหนดค่า  $n = 4$ ,  $\mu = 2$ ,  $m_1 = m_2 = 1$ ,  $\omega_{01} = 1.5$  และ  $\omega_{02} = 2.0$  ซึ่งตรงกับตัวอย่างในตารางที่ 3.11 (บทที่ 3) การสร้างวงจรแบบแอกทีฟ RC สำหรับฟังก์ชันนี้ มีความเหมาะสมที่จะใช้วิธีกาสเกตด้วยวงจรบ็อกเตอร์ลำดับที่สาม นำผลในตารางที่ 3.11 มาเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแบบคลาสเกตด้วยฟังก์ชันย่อยของแต่ละวงจรในรูปแบบสมการ (2.2.4) ได้ดังนี้

$$\frac{V_2(s)}{V_i(s)} = \left[ \frac{\omega_{r1}}{s + \omega_{r1}} \cdot \frac{\omega_{n1}^2}{\omega_{01}^2} \cdot \frac{s^2 + \omega_{01}^2}{s^2 + \frac{\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}{Q_1}} \right] \cdot \left[ \frac{\omega_{r2}}{s + \omega_{r2}} \cdot \frac{\omega_{n2}^2}{\omega_{02}^2} \cdot \frac{s^2 + \omega_{02}^2}{s^2 + \frac{\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2}{Q_2}} \right]$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \omega_{01} &= 1.5 & \omega_{02} &= 2.0 \\ \omega_{r1} &= 1.917406 & \omega_{r2} &= 1.917406 \\ \omega_{n1} &= 1.023783 & \omega_{n2} &= 1.234578 \\ Q_1 &= 2.356496 & Q_2 &= 0.766868 \end{aligned}$$

วงจรทดลองต้องการให้เกิดความถี่คัทออฟที่ 5 KHz ดังนั้น ความถี่ซีโรจึงถูกสเกลไปอยู่ที่ 7.5 KHz และ 10 KHz ตามลำดับ การออกแบบวงจรอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น (ดูภาคผนวกที่ 1 ประกอบ) โดยเลือกให้  $\alpha = 2$  และ  $R = 3.3 \text{ K}$  ทั้งสองวงจร จะได้ค่าอุปกรณ์จากการคำนวณทุกตัวออกมา หลังจากนั้นจึงทำการเลือกค่าอุปกรณ์มาตรฐานที่ใกล้เคียงกันมาใช้ทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากค่าอุปกรณ์ที่ใช้จริงนี้ นำไปวิเคราะห์หาความถี่ที่เปลี่ยนแปลง จะได้ความถี่คัทออฟของวงจรอยู่ที่ 5003.48 KHz ส่วนความถี่ซีโรเปลี่ยนตำแหน่งจาก 7.5 KHz และ 10 KHz ไปอยู่ที่ 7.32 KHz และ 11.5 KHz ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1: เปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองกับค่าจากการคำนวณ

อุปกรณ์	วงจรร้อยส่วนที่ 1			วงจรร้อยส่วนที่ 2		
	คำนวณได้	ใช้งานจริง	%คลาดเคลื่อน	คำนวณได้	ใช้งานจริง	%คลาดเคลื่อน
C'	1.72	1.8	4.65	1.32	1.2	- 9.09
C	5.03	4.7	- 6.56	5.03	4.7	- 6.56
C <sub>1</sub>	16.44	15.0	- 8.76	9.25	10.0	8.11
C <sub>2</sub>	3.69	3.9	5.69	3.47	3.3	- 4.90
C <sub>3</sub>	1.34	1.2	-10.45	1.56	1.8	15.38
R'	9.67	10.0	3.41	12.54	12.0	- 4.31
R	3.30	3.3	0.00	3.30	3.3	0.00
R <sub>1</sub>	3.48	3.3	- 5.17	2.32	2.4	3.45
R <sub>2</sub>	4.50	4.7	4.44	4.78	4.7	- 1.67
R <sub>3</sub>	29.13	30.0	2.99	7.86	7.5	4.58

\*คาปาซิเตอร์ ในหน่วยนาโนฟารัด

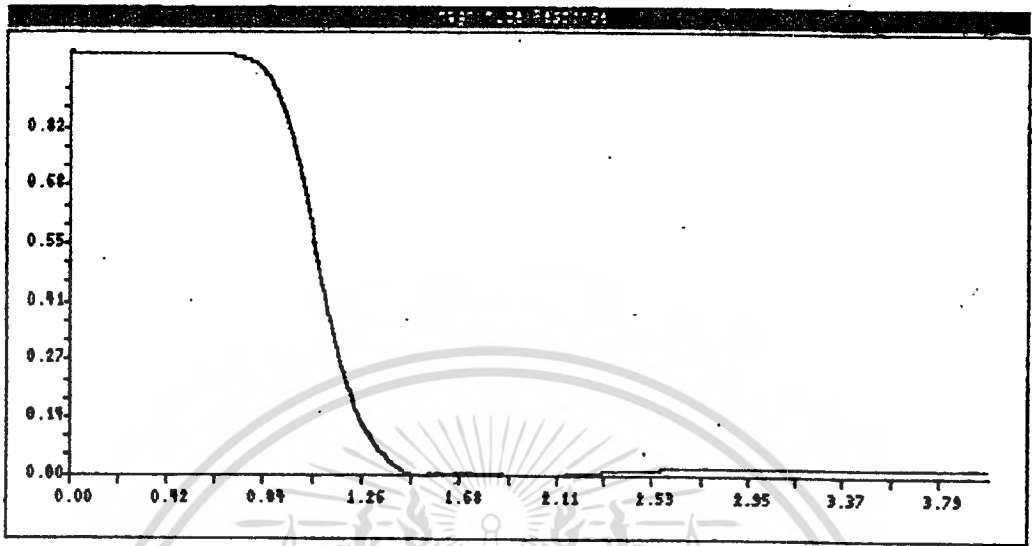
\*รีซิสเตอร์ ในหน่วยกิโลโอห์ม

รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองขนาดของฟังก์ชันที่ใช้ทดลอง ในขณะที่ผลตอบสนองขนาดที่วิเคราะห์จากวงจรถจริงแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าผลตอบสนองทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก โดยผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรมีอัตราการค้ำทอต่ำกว่าเล็กน้อย

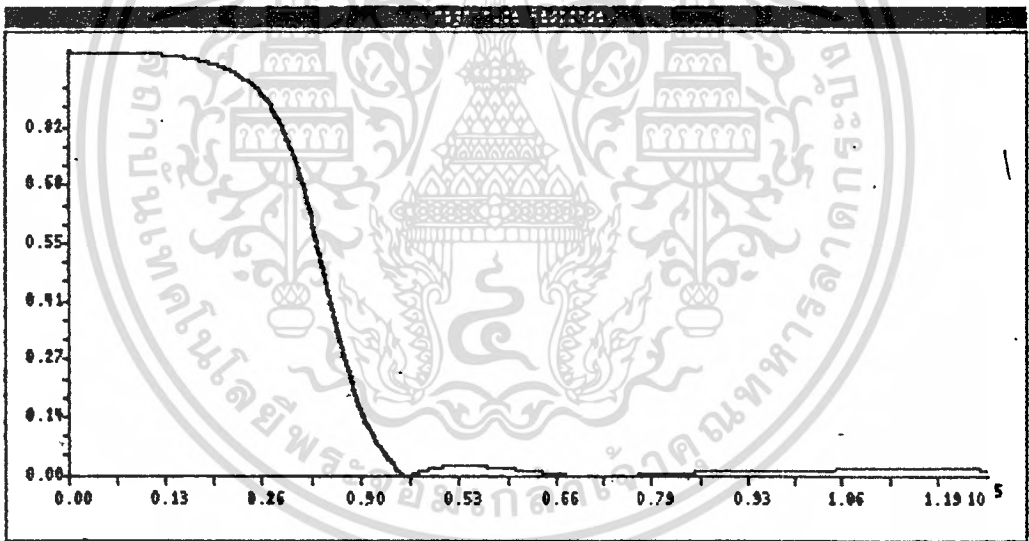
วงจรถดลองแสดงในรูปที่ 4.3 โดยใช้รีซิสเตอร์ชนิดคาร์บอนซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อน 5% และคาปาซิเตอร์ชนิดเซรามิก ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 20% จนถึง 100% ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการวิเคราะห์วงจรได้สูงมาก อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาแนวโน้มโดยทั่วไป วงจรนี้ยังคงให้ผลตอบสนองในลักษณะที่ต้องการได้

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลจากการวิเคราะห์วงจร โดยที่สัญญาณแต่ละความถี่ แสดงให้เห็นทั้งขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในหน่วยโวลต์, ค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบล และเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของการทดลอง จะเห็นว่าในย่านความถี่ต่ำ มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมาก และจะเริ่มลดลงเมื่อใกล้ความถี่ค้ำทอซึ่งเกิดขึ้นระหว่างความถี่ 4700-4800 Hz ส่วนความถี่ซีโรซึ่งสัญญาณเอาต์พุตมีค่าต่ำที่สุดสังเกตได้เพียงจุดเดียวที่ความถี่ 7100 Hz

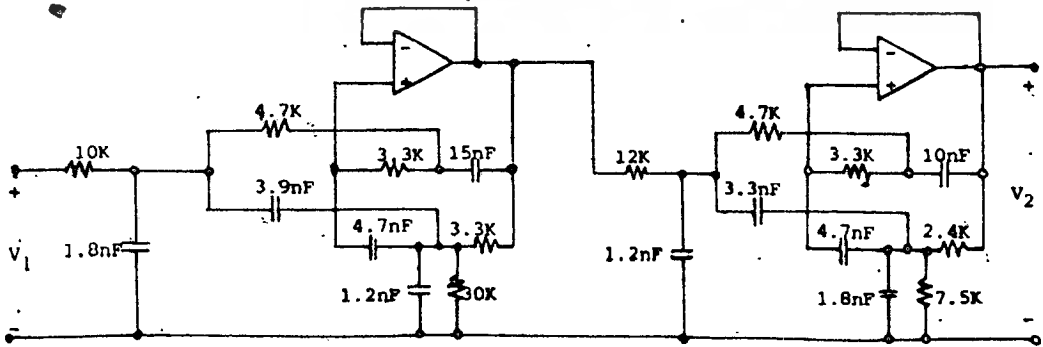
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 : เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์วงจร

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตขนาด 20 โวลต์

ความถี่	จากการคำนวณ		จากการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ ผิดพลาด
	เอาต์พุต(โวลต์)	การสูญเสีย (dB)	เอาต์พุต(โวลต์)	การสูญเสีย (dB)	
100	20.00	0.00	20.00	0.00	0.00
200	20.00	0.00	20.00	0.00	0.00
300	20.00	0.00	19.80	0.09	-0.99
500	20.00	0.00	19.80	0.09	-0.98
700	19.99	0.00	19.80	0.09	-0.96
1000	19.98	0.01	19.80	0.09	-0.92
2000	19.89	0.05	20.00	0.00	0.57
3000	19.54	0.20	20.20	-0.09	3.40
4000	18.41	0.72	19.00	0.45	3.18
4300	17.69	1.07	18.00	0.92	1.77
4400	17.37	1.23	17.30	1.26	-0.38
4500	17.00	1.41	16.70	1.57	-1.75
4600	16.57	1.63	15.70	2.10	- 5.25
4700	16.08	1.89	15.00	2.50	- 6.72
4800	15.52	2.20	14.00	3.10	-9.79
4900	14.88	2.57	12.20	4.29	-18.03
5000	14.17	2.99	11.50	4.81	-18.83
5100	13.38	3.49	10.20	5.85	-23.76
5200	12.52	4.07	9.20	6.74	-26.52
5300	11.60	4.73	8.00	7.96	-31.06
5500	9.67	6.31	6.00	10.46	-37.95
5700	7.74	8.25	4.30	13.35	-44.41
6000	5.14	11.80	2.50	18.06	-51.39
6200	3.74	14.57	1.70	21.41	-54.49
6400	2.60	17.71	1.06	25.51	-59.27
6600	1.72	21.32	0.56	31.06	-67.39
6800	1.04	25.67	0.25	38.06	-76.00
6900	0.77	28.29	0.24	38.42	-68.83
7000	0.54	31.44	0.10	46.02	-81.35
7100	0.34	35.50	0.03	57.08	-91.66
7200	0.16	41.68	0.07	48.87	-56.30
7500	0.20	39.82	0.20	40.00	- 2.10
8000	0.49	32.18	0.25	38.06	-49.22
8400	0.55	31.18	0.24	38.42	-56.52
8700	0.54	31.35	0.25	38.06	-53.84
9000	0.50	31.98	0.27	37.56	-47.36
9600	0.39	34.31	0.32	35.92	-16.94
10000	0.30	36.61	0.35	35.14	-18.44
10400	0.21	39.72	0.36	34.89	74.34
10700	0.14	42.92	0.37	34.66	159.04
11000	0.08	47.65	0.40	33.98	382.28
12000	0.08	47.43	0.45	32.96	429.47
12500	0.15	42.46	0.44	33.15	192.04
13000	0.21	39.77	0.42	33.56	104.57
14000	0.29	36.88	0.40	33.98	39.62
15000	0.34	35.44	0.40	33.98	18.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

วงจรรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ธ ใช้วิธีคาสเคดด้วยวงจรลำดับที่สอง ในขณะที่วงจรรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟ ใช้วิธีคาสเคดด้วยวงจรลำดับที่สาม ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบในจำนวนวงจรที่เท่ากัน แบบเมอร์โรแมฟย่อมมีลำดับที่สูงกว่า ซึ่งหมายถึงสมรรถนะการลดทอนสัญญาณที่ดีกว่าด้วย หรืออีกนัยหนึ่งแบบเมอร์โรแมฟย่อมต้องการจำนวนวงจรที่นำมาคาสเคดน้อยกว่าแบบบัตเตอร์เวิร์ธ เพื่อทำให้เกิดผลตอบสนองขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงการใช้โอเปอเรชันแอมพลิฟายเออร์จำนวนลดลง อันมีผลดีในด้านการลดการใช้กำลังงานไฟฟ้า, ความร้อนที่กำเนิดจากวงจร และอัตราส่วนนอยส์ต่อสัญญาณ เป็นต้น

การออกแบบใหม่ โดยการเพิ่มความถี่ซีโรที่กำหนดค่าได้หลายค่า ลงในฟังก์ชันเมอร์โรแมฟ มีประโยชน์ในด้านการใช้งานอย่างกว้างขวาง กล่าวคือ นอกจากจะทำให้อัตราการคัตออฟสูงขึ้นแล้ว ยังสามารถใช้กำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการรอบ ๆ ความถี่ที่ทราบค่าได้หลายจุดอีกด้วย ในด้านการสร้างวงจร สามารถใช้วิธีคาสเคดด้วยวงจรลำดับที่สาม เช่น วงจรบ็อกเคอร์ได้

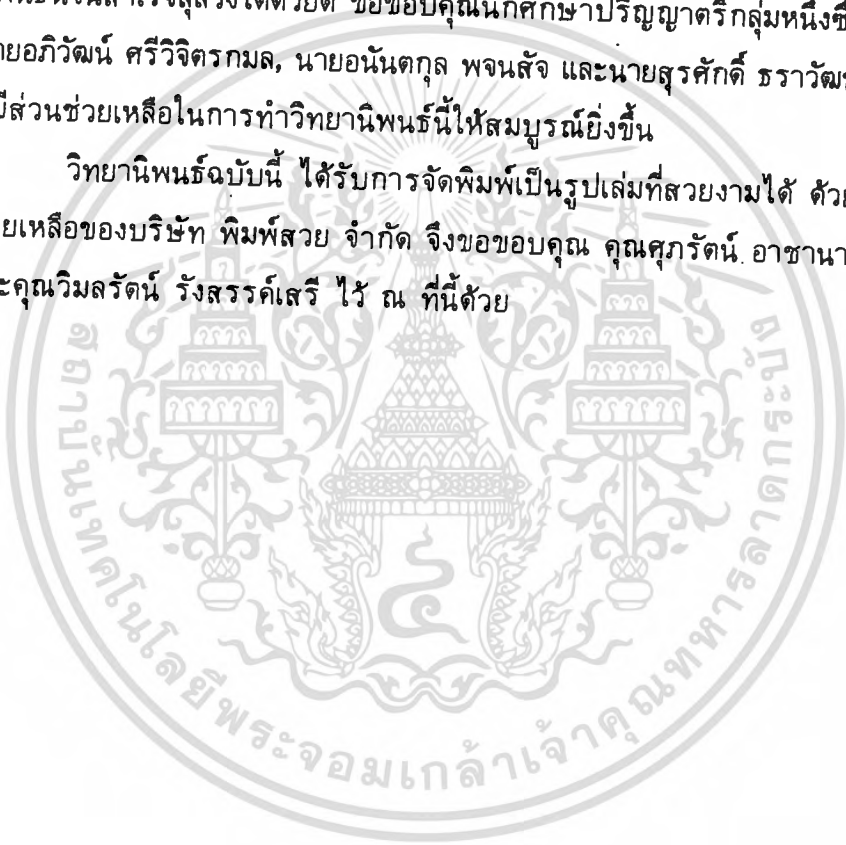
จากความต้องการให้วงจรรองความถี่แบบใหม่นี้ สามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ตามใจชอบนี้เอง ทำให้ไม่สามารถควบคุมค่าลดทอนต่ำสุดในย่านหยุดสัญญาณได้ เนื่องจากค่าเหล่านี้จะแปรผันไปตามตำแหน่งซีโรที่กำหนด ในการใช้งานบางลักษณะซึ่งต้องการให้อัตราการคัตออฟมีค่าสูง และค่าลดทอนต่ำสุดในย่านหยุดสัญญาณมีค่าสูงที่สุดด้วย โดยไม่คำนึงถึงความถี่ซีโรว่าจะเกิดที่จุดใดบ้าง สามารถทำได้โดยการหาฟังก์ชันที่มีความถี่ซีโรกระจายอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งทำให้เกิดค่าลดทอนต่ำสุดในแต่ละช่วงมีค่าเท่ากัน หรือที่เรียกว่า มีขนาดรีปเปิ้ลเท่ากัน นั่นเอง ภายใต้หลักการประมาณขนาดแบบราบเรียบที่สุด ย่อมมีหนทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนางจรรองความถี่ชนิดดังกล่าวต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ไพรัช รัชชพงษ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การประสิทธิ์  
 ประสาทวิชาการแก่ผู้เขียน ตลอดจนช่วยแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีกลุ่มหนึ่งซึ่งได้แก่นายอภิวัฒน์ ศรีวิจิตรกมล, นายอนันตกุล พจนลัจ และนายสุรศักดิ์ ธรรมวัฒน์ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับการจัดพิมพ์เป็นรูปเล่มที่สวยงามได้ ด้วยความช่วยเหลือของบริษัท พิมพ์สวย จำกัด จึงขอขอบคุณ คุณศุภรัตน์ อาชานานุภาพ และคุณวิมลรัตน์ รังสรรค์เสรี ไว้ ณ ที่นี้ด้วย



## เอกสารอ้างอิง

1. P. Thajchayapong and Y. Rungsunseri, "Design of MURROMAF filters with preassigned pairs of transmission zeros at finite prescribed frequencies," *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 51-53, Jan. 1986
2. M. Biey and A. Premoli, "Maximally flat approximation of low-pass RC active filters with multiple real pole," *ibid.*, vol. 13, no. 3, pp. 76-78, Feb. 1977.
3. M. Biey and A. Premoli, "Design of low-pass maximally flat RC-active fitters with multiple real pole : the MURROMAF polynomials," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-25, pp. 196-200, Apr. 1978.
4. L.P. Huelsman; "Equal-valued-capacitor active-RC-network realisation of a 3rd-order lowpass Butterworth characteristics," *Electron Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 271-272, May 1971.
5. S. Tirtoprodjo, "Constraint removal for Huelsman's equal-valued-capacitor active RC circuit," *ibid.*, vol. 7, no. 16, pp. 448-449, Aug. 1971.
6. S.A. Boctor, "Design of a third-order single amplifier filter," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-22, pp. 329-334, Apr. 1975.
7. C.H. Wei, "Design of sharp cutoft low-pass maximally flat RC-active filters by cascading third-order blocks," *ibid.*, vol. CAS-27, pp. 411-413, May 1980.
8. A. Budak, *Passive and Active Network Analysis and Synthesis*. Boston : Houghton Mifflin, 1974.
9. V. Valkenburg, *Analog Filter Design*. New York : CBS college Publishing, 1982.
10. V. Valkenburg, *Introduction to Modern Network Synthesis*. New York : Wiley, 1960.
11. L.P. Huelsman and P.E. Allen, *Introduction to the Theory and Design of Active Filters*. New York : McGraw-Hill, 1980.
12. M.R. Spiegel, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. New York : McGraw-Hill, 1968.
13. D.E. Knuth, *Fundamental Algorithms*. Wolrd Student Series Edition, 1973.
14. G.S. Beveridge and R. Schechter, *Optimisation : Theory and Practice*. New York : McGraw-Hill, 1970.
15. G.S. Moschytz, *Linear Integrated Networks Design*. New York : Van Nostrand-Reinhold, 1975.
16. S.K. Mitra, *Analysis and Synthesis of Linear Active Networks*. New York : Wiley, 1969.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวกที่ 1

## คู่มือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ขั้นตอนต่าง ๆ ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบเมอร์โรแมฟซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ ดังอธิบายในบทที่ 3 ตลอดจนการออกแบบวงจรมอดเตอร์ลำดับที่สาม และการวิเคราะห์วงจร ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.2.2 (บทที่ 2) ได้ถูกนำมาเขียนให้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ง่ายต่อการใช้งานด้วยภาษาปาสคาลทั้งหมด โปรแกรมนี้เก็บไว้ในไฟล์ชื่อ MURROMAF.PAS ซึ่งต้องรันด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ไอบีเอ็ม-พีซี (IBM PC) ภายใต้เทอร์โบปาสคาล (TURBO PASCAL) ประกอบด้วยซอฟต์แวร์เทอร์โบกราฟฟิคทูลบ็อกซ์ (TURBO Graphics Tool Box) เพื่อเพิ่มความสามารถของโปรแกรมทางด้านกราฟฟิคสำหรับการพล็อตผลตอบสนองชนิดต่าง ๆ ของฟังก์ชันที่ออกแบบ

โปรแกรมสำเร็จรูปนี้ ประกอบด้วยไฟล์ย่อย ๆ ทั้งหมด 10 ไฟล์ ดังต่อไปนี้

MURROMAF.PAS	โปรแกรมหลัก
APPROX.PAS	โปรแกรมย่อยสำหรับการคำนวณออกแบบฟังก์ชัน
RESPONSE.PAS	โปรแกรมย่อยสำหรับพล็อตผลตอบสนองของฟังก์ชัน
BOCTOR.PAS	โปรแกรมย่อยสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์วงจรมอดเตอร์ลำดับที่สาม
POLRT.PAS	โปรแกรมย่อยสำหรับคำนวณหารากของสมการโพลีโนเมียล
TYPEDEF.SYS	โปรแกรมย่อยที่อยู่ภายในเทอร์โบกราฟฟิคทูลบ็อกซ์
GRAPHIX.SYS	
KERNEL.SYS	
AXIS.HGH	
POLYGON.HGH	

ต่อจากนี้ จะได้อธิบายถึงขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปนี้โดยละเอียด ประกอบด้วยวิธีการออกแบบกรณี  $n=6$ ,  $\mu=3$ ,  $r=3$ ,  $m_1=m_2=m_3=1$  และ  $\omega_{01}=1.4$ ,  $\omega_{02}=1.8$ ,  $\omega_{03}=2.0$  ซึ่งต้องใช้วงจรมอดเตอร์ลำดับที่สาม 3 วงจรคาสเคดกัน

-----  
**MURROMAF filter design package**  
 -----

- 1) Approximation Procedure
- 2) Plot Response of Function
- 3) Boctor Circuit
- 4) Exit

Select no.

รูปที่ 1

เริ่มด้วยการรันโปรแกรมชื่อ MURROMAF จะปรากฏข้อความของเมนูหลักบนจอภาพดังรูปที่ 1 ซึ่งมีทางเลือก 4 ทาง คือ

- 1) Approximation Procedure เป็นขั้นตอนการประมาณขนาดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของฟังก์ชันกรองความถี่แบบเมอริโรแมฟ
- 2) Plot Responses of Function คือการพล็อตกราฟแสดงผลตอบสนองของฟังก์ชัน ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1
- 3) Boctor Circuit สำหรับออกแบบและวิเคราะห์วงจรบ็อคเตอร์ลำดับที่สาม จากฟังก์ชันที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 1
- 4) Exit ออกจากโปรแกรมนี้

การใช้งาน จะต้องเริ่มจากขั้นตอนที่ 1 เสมอ ซึ่งเมื่อเลือกหมายเลข i แล้ว จะต้องทำการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับฟังก์ชันที่ต้องการ ดังในรูปที่ 2

-----  
**Approximation Procedure**  
 -----

n	=	6
u	=	3
m	=	3
W0[1]	=	1.4
W0[2]	=	1.8
W0[3]	=	2.0

รูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วนแล้ว จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันขนาดกำลังสอง ซึ่งได้แก่ ตัวประกอบนอร์มัลไลซ์  $\alpha$ , ค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลส่วน  $a_i (i=0,1,\dots,n)$ , สัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลเศษ  $b_i (i=0,1,\dots,2m)$ , ตำแหน่งโพลจริง  $w_r$ , ตำแหน่งโพลเชิงซ้อน  $(\sigma_i, \beta_i)$  และค่า  $w_{ni}, Q_i$  ดังแสดงในรูปที่ 3

$n = 6, u = 3, m = 3$ $w0[1] = 1.40 \quad w0[2] = 1.80 \quad w0[3] = 2.00$				
Coefficients of Function : $alp = 0.433316$				
-----				
$i$	$a(i)$	$b(i)$		
-----				
1	6.45241E+002	6.45241E+002		
2	-9.2818E+003	-1.3793E+003		
3	6.00761E+004	1.20453E+003		
4	-2.3617E+005	-5.5037E+002		
5	6.49352E+005	1.38941E+002		
6	-1.3785E+006	-1.8400E+001		
7	2.44633E+006	1.00000E+000		
Pole Location : $W_r = 2.307782$				
-----				
$i$	$S_{mi}$	$B_{ti}$	$W_{ni}$	$Q_i$
-----				
1	0.146390	1.002133	1.012769	3.459139
2	0.495519	1.005621	1.121077	1.131215
3	1.037123	0.909705	1.379561	0.665090
... Press any key to continue ...				

รูปที่ 3

เมื่อผ่านขั้นตอนที่ 1 แล้ว สามารถเลือกใช้งานขั้นตอนที่ 2 หรือ 3 ก็ได้ สมมุติถ้าเลือกหมายเลข 2 จอภาพจะปรากฏเมนูดังในรูปที่ 4 โดยที่

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no.

รูปที่ 4

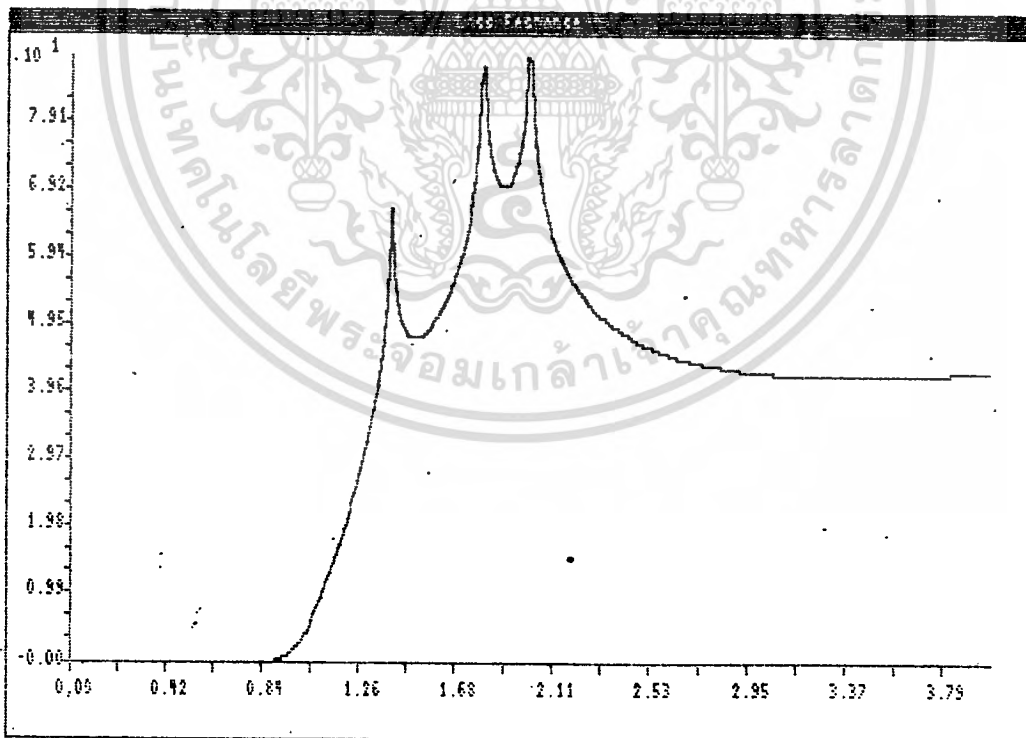
- 1) Loss Response สำหรับพล็อตค่าสูญเสียของสัญญาณในหน่วยเดซิเบลเทียบกับความถี่
  - 2) Magnitude Response สำหรับพล็อตค่าอัตราขยายของฟังก์ชัน (ไม่มีหน่วย) เทียบกับความถี่
  - 3) Phase Response คือการพล็อตความต่างเฟสระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต ในหน่วยองศา ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน
  - 4) Delay Response สำหรับพล็อตค่าเวลาหน่วงของสัญญาณในระบบ หน่วยเป็นวินาที เทียบ กับความถี่
  - 5) Lowpass to Highpass คือการพล็อตผลตอบสนองการสูญเสีย (Loss Response) ของฟังก์ชัน กรองความถี่สูงผ่านที่ได้จากการแปลงความถี่ของฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่าน
  - 6) Exit to Main Menu กลับเข้าสู่เมนูหลัก
- รูปที่ 5-9 แสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นจากการเลือกหมายเลข 1-5 ตามลำดับ

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no. 1

from  $w = 0$  to  $w = 4$



รูปที่ 5 |

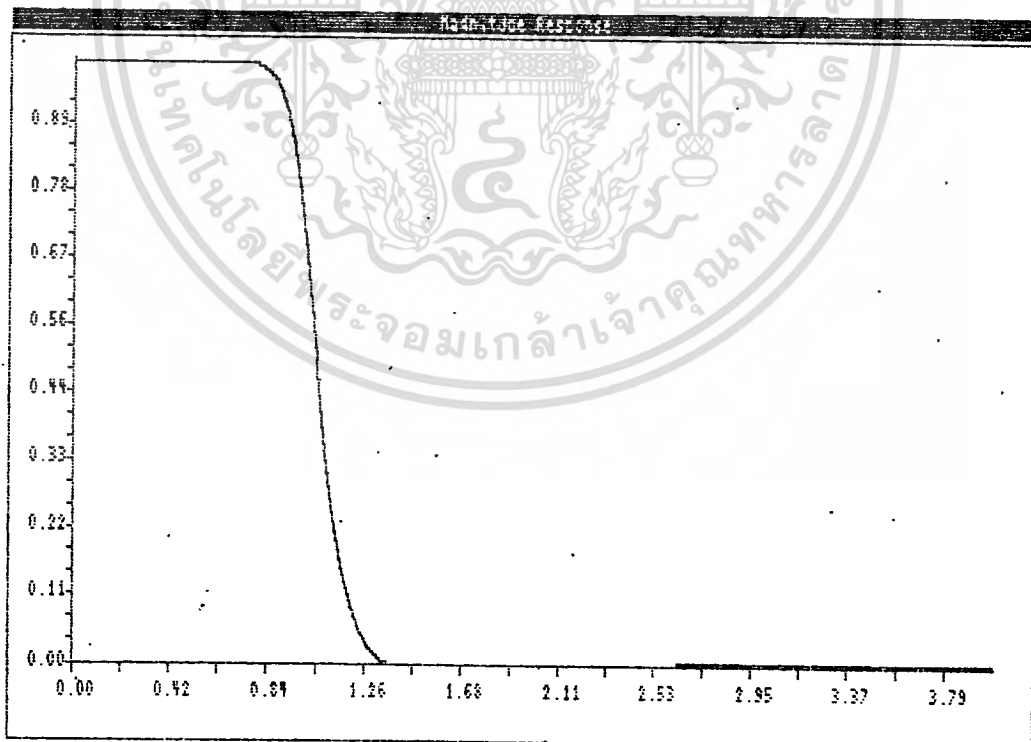
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no. 2

from  $w = 0$  to  $w = 4$



รูปที่ 6

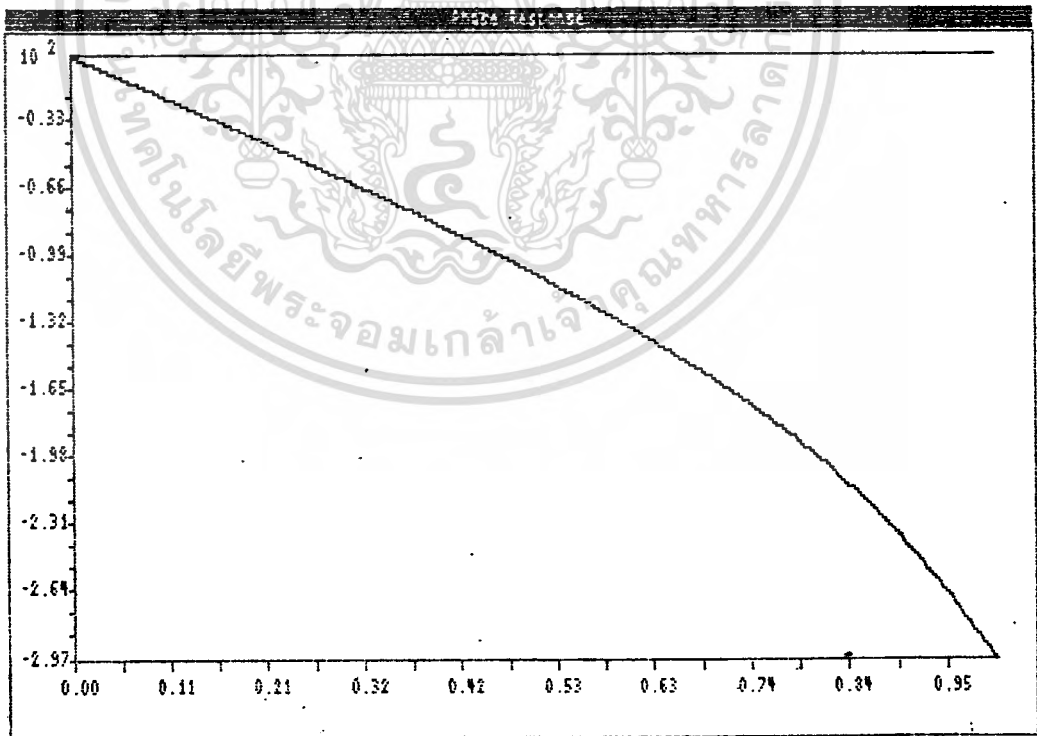
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no. 3

from  $w = 0$  to  $w = 1$



รูปที่ 7

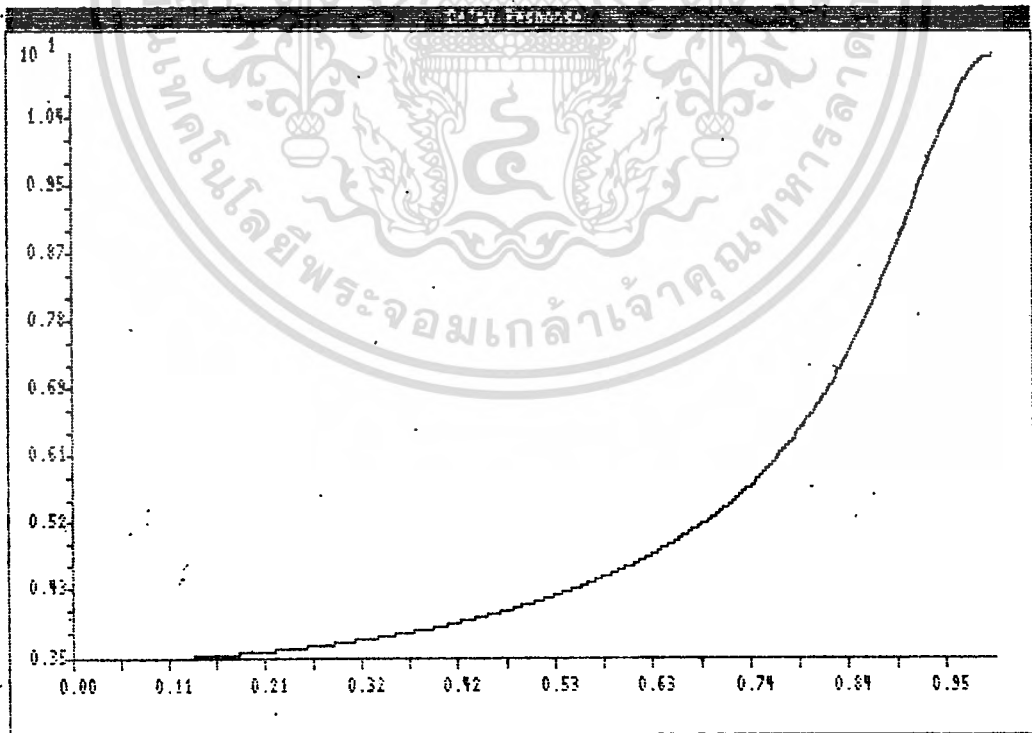
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no. 4

from  $w = 0$  to  $w = 1$



รูปที่ 8!

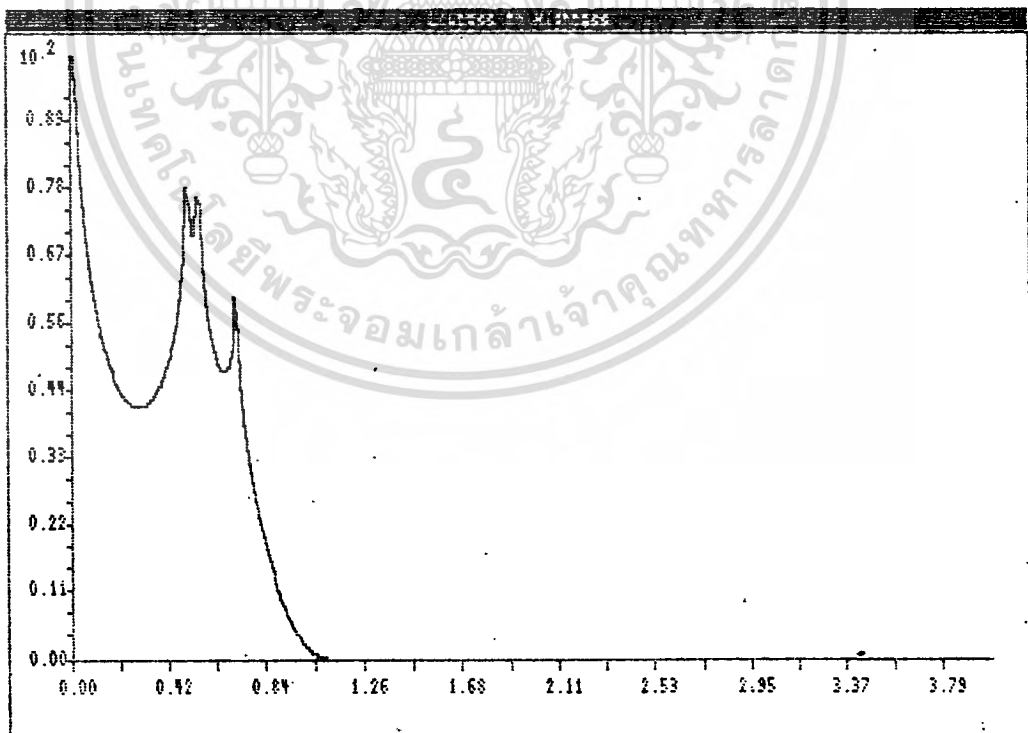
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-----  
**Plot Responses of Function**  
 -----

- 1) Loss Response
- 2) Magnitude Response
- 3) Phase Response
- 4) Delay Response
- 5) Lowpass to Highpass
- 6) Exit to main

Select no. 5

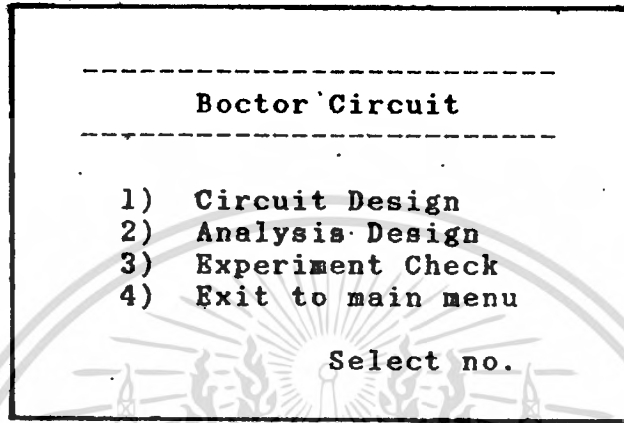
from  $w = 0$  to  $w = 4$



รูปที่ 9'

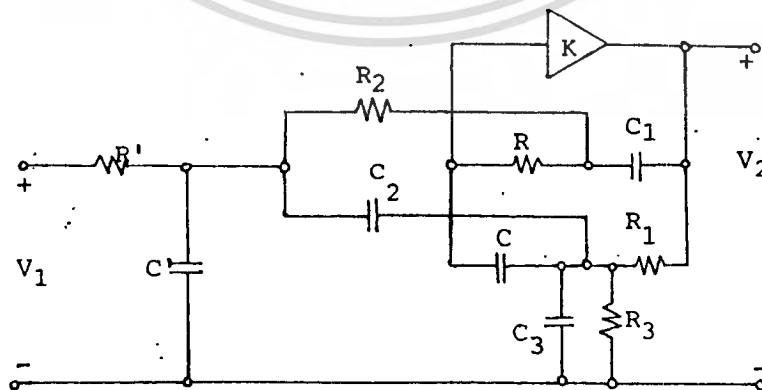
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 1 คือ Approximation Procedure แล้ว อาจเลือกหมายเลข 3 (Boctor Circuit) ในเมนูหลักได้ทันที ซึ่งจะแสดงผลที่จอภาพดังรูปที่ 10 โดยที่



รูปที่ 10

- 1) Circuit Design คือขั้นตอนการออกแบบวงจรบ็อคเตอร์ลำดับที่สาม ซึ่งกำหนดตัวแปรสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังในรูปที่ 11
- 2) Circuit Analysis ใช้สำหรับวิเคราะห์บ็อคเตอร์ลำดับที่สาม เพื่อหาค่าแอมพลิจูดและซีโรของวงจรจากค่าอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอน Experiment Check ต่อไป
- 3) Experiment Check สำหรับสร้างตารางเปรียบเทียบผลของวงจรที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ
- 4) Exit to Main Menu กลับเข้าสู่เมนูหลัก



รูปที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนอื่น ควรเลือกหมายเลข 1 เพื่อออกแบบวงจรที่จะนำไปใช้งาน สมมุติต้องการให้เกิดความถี่  
 คัทออฟที่ 5 kHz โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของ alpha และ R จะได้ค่าอุปกรณ์จากการคำนวณในแต่ละวงจร  
 ดังในรูปที่ 12-14

```

-----
                Circuit Design : Stage 1
-----

frequency cut off = 5000
alpha             = 2
resistance        = 10000

zero frequency   = 7.00E+003
real pole        = 1.15E+004
natural frequency = 5.06E+003
Q factor         = 3.46E+000

                Computational Values

Capacitors (nanoFarad)  Resistors (kiloOhm)

C'   = 0.55           R'   = 25.09
C    = 1.38           R    = 10.00
C1   = 7.50           R1   = 17.10
C2   = 1.05           R2   = 13.13
C3   = 0.33           R3   = 157.65

... Press any key to Continue ...
  
```

รูปที่ 12

-----  
**Circuit Design : Stage 2**  
 -----

frequency cut off = 5000  
 alpha = 1.5  
 resistance = 4700

zero frequency = 9.00E+003  
 real pole = 1.15E+004  
 natural frequency = 5.61E+003  
 Q factor = 1.13E+000

**Computational Values**

Capacitors (nanoFarad)      Resistors (kiloOhm)

C'	=	1.35	R'	=	10.23
C	=	2.93	R	=	4.70
C1	=	9.65	R1	=	6.89
C2	=	1.74	R2	=	7.94
C3	=	1.20	R3	=	16.42

... Press any key to Continue ...

รูปที่ 13

-----  
**Circuit Design : Stage 3**  
 -----

frequency cut off = 5000  
 alpha = 1.8  
 resistance = 6800

zero frequency = 1.00E+004  
 real pole = 1.15E+004  
 natural frequency = 6.90E+003  
 Q factor = 6.65E-001

Computational Values

Capacitors (nanoFarad)      Resistors (kiloOhm)

C' = 0.86	R' = 16.13
C = 2.03	R = 6.80
C1 = 5.40	R1 = 8.67
C2 = 1.44	R2 = 9.59
C3 = 0.59	R3 = 13.62

.....Last state.....

รูปที่ 14

ในเชิงปฏิบัติ ไม่สามารถหาค่าอุปกรณ์ได้ตรงกับค่าจากการคำนวณ จะต้องเลือกใช้ค่าอุปกรณ์มาตรฐานที่ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณมากที่สุด ถ้าหากต้องการดูตำแหน่งโพลและซีโรที่แท้จริงของวงจร ทำได้โดยเลือกหมายเลข 2 (Circuit Analysis) หลังจากป้อนค่าอุปกรณ์ทุกตัวในวงจรแล้ว จะได้ตำแหน่งโพลและซีโรของแต่ละวงจรดังในรูปที่ 15-17 ค่าที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์วงจรนี้ จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ POLE.ANL เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในขั้นตอนต่อไป

-----  
 Circuit Analysis : Stage 1  
 -----

Components Usage

Capacitors (nanoFarad)      Resistors (kiloOhm)

C'	= .5	R'	= 24
C	= 1.3	R	= 10
C1	= 7.5	R1	= 18
C2	= 1	R2	= 12
C3	= .33	R3	= 150

zero frequency	= 7.58E+003
real pole	= 1.30E+004
natural frequency	= 5.43E+003
Q factor	= 3.61E+000

... Press any key to Continue ...

รูปที่ 15

-----  
 Circuit Analysis : Stage 2  
 -----

Components Usage

Capacitors (nanoFarad)      Resistors (kiloOhm)

C'	= 1.2	R'	= 10
C	= 3	R	= 4.7
C1	= 10	R1	= 6.8
C2	= 1.8	R2	= 8.2
C3	= 1.2	R3	= 15

zero frequency	= 1.03E+004
real pole	= 1.29E+004
natural frequency	= 5.30E+003
Q factor	= 1.04E+000

... Press any key to Continue ...

รูปที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

Circuit Analysis : Stage 3

---

Components Usage

Capacitors (nanoFarad)      Resistors (kiloOhm)

C' = .86

R' = 15

C = 2

R = 6.8

C1 = 5.1

R1 = 8.6

C2 = 1.5

R2 = 10

C3 = .57

R3 = 12

zero frequency = 1.15E+004

real pole = 1.28E+004

natural frequency = 6.90E+003

Q factor = 6.15E-001

..... Last Stage .....

---

Circuit Analysis

---

frequency cut off = 5249.78

.....End.....

ANY KEY for MENU :

รูปที่ 17

สมมุติว่า ได้นำวงจรนี้ไปทดลอง แล้วบันทึกค่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ต่าง ๆ กัน โดยให้สัญญาณอินพุตมีขนาดคงที่ นำมาบอณเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ EXP.DAT ดังตัวอย่างในรูปที่ 18

10	
500	10
1000	10
3000	10
4000	9.8
4500	9.3
5000	8.1
5500	5.3
6000	2.1
6500	0.6
7000	0.15
7500	0.01
8000	0.02
10000	0.001

รูปที่ 18

ข้อมูลภายในไฟล์ EXP.DAT ให้เก็บอยู่ในรูปแอสกี (ASCII) หรือที่เรียกว่าเท็กซ์ไฟล์ (Text file) เพื่อให้สามารถบอณข้อมูลโดยใช้เอ็ดิตอริใด ๆ เช่น เวิร์ดสตาร์ (WORDSTAR) หรือไซด์คิก (SIDEKICK) เป็นต้น โดยข้อมูลเรคอร์ดแรกให้บงขนาดของสัญญาณอินพุต และข้อมูลเรคอร์ดต่อไปทั้งหมด ประกอบด้วยเรคอร์ดละ 2 ข้อมูล ค่าแรกเป็นความถี่ของสัญญาณในหน่วยเฮิรซ์ (Hz) ให้บอณจากคอลัมน์ที่ 1-14 ค่าที่สองเป็นขนาดของสัญญาณเอาต์พุตในหน่วยเดียวกับสัญญาณอินพุต ให้บอณจากคอลัมน์ที่ 15-28

เมื่อเลือกหมายเลข 3 (Experiment Check) โปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลของการทดลองจากไฟล์ EXP.DAT และข้อมูลจากการวิเคราะห์วงจรในไฟล์ POLE.ANL เพื่อคำนวณเปรียบเทียบในรูปขนาดของสัญญาณเอาต์พุตและอัตราการลดทอนสัญญาณในหน่วยเดซิเบล พร้อมทั้งคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ความถี่ต่าง ๆ ดังในรูปที่ 19

-----  
Experiment Check  
-----

$V_{in} = 10.00$

FREQ.	COMPUTATION		EXPERIMENT		%ERROR
	V out	Loss	V out	Loss	
500	10.00	-0.00	10.00	0.00	-0.04
1000	10.01	-0.01	10.00	0.00	-0.15
3000	9.98	0.02	10.00	0.00	0.22
4000	9.64	0.32	9.80	0.18	1.67
4500	9.2	0.68	9.30	0.63	0.53
5000	8.24	1.68	8.10	1.83	-1.75
5500	5.36	5.41	5.30	5.51	-1.56
6000	2.21	13.13	2.10	13.56	-4.77
6500	0.72	22.82	0.60	24.44	-17.02
7000	0.19	34.54	0.15	36.48	-20.03
7500	0.01	57.57	0.01	60.00	-24.41
8000	0.03	50.16	0.02	53.98	-35.62
10000	0.00	70.75	0.00	80.00	-65.51

Continue TABLE with any key :

รูปที่ 19

จากที่อธิบายมาข้างต้น จะเห็นว่าโปรแกรมสำเร็จรูปชุดนี้ มีประโยชน์ต่อผู้สนใจที่จะนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเมอโรโรแมฟ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ซีโรได้ไปใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องทำความเข้าใจทางทฤษฎีให้ลึกซึ้งแต่ประการใด

## ภาคผนวกที่ 2

### รายละเอียดของโปรแกรม

ไฟล์ที่ 1 : MURROMAF.PAS

```

(*****)
(*
(*      MURROMAF  filter design package
(*      Version 1.0
(*
(*      By  Yuttapong Rungsunseri
(*      Copyright   May,1,1986
(*
(*****)

```

```

program MURROMAF;

type  ar15      =array[1..15] of real;
      ar7       =array[1..7]  of real;
      coff_array =array[1..30] of real;
label one,two,three,four;
var   i,j,k,m,mt,Ur,
      n,y
      w0,Wr,Wn,Q,
      Sm,Bt
      a,b,p,c
      as,rootr,rooti
      filvar
      w,alp,sum,hw2,sumb,
      alp1,alp2,x,z,ak,aa
      num
      :integer;
      :ar7;
      :ar15;
      :coff_array;
      :text;
      :real;
      :char;

```

```
{ Function name : POWER(base,order) }
```

```

function power(x:real;n:integer):real;
var  kk :real;
begin (*----- POWER -----*)
  if x = 0 then
    power := 0

```

```

else
  if (x<0) and (odd(n)) then
    power := exp(ln(abs(x))*n)*-1
  else
    begin
      kk := ln(abs(x))*n;
      power := exp(kk);
    end;
end; (*----- POWER -----*)

```

```

{$I typedef.sys}
{$I graphix.sys}
{$I kernel.sys}
{$I axis.hgh}
{$I polygon.hgh}

```

```

{$I RESPONSE.PAS}
{$I POLRT.PAS}
{$i APPROX.PAS}
{$I BOCTOR.PAS}

```

```

begin (*----- MURROMAF -----*)
  repeat
    clrscr;
    gotoxy(24,1); write('-----');
    gotoxy(24,2); write('  MURROMAF filter design package  ');
    gotoxy(24,3); write('-----');
    gotoxy(24,5); write('  1)  Approximation Procedure  ');
    gotoxy(24,6); write('  2)  Plot Response of Function  ');
    gotoxy(24,7); write('  3)  Boctor Circuit  ');
    gotoxy(24,8); write('  4)  Exit  ');
    gotoxy(24,11);write('                               Select no. ');
    repeat
      read(kbd,num); write(num);
      delay(200);
      case num of
        '1' : Function_Approximation;
        '2' : Plot_Response;
        '3' : Boctor_Circuit;
        '4' : halt;
      end;
    until num in ['1','2','3','4'];
  until l=2;
end.

```

## ไฟล์ที่ 2 : APPROX.PAS

```

(*****
(*)
(*)          MURROMAF  filter design package          (*)
(*)          Procedure : Function Approximation        (*)
(*)          (*)                                       (*)
(*****

```

```

procedure Function_Approximation;

```

```

label
    one,two,three,four;
Var
    CC : char;

```

```

Procedure printline;

```

```

Var i:integer;
begin
    for i := 1 to 56 do
        write('-');
        writeln;
end;

```

```

(*)-----(*)
(*)  Proced. NAME   :POLMUL (A,B,n,m,C)                (*)
(*)  PURPOSE       :MUTIPLY 2 POLYNOMIAL              (*)
(*)  ENTRY         :A-(n+1) ARRAY OF COEFFICIENTS POL#1 (*)
(*)               :B-(m+1) ARRAY OF COEFFICIENTS POL#2 (*)
(*)               :n-HIGHEST DEGREE OF POL#1         (*)
(*)               :m-HIGHEST DEGREE OF POL#2         (*)
(*)  EXIT          :C-(m+n+1) ARRAY OF COEF .PRODUCTS (*)
(*)-----(*)

```

```

procedure polmul(VAR a,b :arl5 ;var n:integer;m:integer;var c :arl5
var i,k :integer;

```

```

begin
    for i := 0 to m+n do
        begin
            c[i+1] := 0;
            for k := 0 to m do
                begin
                    j := i-k;
                    if (j>=0) and(j<=n ) then
                        c[i+1] := c[i+1]+a[j+1]*b[k+1];
                end;
            end;
        end;
end;

```

end; เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่สามารถแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(*-----*)
(*      FUNCTION NAME   : FACT (n)          *)
(*      PURPOSE         : FIND FACTORIAL OF VALUE n      *)
(*      ENTRY           : n- NUMBER WILL BE FIND FACTORIAL *)
(*                      (n IS NON-NEGATIVE INTEGER NUMBER *)
(*-----*)
```

```
function fact(n:integer):real;
var i:integer;
    fac:real;
begin
  case n of
    -100..-1 : begin
      writeln;
      writeln('ERROR:FACTORIAL OF NEGATIVE NUMBER');
      halt
    end;
    0 : fact := 1.0;
    1..100 : begin
      fac := 1;
      for i := 1 to n do fac := fact*i;
      fact := fac;
    end;
  end;
end;
```

```
(*-----*)
(*      FUNCTION NAME   : COMB (IA,IB)      *)
(*      PURPOSE         : FIND COMBINATION BETWEEN IA AND IB *)
(*      ENTRY           : IA,IB             *)
(*                      NORMALLY IA GREATER THAN OR EQUAL TO IB *)
(*-----*)
```

```
function comb(var ia,ib:integer):real;
begin
  if (ib>ia) or (ia<0) or (ib<0) then
    comb := 0
  else
    comb := fact(ia)/(fact(ib)*fact(ia-ib));
  end;
```

```

(*-----*)
(*  Proc. NAME   : LocPole (A,n,Wn,Q)                *)
(*  PURPOSE     : COMPUTE POLES PARAMETER           *)
(*  ENTRY       : A-(n+1) ARRAY OF POLYNOMIAL COEF. *)
(*              n-POLYNOMIAL 'S DEGREE(14 MAX)     *)
(*              alp-SCALING FACTOR                  *)
(*  EXIT        : Wn -POLES FREQUENCY (n VALUE)     *)
(*              Q -Q FACTORS (n VALUE)              *)
(*-----*)

```

```

procedure LocPole(VAR a:ar15; Var n :integer;
                 Var alp:real; Var Wn,Q:ar7);
label
  four,three;

var i,j,k,ier,tel :integer;
    tmp           :real;
begin
  for i := 1 to 20 do as[i] := 0.0;
  for i := 0 to n do
    as[2*i+1] := a[i+1]*power(alp,(2*i))*power((-1),i);
  tel := 2*n;
  polrt(as,tel,rootr,rooti,ier);
  if ier > 0 then
    begin
      writeln('POLRT ERROR IER = ',ier);
      halt
    end;
  j := 0;
  for i := 1 to 2*n do
    begin
      if not((rootr[i]<=0.0) or (rooti[i]<=0.0)) then
        begin
          j := j+1;
          Sm[j] := rootr[i];
          Bt[j] := rooti[i];
          Wn[j] := sqrt(sqr(Sm[j])+sqr(Bt[j]));
          Q[j] := Wn[j]/2.0/Sm[j];
        end;
    end;
  three:end;
  if j <> (n div 2) then
    begin
      writeln('ROOT ERROR J=',J);
      halt;
    end;
  {..... SORT Q IN DESENDING .....}
  four:
    k := 0;
    for i := 1 to j-1 do
      if Q[i] < Q[i+1] then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

begin
  k := 1;
  tmp := Q[i];
  Q[i] := Q[i+1];
  Q[i+1] := tmp;
  tmp := Wn[i];
  Wn[i] := Wn[i+1];
  Wn[i+1] := tmp;
  tmp := Sm[i];
  Sm[i] := Sm[i+1];
  Sm[i+1] := tmp;
  tmp := Bt[i];
  Bt[i] := Bt[i+1];
  Bt[i+1] := tmp;
end;
if k=1 then goto four;
end;

Procedure Print_Result;
Begin (*----- Print_Result -----*)
  ClrScr;
  Writeln('n = ',n,', u = ',ur:1,', m = ',m:1);
  for i := 1 to m do
    Write(' w0['',i,''] = ',W0[i]:4:2);
  Writeln;
  Writeln;
  Writeln('Coefficients of Function : alp = ',alp:8:6);
  Writeln;
  printline;
  Writeln(' i a(i) b(i)');
  delay(500);
  printline;
  for i := 1 to n+1 do
    Writeln(' ',i:2,', a[i]:12,', b[i]:12);
  Writeln;
  Writeln;
  Writeln('Pole Location : Wr = ',Wr[1]:8:6);
  Writeln;
  printline;
  Writeln(' i Smi Bti Wni Qi');
  printline;
  for i := 1 to (n div 2) do
    Writeln(' ',i:2,', Sm[i]:12:6,Bt[i]:12:6, Wn[i]:12:6,Q[i]:12:6);
  writeln;
  write('... Press any key to continue ...');
  read(kbd,CC);
end; (*----- Print_Result -----*)

```

```

begin (*----- Function_Approximation -----*)
  clrscr;
  gotoXY(28,1); writeln('-----');
  gotoXY(28,2); writeln('  Approximation Procedure  ');
  gotoXY(28,3); writeln('-----');
  gotoXY(38,5); write('n = '); readln(n);
  gotoXY(38,6); write('u = '); readln(ur);
  gotoXY(38,7); write('m = '); readln(m);
  if m > 0 then
    for i := 1 to m do
      begin
        gotoXY(34,8+i);
        write('WO[' , i, ' ] = ');
        readln(WO[i]);
      end;
  {..... FIND SET OF b[K] .....}
  if m = 0 then
    begin
      mt := 0;
      b[1] := 1;
      goto one
    end;
  mt := 2;
  b[1] := sqr(WO[1]*WO[1]);
  b[2] := -2*sqr(WO[1]);
  b[3] := 1;
  if m = 1 then goto one;
  for i := 2 to m do
    begin
      p[1] := sqr(WO[i]*WO[i]);
      p[2] := -2*sqr(WO[i]);
      p[3] := 1;
      POLMUL(B,P,mt,2,C);
      mt := mt+2;
      for k := 1 to mt+1 do b[k] := c[k];
    end;
  {..... Bisection  alp .....}
one:
  w := 1;
  a[1] := b[1];
  alp1 := 0; alp2 := 1;
  sumb := 0;

  for i := 0 to mt do
    sumb := sumb+b[i+1]*power(w,(2*i));
  for i := 0 to n do

```

```

      c[i+1] := comb(ur,i);
two:
  alp := (alp1+alp2)/2.0;
{..... COMPUTE H(W2) AT W = 1 .....}

  for i := 2 to n+1 do
    begin
      sum := 0;
      for j := 1 to i-1 do
        sum := sum+(power(alp,(2*i-2)))*c[i-j+1]*a[j];
      a[i] := (b[i]-sum)/power(alp,(2*i-2));
    end;

  sum := 0;
  for i := 0 to n do
    sum := sum+a[i+1]*power((alp*w),(2*i));
  hw2 := sumb/(power((1+alp*alp*w*w),ur)*sum);
  if hw2-0.5<0 then
    alp2 := alp
  else
    alp1 := alp;

  if alp2-alp1>=1e-7 then goto two;
  for i := 1 to 7 do Wr[i] := 0;
  for i := 1 to Ur do Wr[i] := 1/alp;
  LOCPOLE(A,n,alp,Wn,Q);

  Print_Result;
end; (*----- Function_Approximation -----*)

```

## ไฟล์ที่ 3 : RESPONSE.PAS

```

(*****)
(*)
(*)      MURROMAF filter design package      (*)
(*)      (*)
(*)      Procedure : Plot Response of Function (*)
(*)      (*)
(*****)

procedure Plot_Response;

function Compute_Response(NN:integer;W:real):real;
var sum,sum1,sum2,LW2 : real ;
    i : integer ;

function Loss (W:real):real;
var sum:real;
begin (*----- Loss -----*)
    sum := 1; sum1 := 1; sum2 := 1;
    for i := 1 to m do
        sum := sum*(1-sqr(w/W0[i]));

    for i := 1 to Ur do
        sum1 := sum1*(1+sqr(W/Wr[i]));

    for i := 1 to (n div 2) do
        sum2 := sum2*(sqr(sqr(W/Wn[i]))
            -(2-sqr(1/Q[i]))*sqr(W/Wn[i])+1);
    sum := sqr(sum)/(sum1*sum2);
    if sum < 1e-10 then sum := 1e-10;
    loss := sum;
end; (*----- Loss -----*).

begin (*----- Compute_Response -----*)
    case NN of
        1: {---- loss response ----}
            begin
                sum := loss(W);
                Compute_Response := -10*(ln(sum)/ln(10));
            end;

        2: {---- magnitude response ----}
            begin
                sum := loss(W);
                Compute_Response := Sqrt(sum);
            end;
    end;

```

```

3: {---- phase response ----}
begin
  sum := 0;  sum1 := 0;  sum2 := 0;
  for i := 1 to m do
  begin
    if W=WO[i] then sum := sum+pi/2;
    if W>WO[i] then sum := sum+pi;
  end;

  for i := 1 to Ur do
    sum1 := sum1+arctan(W/Wr[i]);

  for i := 1 to (n div 2) do
    sum2 := sum2+arctan(Wn[i]*W/(Q[i]*(Wn[i]*Wn[i]-W*W)));

  sum := sum-sum1-sum2;
  Compute_Response := sum*180/pi;
end;

4: {---- delay response ----}
begin
  sum := 0;
  for i := 1 to Ur do
    sum := sum + Wr[i]/(sqr(w)+sqr(Wr[i]));

  for i := 1 to (n div 2) do
    sum := sum + Q[i]*Wn[i]*(sqr(Wn[i])+sqr(W))/
      (sqr(Q[i]*(sqr(Wn[i])-sqr(W)))+sqr(W*Wn[i]));

  Compute_Response := sum;
end;

5: {---- lowpass to highpass transformation ----}
begin
  if w < 1e-4 then
    sum := 1e-10
  else
    sum := loss(1/W);
  Compute_Response := -10*(ln(sum)/ln(10));
end;
end; (* case *)
end; (*----- Compute_Response -----*)

const Response : array[1..6] of WrkString =
  ('Loss Response',
   'Magnitude Response',
   'Phase Response',
   'Delay Response',
   'Lowpass to Highpass',
   'Exit to main');

```

```

var  ch      : char      ;
     Equ     : integer   ;
     StartX,StopX,MinY,MaxY : real      ;
     AAA     : PlotArray ;

```

```

procedure Plotting;

```

```

var i      : integer ;
    dX     : real    ;
    ch     : char    ;

```

```

begin (*----- Plotting -----*)

```

```

  repeat

```

```

    repeat

```

```

      gotoxy(30,15);

```

```

      write ('from w = '); clreol;

```

```

      {$I-} read (StartX); {$I+}

```

```

    until ioreult=0;

```

```

    repeat

```

```

      write (' to w = '); clreol;

```

```

      {$I-} read (StopX); clreol; {$I+}

```

```

    until ioreult=0;

```

```

  until StartX < StopX ;

```

```

  InitGraphic;

```

```

  DefineHeader(1,Response[equ]);

```

```

  SetHeaderOn;

```

```

  DrawBorder;

```

```

  dX := (StopX-StartX)/(MaxPlotGlb-1);

```

```

  for i := 1 to MaxPlotGlb do

```

```

  begin

```

```

    AAA[i,1] := StartX +(i-1)*dX;

```

```

    AAA[i,2] := Compute_Response (Equ,AAA[i,1]);

```

```

    if (i=1) or (AAA[i,2]<MinY) then MinY := AAA[i,2];

```

```

    if (i=1) or (AAA[i,2]>MaxY) then MaxY := AAA[i,2];

```

```

  end;

```

```

  DefineWorld(1,StartX,MaxY,StopX,MinY);

```

```

  SelectWorld(1);

```

```

  DrawAxis(8,7,1,1,1,10,0,0,false);

```

```

  DrawPolygon(AAA,1,MaxPlotGlb,0,0,0);

```

```

  repeat

```

```

    read(kbd,ch);

```

```

    if ch=^P then Hardcopy (false,1);

```

```

  until ch=^M;

```

```

  leavegraphic;

```

```

end; (*----- Plotting -----*)

```

```

begin (*----- Plot_Response -----*)
  repeat
    clrscr;
    gotoxy (26,1);
    write ('-----');
    gotoxy (28,2);
    write ('Plot Responses of Function');
    gotoxy (26,3);
    write ('-----');
    for Equ := 1 to 6 do
      begin
        gotoxy(30,4+equ);
        write (equ,' ') ,Response[equ]);
      end;
    gotoxy(40,12); write('Select no. ');
    read(kbd,ch);write(ch);
    equ := ord(ch)-ord('0');
    if ch in ['1'..'5'] then plotting;
  until ch='6';
end; (*----- Plot_Response -----*)

```

## ไฟล์ที่ 4 : BOCTOR.PAS

```

(*****)
(*)
(*)      MURROMAF filter design package      (*)
(*)
(*)      Procedure : Boctor Circuit Design & Analysis      (*)
(*)
(*****)

PROCEDURE BOCTOR_Circuit;

TYPE
  Nfile      = ARRAY[1..10] OF REAL;

Var
  filvar, filename,
  filtype    : text;
  line       : string[80];
  word       : string[45];
  A, B       : string[14];
  St         : string[2];
  Temp       : ar7;
  i, j, n, y, dim, err : integer;
  Ch, Ch     : char;
  gamma, alpha, k1, k2, k3,
  c, c1, c2, ci, cp, cs,
  r, r1, r2, r3, rp,
  wcl, wc2, fc, Wc,
  Atten1, Atten2, Vin, Vout, f,
  Vo, G1, G2, Error : real;

Function Mag2(m:integer;w:real) : real;
var mag : real;
begin
  mag := 1;
  for i := 1 to M do
    mag := sqr(1-sqr(Wc/W0[i]))
          / ( (1+sqr(Wc/Wr[i]))
              *( sqr(sqr(Wc/Wn[i]))
                  -(2-1/sqr(Q[i]))*sqr(Wc/Wn[i])
                  +1) ) * mag;
  Mag2 := abs(mag);
end;

```

```

Procedure Calculation(J:integer; Var ci,cp,rl,r2,r3,rp:real);
Begin
  ci := c/alpha*(alpha-1+k1);
  cp := c/alpha/(alpha-1)*k1*(alpha-1+k1);
  rl := r*alpha*Wr[J]/Wn[J]/(sqr(W0[J])/Wn[J]/Wr[J]
    *(2*alpha-1+k1)-1/Q[J]);
  r2 := r*alpha/(alpha-1+k1);
  r3 := r*Q[J]*Wr[J]*alpha/Wn[J];
  rp := r/k1*alpha*(alpha-1)/(alpha-1+k1);
End;

```

```

Procedure Analysis(J:integer; Var W0,Wr,Wn,Q:ar7);
Begin
  Wr[J] := 0;
  gamma := cp*c2/(cp*c2+ci*(c2-ci));
  cs := c/2;
  k1 := gamma/rp/cp+1/r3/c2+(1-gamma)*(1/r/c+1/r3/(c2-ci)-1/r3/c2)
  k2 := gamma/rp/r3/cp/c2+1/r/r2/cl/cs+(1-gamma)
    *(1/r/r3/c/(c2-ci)-1/r/r2/cl/cs);
  k3 := gamma/rp/cp/r/r2/cl/cs;
  As[4] := 1;
  As[3] := -1*k1;
  As[2] := k2;
  As[1] := -1*k3;
  dim := 3;
  Polrt(As,dim,rootr,rooti,err);
  for i := 1 to 3 do
    if rooti[i]=0 then
      Wr[J] := rootr[i];
  W0[J] := Wr[J]*sqrt(r*r2*(rl+r3)/(rl*r3*(r+r2)));
  Wn[J] := sqrt(k3/Wr[J]);
  Q[J] := Wn[J]/(k1-Wr[J]);
End;

```

```

Procedure FreqCutoff(M:integer; Var fc:real);
Begin
  wc1 := 0;
  wc2 := W0[1];
  repeat
    Wc := (wc1+wc2)/2;
    G1 := Mag2(m,Wc);
    if G1 < 1/2 then
      wc2 := Wc
    else
      wc1 := Wc;
  until (wc2-wc1) < 1e-6;
  fc := Wc/pi/2;
End;

```

```

Procedure ExpCheck(M:integer;Vo:real;
                  Var G1,G2,Vout,Atten1,Atten2,Error:real);

```

```

Begin

```

```

  Wc := 2*pi*f;

```

```

  {..... Analysis Data .....}

```

```

  G1 := Mag2(m,Wc);

```

```

  Vout := sqrt(G1)*Vin;

```

```

  Atten1 := -10*Ln(G1)/Ln(10);

```

```

  {..... Experiment Data .....}

```

```

  G2 := Vo/Vin;

```

```

  Atten2 := -20*Ln(G2)/Ln(10);

```

```

  Error := (Vo-Vout)/Vout * 100;

```

```

End;

```

```

Procedure CutPower(nano,kilo:real;

```

```

                  Var c,r,cl,c2,ci,cp,r1,r2,r3,rp:real);

```

```

Begin

```

```

  c := c/nano;

```

```

  r := r/kilo;

```

```

  cl := cl/nano;

```

```

  c2 := c2/nano;

```

```

  ci := ci/nano;

```

```

  cp := cp/nano;

```

```

  r1 := r1/kilo;

```

```

  r2 := r2/kilo;

```

```

  r3 := r3/kilo;

```

```

  rp := rp/kilo;

```

```

End;

```

```

Procedure PrintCompute;

```

```

begin

```

```

  writeln;

```

```

  writeln('          Computational Values');

```

```

  writeln;

```

```

  writeln('  Capacitors (nanoFarad)  Resistors (kiloOhm) ');

```

```

  writeln;

```

```

  CutPower(1e-9,1e3,c,r,cl,c2,ci,cp,r1,r2,r3,rp);

```

```

  writeln('  C'      = ',cp:6:2',      R'      = ',rp:6:2);

```

```

  writeln('  C      = ',c:6:2',      R      = ',r:6:2);

```

```

  writeln('  C1     = ',cl:6:2',      R1     = ',r1:6:2);

```

```

  writeln('  C2     = ',ci:6:2',      R2     = ',r2:6:2);

```

```

  writeln('  C3     = ',c2-ci:6:2',    R3     = ',r3:6:2);

```

```

end;

```

```

Procedure PrintCurve(J:integer);
Begin
  writeln;
  writeln('      zero frequency           = ',W0[J]/pi/2:9);
  writeln('      real pole                   = ',Wr[J]/pi/2:9);
  writeln('      natural frequency          = ',Wn[J]/pi/2:9);
  writeln('      Q factor                    = ',Q[J]:9);
End;

```

```

Procedure PrintUse(Var c,r,cl,c2,ci,cp,rl,r2,r3,rp:real);
Begin
  writeln('                        Components Usage');
  writeln;
  writeln('      Capacitors (nanoFarad)   Resistors (kiloOhm) ');
  writeln;
  i := 9;
  write('      C' = '); read(cp);
  gotoxy(32,i); write('R' = '); readln(rp);
  write('      C = '); read(c);
  gotoxy(32,i+1); write('R = '); readln(r);
  write('      Cl = '); read(cl);
  gotoxy(32,i+2); write('R1 = '); readln(rl);
  write('      C2 = '); read(ci);
  gotoxy(32,i+3); write('R2 = '); readln(r2);
  write('      C3 = '); read(c2); c2:=c2+ci;
  gotoxy(32,i+4); write('R3 = '); readln(r3);
  CutPower(1/1e-9,1/1e3,c,r,cl,c2,ci,cp,rl,r2,r3,rp);
End;

```

```

Procedure Menu(k,l:integer);
Begin
  Str(1:2,St);
  Case k of
    2:word := '      Circuit Design : Stage '+St+'      ';
    3:word := '      Circuit Analysis : Stage '+St+'      ';
    4:word := '      Experiment Check      ';
    5:word := '      Circuit Analysis      ';
  End;

```

```

  ClrScr;
  writeln(' -----');
  writeln(word);
  writeln(' -----');
  writeln;

```

```
End;
```

```

Begin (*----- Boctor_Circuit -----*)
  Repeat
    Clrscr;
    gotoXY(27,1); writeln('-----');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if J=M then
            write('          .....Last state.....')
        else
            write('... Press any key to Continue ...');
            read(kbd,Ch);
        end;
    end; (*----- Circuit Design -----*)

'2' : begin (*----- Circuit Analysis -----*)

    {..... Save Analysis Parameter .....}
    Assign(filename,'POLE.ANL');
    Rewrite(filename);
    For J := 1 to N do
    begin
        Menu(3,J);
        PrintUse(c,r,cl,c2,ci,cp,rl,r2,r3,rp);
        Analysis(J,W0,Wr,Wn,Q);

        writeln(filename,W0[J]:14);
        writeln(filename,Wr[J]:14);
        writeln(filename,Wn[J]:14);
        writeln(filename,Q[J]:14);

        PrintCurve(J);
        writeln;
        if j=n then
            write('          ..... Last Stage .....')
        else
            write('... Press any key to Continue ...');
            read(kbd,Ch);
        end;
        Close(filename);

        {..... Print Analysis Cutoff-Frequency .....}
        Menu(5,0);
        FreqCutoff(N,fc);
        writeln('          frequency cut off = ',fc:7:2);
        writeln;
        writeln('          .....End.....');
        writeln;
        write(' ANY KEY for MENU : '); read(kbd,Ch);
    end; (*----- Circuit Analysis -----*)

'3' : begin (*----- Experiment Check -----*)
    Menu(4,0);

    {..... Read Analysis Data .....}
    Assign(filename,'POLE.ANL');
    Reset(filename);

```

```

    J := 0;
    While Not Eof(filename) do
    begin
        J := J+1;
        for i := 1 to 4 do
        begin
            readln(filename,line);
            Val(line,Temp[i],y);
        end;
        W0[j] := Temp[1];
        Wr[j] := Temp[2];
        Wn[j] := Temp[3];
        Q[j] := Temp[4];
    end;
    Close(filename);

    {..... Read Experiment Input Voltage .....}
    Assign(filtype,'EXP.DAT');
    Reset(filtype);
    readln(filtype,line);
    Val(line,Vin,y);

    {..... Print Header .....}
    writeln(' V in = ',Vin:5:2);
    writeln;
    write('FREQ.':8,'COMPUTATION':18);
    writeln('EXPERIMENT':20,'%ERROR':14);
    write('V out':18,'Loss':10);
    writeln('V out':10,'Loss':10);
    writeln;

    n := 0;

    {..... Compare Experiment & aAnalysis Result .....}
    While Not Eof(filtype) do
    begin
        n := n+1;

        {..... Read Experiment Data .....}
        readln(filtype,A,B);
        Val(A,f,y);
        Val(B,Vo,y);

        ExpCheck(j,Vo,G1,G2,Vout,Atten1,Atten2,Error);

        {..... Table Printing .....}
        writeln(f:8:0,Vout:10:2,Atten1:10:2,
            Vo:10:2,Atten2:10:2,Error:12:2);

        if (((n mod 13)=0) and (n<14)) or ((n mod 22)=0) then

```

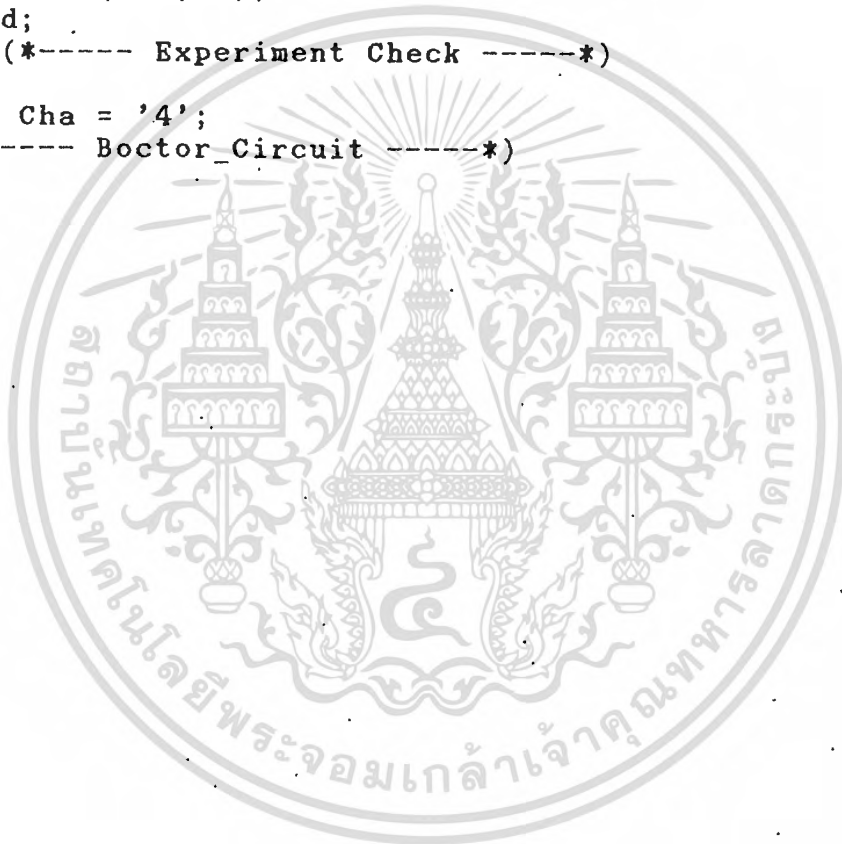
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

begin
  if ((n mod 13)=0) and (N<14) then n := n+9;
  writeln;
  writeln(' Continue TABLE with any key :');
  read(kbd,Ch);
end
end;
writeln;
writeln(' ANY KEY for MENU.: ');
read(kbd,Ch);
end;
end; (*----- Experiment Check -----*)

Until Cha = '4';
End; (*----- Boctor_Circuit -----*)

```



## ไฟล์ที่ 5 : POLRT.PAS

```

(*****
*)
*)          MURROMAF  filter design package          *)
*)
*)          Procedure : Solve Roots of Polynomial    *)
*)
*)          *)
(*****
)
PROCEDURE POLRT(VAR XCOF : COFF_ARRAY; VAR M : INTEGER;
                VAR ROOTR,ROOTI : COFF_ARRAY; VAR IER : INTEGER);

```

## PURPOSE

COMPUTE THE REAL AND COMPLEX ROOTS OF A REAL POLYNOMIAL  
USAGE

POLRT(XCOF,M,ROOTR,ROOTI,IER)

## DESCRIPTION

XCOF - VECTOR OF M+1 COEFFICIENTS OF THE POLYNOMIAL  
ORDER FROM SMALLEST TO LARGEST POWER  
M - ORDER OF POLYNOMIAL  
ROOTR- RESULTANT VECTOR OF LENGTH M CONTAINNING REAL ROOTS  
OF THE POLYNOMIAL  
ROOTI- RESULTANT VECTOR OF LENGTH M CONTAINNING THE  
CORRESPONDING THE IMAGINARY ROOTS OF THE POLYNOMIAL  
IER - ERROR CODE WHERE  
IER=0 NO ERROR  
IER=1 M LESS THAN ONE  
IER=2 M GREATER THAN 36  
IER=3 UNABLE TO DETERMINE ROOT WITH 500 ITERATIONS  
ON 5 STARTING VALUES  
IER=4 HIGH ORDER COEFFICIENT IS ZERO

## REMARKS

LIMITED TO 36 TH ORDER POLYNOMIAL OR LESS.  
FLOATING POINT OVERFLOW MAY OCCUR FOR HIGH ORDER  
POLYNOMIALS BUT WILL NOT AFFECT THE ACCURACY OF THE RESULTS.

## METHOD

NEWTON-RAPHSON ITERATIVE TECHNIQUE. THE FINAL ITERATIONS  
ON EACH ROOT ARE PERFORMED USING THE ORIGINAL POLYNOMIAL  
RATHER THAN THE REDUCED POLYNOMIAL TO AVOID ACCUMULATED  
ERROR IN THE REDUCED POLYNOMIAL.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
LABEL 999,59,55,100,120,122,135,140,145,155,
110,130,60,50,78,45,80;
```

```
TYPE STATUS = (MINUS,ZERO,PLUS);
```

```
VAR COF : COFF_ARRAY;
X0,Y0,X,Y,XPR,YPR,UX,UY,V,VT,YT,XT,U,XT2,YT2,SUMSQ,
FI,DX,DY,TEMP,ALPHA : REAL;
ITEMP,IFIT,N,NX,NXX,N2,KJ1,L,MT,INN,ICT : INTEGER;
```

```
FUNCTION REAL_STAT(X : REAL):STATUS;
BEGIN
IF ( X < 0.0 ) THEN REAL_STAT := MINUS
ELSE IF ( X = 0.0 ) THEN REAL_STAT := ZERO
ELSE REAL_STAT := PLUS
END;
```

```
FUNCTION INT_STAT(I : INTEGER) : STATUS;
BEGIN
IF ( I < 0 ) THEN INT_STAT := MINUS
ELSE IF ( I = 0 ) THEN INT_STAT := ZERO
ELSE INT_STAT := PLUS
END;
```

```
BEGIN
IFIT := 0; N := M; IER := 0;

CASE ( REAL_STAT(XCOF[N+1])) OF
ZERO : BEGIN
IER := 4;
GOTO 999
END;
MINUS,PLUS : CASE (INT_STAT(N) ) OF
MINUS,ZERO : BEGIN
IER := 1;
GOTO 999
END;
PLUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
END; (* END OF INNER CASE *)

END; (* END OF OUTER CASE *)

IF ( N-35 > 0 ) THEN BEGIN IER := 2; GOTO 999 END;
NX := M; NXX := N+1; N2:=1 ; KJ1 := N+1;
FOR L:=1 TO KJ1 DO
BEGIN
```

```

      MT := KJ1 - L + 1;
      COF[MT] := XCOF[L]
END;

(* SET INITIAL VALUE *)
45 : X0 := 0.00500101; Y0 := 0.001000101;
(* SET ZERO INITIAL VALUE *)
INN := 0;
50 : X:=X0;
(* INCREMENT INITIAL VALUE AND COUNTER *)
X0 := -10.0*Y0; Y0 := -10.0*X;
(* SET X AND Y TO CURRENT VALUE *)
X := X0; Y := Y0; INN := INN+1;
GOTO 59;
55 : IFIT := 1; XPR :=X; YPR := Y;
(* EVALUATE POLYNOMIAL AND DERIVATIVES *)
59 : ICT := 0;
60 : UX := 0.0; UY := 0.0; V := 0.0; YT:=0.0; XT :=1.0;
      U := COF[N+1];
CASE (REAL_STAT(U)) OF
  ZERO : GOTO 130;
  MINUS,PLUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
END;
FOR I:=1 TO N DO
  BEGIN
    L := N-I+1; TEMP := COF[L];
    XT2 := X*XT - Y*YT; YT2 := X*YT + Y*XT;
    U := U+TEMP*XT2; V :=V+TEMP*YT2;
    FI := I; (* DEFLAUT CONVERT FROM INTEGER TO REAL *)
    UX := UX+FI*XT*TEMP; UY := UY-FI*YT*TEMP;
    XT := XT2; YT :=YT2
  END;
  SUMSQ := UX*UX + UY*UY;
CASE (REAL_STAT(SUMSQ)) OF
  ZERO : GOTO 110;
  PLUS,MINUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
END;
DX := (V*UY - U*UX)/SUMSQ; X := X+DX;
DY := -(U*UY + V*UX)/SUMSQ; Y := Y+DY;
CASE (REAL_STAT(ABS(DY)+ABS(DX)-0.00001)) OF
  MINUS : GOTO 100;
  ZERO,PLUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
END;

(* STEP ITERATION COUNTER *)
ICT := ICT +1;
CASE ( INT_STAT(ICT-500)) OF
  MINUS : GOTO 60;
  ZERO,PLUS : CASE (INT_STAT(IFIT)) OF
    ZERO: CASE (INT_STAT(INN-5)) OF

```

```

MINUS : GOTO 50;
ZERO,PLUS : BEGIN
                IER := 3; GOTO 999
                END
        END;
        MINUS,PLUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
        END
END;
100 : FOR L :=1 TO NXX DO
        BEGIN
                MT :=KJ1-L+1; TEMP := XCOF[MT];
                XCOF[MT] := COF[L]; COF[L] := TEMP
        END;
        ITEMP := N; N :=NX; NX := ITEMP;
        CASE (INT_STAT(IFIT)) OF
                ZERO : GOTO 55;
                MINUS,PLUS : GOTO 120
        END;
        110 : CASE (INT_STAT(IFIT)) OF
                ZERO : GOTO 50;
                MINUS,PLUS : BEGIN END (* CONTINUE *)
        END;
        X := XPR; Y := YPR;
        120 : IFIT :=0;
        122 : CASE (REAL_STAT(ABS(Y)-0.0001*ABS(X))) OF
                MINUS : GOTO 135;
                ZERO,PLUS : BEGIN END (*CONTINUE *)
        END;
        ALPHA := X+X; SUMSQ := X*X + Y*Y; N:=N-2;
        GOTO 140;
        130 : X := 0.0; NX := NX-1; NXX := NXX-1;
        135 : Y := 0.0; SUMSQ := 0.0; ALPHA := X; N :=N-1;
        140 : COF[2] := COF[2]+ALPHA*COF[1];
        145 : FOR L := 2 TO N DO
                COF[L+1] := COF[L+1]+ALPHA*COF[L]-SUMSQ*COF[L-1];
        155 : ROOTR[N2] := X; ROOTI[N2] := Y;
                N2 := N2+1;
        CASE (REAL_STAT(SUMSQ)) OF
                MINUS,PLUS : BEGIN
                        Y:=-Y; SUMSQ :=0.0; GOTO 155.
                END;
                ZERO : CASE (INT_STAT(N)) OF
                        MINUS,ZERO : GOTO 999;
                        PLUS : GOTO 45
                END
        END;
        END;
999 : END;

```

ภาคผนวกที่ 3  
ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ใน  
วารสารนานาชาติ

DESIGN OF MURROMAF FILTERS WITH  
PREASSIGNED PAIRS OF TRANSMISSION  
ZEROS AT FINITE PRESCRIBED  
FREQUENCIES

*Indexing term: Filters*

A design technique for a multiple-real-root maximally flat (MURROMAF) filter with preassigned pairs of transmission zeros at finite prescribed frequencies is described. It provides the advantages of a sharper cutoff and also an effective noise suppression around particular frequencies, while retaining the maximally flat passband response.

4th November 1985

P. THAJCHAYAPONG  
Y. RUNGSUNSERI\*

Computer Research & Service Centre  
\*Department of Computer Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkraband, Bangkok, Thailand

Reprinted from *ELECTRONICS LETTERS* 2nd January 1986 Vol. 22 No. 1 pp. 51-53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Introduction:* The MURROMAF (multiple-real-root maximally flat) filter introduced by Biey and Premoli<sup>1,2</sup> offers the advantages of third-order block realisation.<sup>3-5</sup> It was later extended to include pairs of coincident transmission zeros in order to improve the cutoff rate.<sup>6</sup> Such filters also provide an effective method for suppressing noise around a prescribed frequency. However, in practice noise may also appear at other frequencies. Furthermore, owing to the nature of the mathematical techniques involved in the design, the passband magnitude responses of the filters in Reference 6 will always deviate from the maximally flat criterion. A design technique is therefore proposed here whereby a MURROMAF filter can be derived with preassigned pairs of transmission zeros at various prescribed frequencies. The passband magnitude responses of this new class of filters always truly satisfy the maximally flat criterion.

*Design procedure:* Let the squared magnitude of the MURROMAF filter with transmission zeros be

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{\prod_{i=0}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i}}{(1 + \alpha^2 \omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha \omega)^{2i} \right]} \quad (1a)$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{2(m_0 + m_1 + \dots + m_r)} b_i \omega^{2i}}{(1 + \alpha^2 \omega^2)^\mu \left[ \sum_{i=0}^n a_i (\alpha \omega)^{2i} \right]} \quad (1b)$$

where  $n$  is the number of complex pole pairs and is an even number,  $\mu$  is the multiplicity of the real pole,  $\alpha$  is the normalisation factor to give  $|H(j)|^2 = 1/2$ , and  $\omega_{0i}$  is the prescribed location of the  $i$ th transmission zero.

For the realisability condition,<sup>7</sup> it is necessary that

$$m_0 + m_1 + \dots + m_r < \frac{n + \mu}{2} \quad (2)$$

The polynomial

$$\sum_{i=0}^{2(m_0 + m_1 + \dots + m_r)} h_i \omega^{2i}$$

in the numerator of eqn. 1b is seen as the result of expanding the factor product

$$\prod_{i=0}^r (\omega_{0i}^2 - \omega^2)^{2m_i}$$

in the numerator of eqn. 1a. This is done by using the binomial expansion formula<sup>8</sup> and the polynomial product algorithm.<sup>9</sup>

Now, by expanding the denominator of eqn. 1b into a power series in  $\omega^{2k}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , and equating the coefficients of the same  $\omega^{2k}$  with those of the numerator, we arrive at the matrix equation:

$$Ma = b \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \alpha^2 \binom{\mu}{1} & \alpha^2 & 0 & 0 & \dots \\ \alpha^4 \binom{\mu}{2} & \alpha^4 \binom{\mu}{1} & \alpha^4 & 0 & \dots \\ \alpha^6 \binom{\mu}{3} & \alpha^6 \binom{\mu}{2} & \alpha^6 \binom{\mu}{1} & \alpha^6 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha^{2n} \binom{\mu}{n} & \alpha^{2n} \binom{\mu}{n-1} & \alpha^{2n} \binom{\mu}{n-2} & \alpha^{2n} \binom{\mu}{n-3} & \dots & \alpha^{2n} \end{bmatrix} \begin{matrix} \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \\ \uparrow \\ \vdots \\ \uparrow \\ \uparrow \end{matrix} \begin{matrix} n+1 \\ n+1 \\ n+1 \\ n+1 \\ \vdots \\ n+1 \\ n+1 \end{matrix}$$

$$a^T = \overleftarrow{[a_0 \ a_1 \ \dots \ a_n]} \begin{matrix} n+1 \\ \leftarrow \end{matrix}$$

$$b^T = \overleftarrow{[b_0 \ b_1 \ \dots \ b_n]} \begin{matrix} n+1 \\ \leftarrow \end{matrix}$$

It is understood that

$$\binom{\mu}{k} = 0$$

for  $k > \mu$  and  $b_k = 0$  for  $k > 2(m_0 + m_1 + \dots + m_r)$ . For a given set of  $n$ ,  $\mu$ ,  $m_i$  and  $\omega_{0i}$ , solving this set of simultaneous linear equations gives the required  $a_i$  satisfying the maximally flat condition around  $\omega = 0$ .

$\alpha$  is still acting as the normalisation factor, and always lies in  $0 < \alpha \leq 1$ . Using the simple search techniques such as the binary search or Fibonacci search,<sup>10</sup> one can always determine the precise value of  $\alpha$  that gives  $|H(j)|^2 = 1/2$ .

*Design example:* The case of  $n = 10$ ,  $\omega_{00} = 1.4$ ,  $\omega_{01} = 1.6$ ,  $\omega_{02} = 2.0$  and  $m_0 = m_1 = m_2 = 1$  is arbitrarily chosen as a design example. The loss responses are illustrated in comparison with the Butterworth type of the same order in Fig. 1.<sup>11</sup> It is obvious that the cutoff rate and stopband attenuation increase with increasing  $\mu$ . Fig. 2 compares the case of  $n = 8$ ,  $\mu = 4$ ,  $\omega_{00} = 1.4$ ,  $\omega_{01} = 1.6$ ,  $\omega_{02} = 2.0$ ,  $m_0 = m_1 = m_2 = 1$  with the 10th-order Butterworth-type filter. The maximum difference in stopband attenuation between the two filters in Fig. 2 is less than 1.2 dB. Hence, if the slightly lower cutoff rate and minimum stopband attenuation can be tolerated, then a saving of one operational amplifier in realisation<sup>3 5</sup> can be achieved by using this new filter instead of the Butterworth-type filter.

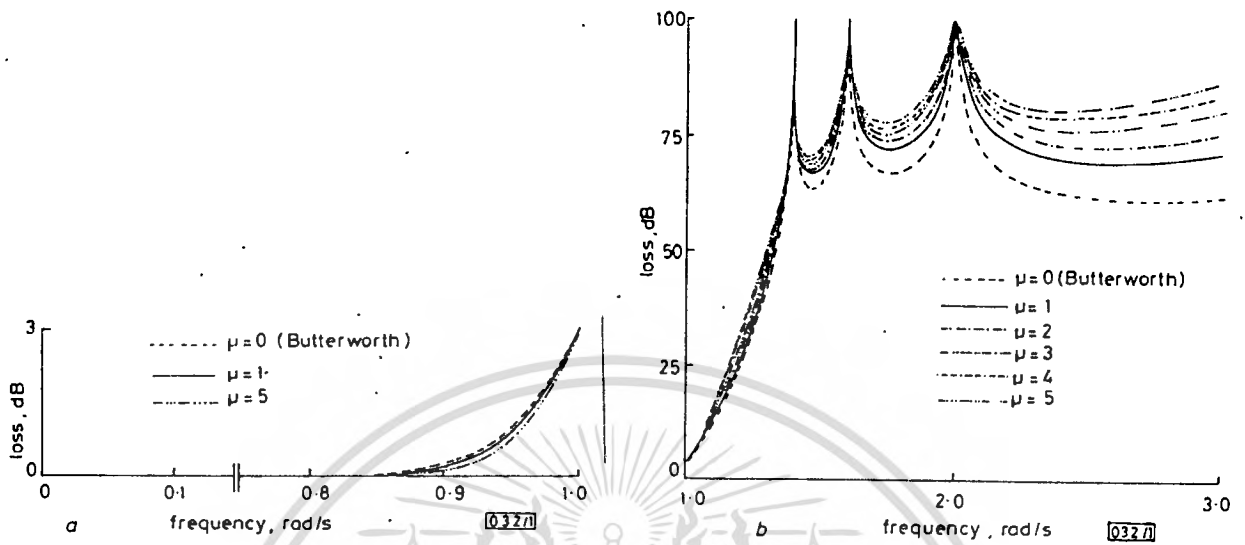


Fig. 1 Responses for  $n = 10$ ,  $\omega_{00} = 1.4$ ,  $\omega_{01} = 1.6$ ,  $\omega_{02} = 2.0$ ,  $m_0 = m_1 = m_2 = 1$   
 a Passband loss responses  
 b Stopband loss responses

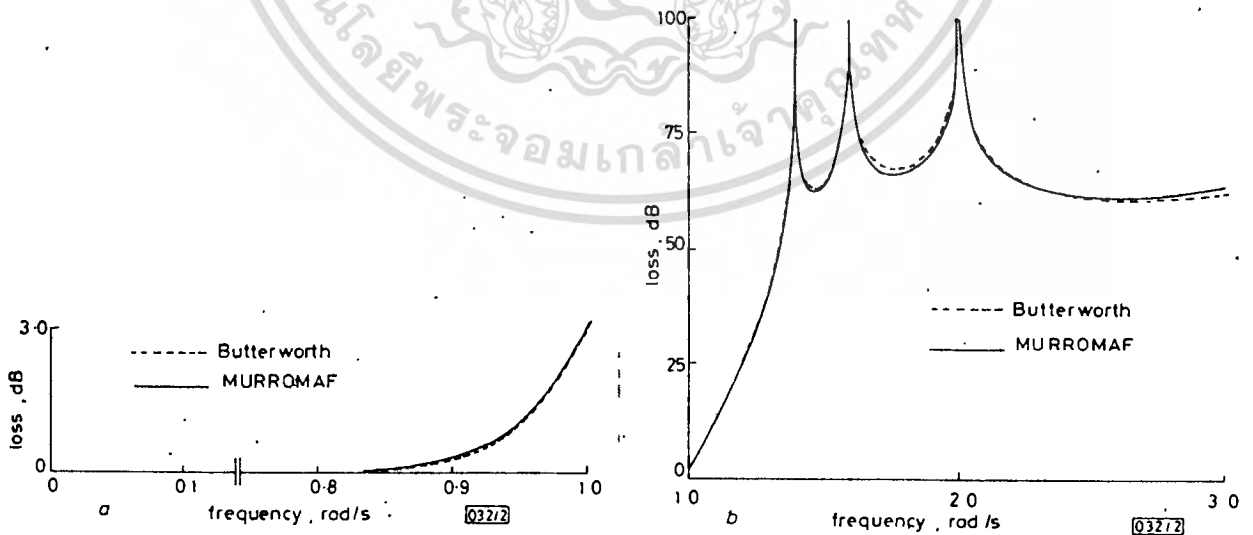


Fig. 2 Comparison of responses for MURROMAF  $n = 8$ ,  $\mu = 4$  with Butterworth  $n = 10$   
 a Passband loss responses  
 b Stopband loss responses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Conclusions and discussion.* It has been shown how to derive a multiple-real-root maximally flat (MURROMAF) filter with preassigned pairs of transmission zeros at finite prescribed frequencies. It provides an RC-active filter designer with many advantages. First, in comparison with the all-pole MURROMAF filter, this new class of filters offers a sharper cutoff rate and also effective noise suppression at or around particular frequencies. Secondly, in comparison with the Butterworth counterparts, this new class of filters exhibits higher cutoff rate and stopband attenuation for the same number of operational amplifiers employed in the realisation. Moreover, in certain circumstances where minimum stopband attenuation can be tolerated, a realisation of an RC-active lowpass filter with less operational amplifiers may also be achieved. The investigation is now being conducted further to design a MURROMAF with equiripple stopband.

#### References

- 1 BIEY, M., and PREMOLI, A.: 'Maximally flat approximation of lowpass RC active filters with multiple real pole', *Electron. Lett.*, 1977, 13, pp. 76-78
- 2 BIEY, M., and PREMOLI, A.: 'Design of low-pass maximally flat RC-active filters with multiple real pole: the MURROMAF polynomials', *IEEE Trans.*, 1978, CAS-25, pp. 196-200
- 3 HUELSMAN, L. P.: 'Equal-valued-capacitor active-RC-network realisation of a 3rd-order lowpass Butterworth characteristic', *Electron Lett.*, 1971, 7, pp. 271-272
- 4 TIRTOPRODJO, S.: 'Constraint removal for Huelsman's equal-valued-capacitor active RC circuit', *ibid.*, 1971, 7, pp. 448-449
- 5 BOXTOR, S. A.: 'Design of a third-order single amplifier filter', *IEEE Trans.*, 1975, CAS-22, pp. 329-334
- 6 WU, C.-H.: 'Design of sharp cutoff low-pass maximally flat RC-active filters by cascading third-order blocks', *ibid.*, 1980, CAS-27, pp. 411-413
- 7 VALKINSBURG, V.: 'Introduction to modern network synthesis' (Wiley, New York, 1960), pp. 78-79
- 8 SPIGEL, M. R.: 'Mathematical handbook of formulas and tables' (McGraw-Hill, New York, 1968)
- 9 KNUTH, D. E.: 'Fundamental algorithms' (World Student Series Edition, 1973), pp. 270-276
- 10 BEYRONGI, G. S., and SCHLICHNER, R.: 'Optimisation theory and practice' (McGraw-Hill, New York, 1970), Chap. VI, pp. 141-205
- 11 BUDAK, A.: 'Passive and active network analysis and synthesis' (Houghton Mifflin, 1974), pp. 512-515