

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรรองแถบความถี่ผ่านสำหรับสถานีวิทยุชุมชน

BAND PASS FILTER CIRCUIT FOR LOCAL COMMUNITY RADIO STATION



T104317



โดย

นายกิติพงษ์ เต๋าเขียว 49015045

นายยงยุทธ อินทะชัย 49015066

นายอนุพงษ์ ทูมอันทน์ 49015079

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...104317
วัน,เดือน,ปี...- 2 พ.ย. 2552

.....
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม
ผ่านการตรวจปลอมแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

วงจรรองแถบความถี่ผ่านสำหรับสถานีวิทยุชุมชน

BAND PASS FILTER CIRCUIT FOR LOCAL COMMUNITY RADIO STATION



โดย

นายกิตติพงษ์ เท่าเขียว 49015045

นายยงยุทธ อินทะชัย 49015066

นายอนุพงษ์ ทูมอันท 49015079

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุวิพล สิริชีวกภาค

รศ. เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรกรองแถบความถี่ผ่านสำหรับสถานีวิทยุชุมชน

BAND PASS FILTER CIRCUIT FOR LOCAL COMMUNITY RADIO STATION

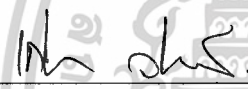
ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพงษ์ เท่าเขียว 49015045
2. นายชงชุต อินทะชัย 49015066
3. นายอนุพงษ์ ทุมอนันต์ 49015079



(รศ.ดร. สุวิทย์ สิริชีวะภาค)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(รศ. เกียรติกร วงศ์โรจนกรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BAND PASS FILTER CIRCUIT FOR LOCAL COMMUNITY RADIO STATION

- โดย 1. นายกิตติพงษ์ เท่าเขียว 49015045
2. นายยงยุทธ อินทะชัย 49015066
3. นายอนุพงษ์ ทูมอন্নันท์ 49015079

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุวิพล ลิทธิชีวะภาค
รศ. เกียรติกร วงศ์โรจนภรณ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อก ใช้กับเครื่องส่งวิทยุชุมชนเพื่อกรอง สัญญาณที่ต้องการส่งผ่านออกสายอากาศโดยไม่รบกวนสถานีคลื่นข้างเคียง ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรรองแถบความถี่ผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยในการออกแบบโครงการนี้ตั้งสมมติฐานใช้คลื่นความถี่วิทยุชุมชนที่ความถี่ 98.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ในการทดลองทางด้านเครื่องส่งเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานการส่งคลื่นความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ซึ่งในประเทศไทยวิทยุเอฟเอ็มมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 88-108 เมกกะเฮิร์ตซ์รวม 100 สถานี โดยแต่ละสถานีจะกำหนดให้มีแบนด์วิธกว้างได้ไม่เกิน 200 กิโลเฮิร์ตซ์

ABSRRACT

This project present a circuit design of Analog Filter use in Radio Station Transmitter for Local Community for filter a signal which interfere Side Radio Frequency Station. The circuit is composed of 2 components that are Band-pass Filter and Low-pass Filter. Frequency's section is fixed as 98.75 MHz of the Local Community Radio Station to experiment as the transmitter's sector to provide with standard of the FM Radio Frequency Transmission. FM Radio Frequency of Thailand comprises the frequency's section around 88-108MHz by total are 100 stations and bandwidth of FM Radio Station are not over than 200 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาเป็นอย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิพล สิทธีชีวะภาค และ รองศาสตราจารย์เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการปรับปรุงแก้ไขจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความร่วมมือการจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตเวทิตา แต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนแก่กลุ่มผู้จัดทำด้วยดีตลอดมาและขอโน้มคารวะแด่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและใช้อย่างอิงทุกท่าน

กลุ่มผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ง
สารบัญตาราง	จ

บทที่ 1 บทนำ

- ความเป็นมาและความสำคัญ 1
- วัตถุประสงค์ 1
- ขอบเขต 1
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้ 1

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

- 2.1 วิวัฒนาการของวงจรกรองความถี่ 2
- 2.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรกรอง 3
 - 2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ 3
 - 2.2.1 ตัวเก็บประจุ 6
- 2.3 วงจรกรองความถี่ 8
 - 2.3.1 รูปแบบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ (Filter) 8
 - 2.3.2 คุณลักษณะของวงจรกรอง (Filter characteristics) 8
 - 2.3.3 การนอร์มาไลซ์และการคืนอร์มาไลซ์ความถี่และอิมพีแดนซ์ 11
 - 2.3.3.1 การนอร์มาไลซ์ความถี่ 11
 - 2.3.3.2 การคืนอร์มาไลซ์ความถี่ฟังก์ชันโครงข่าย 11
 - 2.3.3.3 การคืนอร์มาไลซ์ความถี่วงจรถอด 13
 - 2.3.3.4 การคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ 15
 - 2.3.4 ทฤษฎีการประมาณค่า 18
 - 2.3.4.1 ฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth Function) 18
 - 2.3.4.2 การหาตำแหน่งโพลของฟังก์ชันโครงข่ายแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่ถูดนอร์มาไลซ์ 19
 - 2.3.4.3 การกำหนดอันดับวงจรถอด 21
 - 2.3.4.4 โพลีโนเมียล และฟังก์ชันแบบเชฟปีเชฟ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นวงจรกรองแบบอื่น	24
2.3.5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	24
2.3.5.2 การแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	26
2.3.5.3 การแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	28
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน	30
2.4.1 เฟด	30
2.4.1.1 ชนิดและประเภทของเฟด	31
2.4.1.2 วงจรพื้นฐานและรายละเอียดของเฟด	33
2.4.2 ดัมมี่โหลด	37
2.4.3 สายอากาศ	37
2.4.3.1 ชนิดของสายอากาศ	38
2.4.3.2 สายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์เพลนหรือมาโคนี	38
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Low-pass Filter)	41
• การคำนวณ	41
• การสร้าง	46
3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)	50
• การคำนวณ	50
• การสร้าง	51
3.3 วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)	55
3.4 ดัมมี่โหลด (Dummy Load)	56
• การคำนวณ	57
• การสร้าง	57
3.5 สายอากาศแบบเวอร์ติคอลลกราวด์เพลน (Vertical ground plane antenna)	57
• การคำนวณ	57
• การสร้าง	58
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	60
4.1.1 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุสเตอริโอ (Angle FM Stereo Exciter)	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR Meter) และ วัดวัตต์มิเตอร์ (Power meter)	60
4.1.3 แอมป์มิเตอร์ (Ampere meter)	61
4.1.4 เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer)	61
4.1.5 วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)	62
4.1.6 คัมมี่โหลด (Dummy Load)	62
4.1.7 สายอากาศแบบเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน	63
4.1.8 สายนำสัญญาณ (Transmission line)	63
4.2 วัดสัญญาณวงจขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)	64
4.3 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	65
4.4 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	66
4.5 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	67
บทที่ 5 บทสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ปัญหา	69
5.3 แนวทางในการพัฒนา	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ช่องความถี่วิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟเอ็ม	72
ภาคผนวก ข กราฟแสดงคุณลักษณะการลดทอน สำหรับวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท	74
ภาคผนวก ค กราฟแสดงคุณลักษณะการลดทอน สำหรับวงจรกรองแบบ 0.01dB เชฟปีซเฟ	75
ภาคผนวก ง ตารางนอร์มาไลซ์วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท	76
ภาคผนวก จ ตารางนอร์มาไลซ์วงจรกรองแบบ 0.01dB เชฟปีซเฟ	79
ภาคผนวก ฉ Data sheet BLF 245	82
บรรณานุกรม	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของการพันขดลวด	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ	7
รูปที่ 2.3 แสดงตัวเก็บประจุชนิด ต่างๆ	7
รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองของวงจรกรองรูปแบบต่างๆ	9
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดการตอบสนองทางความถี่และแอมพลิจูดของวงจรแถบความถี่ผ่าน	9
รูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของวงจร ไซค์แบนด์พัสเตอร์	10
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการสเกลแกน x ของฟังก์ชันใดๆ	11
รูปที่ 2.8 ผลของการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ที่มีค่าผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองประเภทต่างๆ	12
รูปที่ 2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	14
รูปที่ 2.10 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	15
รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.5	16
รูปที่ 2.12 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.6	17
รูปที่ 2.13 กราฟผลตอบสนองทางขนาดแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่อันดับ n ต่างๆ เมื่อ $H_o = 1$	18
รูปที่ 2.14 ตำแหน่งโพลของ $ H(j\omega) ^2$ เมื่อ (ก) $n = 1$, (ข) $n = 2$, (ค) $n = 3$, (ง) $n = 4$	19
รูปที่ 2.15 ข้อกำหนดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	21
รูปที่ 2.16 ค่าของ C_n^2 เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$	22
รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองทางขนาดแบบเชฟบีเชฟ เมื่อ $\epsilon = 1, H_{max} = 1$ และ $n = 2, 5$ และ 10	23
รูปที่ 2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ	25
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	27
รูปที่ 2.20 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์แคบ (Narrow - band bandpass)	30
รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบการควบคุม การทำงานของทรานซิสเตอร์และเฟต	31
รูปที่ 2.22 เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล	33
รูปที่ 2.23 วงจรไป้อตเบื้องต้นของ เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล	34
รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบขาของ ทรานซิสเตอร์และเฟต	35
รูปที่ 2.25 วงจรซอสร่วมแบบพื้นฐาน	36
รูปที่ 2.26 แสดงการทำงานของวงจรขยาย Class AB (Class-AB Amplifier)	37
รูปที่ 2.27 แสดงหลักการเบื้องต้น สายอากาศเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน	39
รูปที่ 2.28 ลักษณะกระแสและแรงดันสายอากาศเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน	40
รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน	40
รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างของสายอากาศเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน ที่สร้างกราวด์ชนิดพิเศษ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 การนำวงจรกรองมาประยุกต์ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชน	41
รูปที่ 3.2 ลักษณะของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ทำการออกแบบ	42
รูปที่ 3.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์แคบ (Narrow-band bandpass)	43
รูปที่ 3.4 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์กว้าง	45
รูปที่ 3.5 ผลการ simulate วงจรกรองแถบความถี่ใน โปรแกรม PSpice	46
รูปที่ 3.6 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบโดยปราศจาก R_S และ R_L	56
รูปที่ 3.7 ระบบการสร้างและทดสอบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	47
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	48
รูปที่ 3.9 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	48
รูปที่ 3.10 ผลที่ได้จากการคำนวณวงจรกรองความถี่ต่ำ	51
รูปที่ 3.11 ผลการ simulate วงจรฟิลเตอร์ในโปรแกรม PSpice	52
รูปที่ 3.12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบโดยปราศจาก R_S และ R_L	59
รูปที่ 3.13 ระบบการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	53
รูปที่ 3.14 การประกอบวงจรเพื่อทดสอบวงจรรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ	55
รูปที่ 3.15 วงจรรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ	56
รูปที่ 3.16 การสร้างสายอากาศสายอากาศเวอร์ดิคอลกราวด์เพลน	58
รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและ รูปร่างของสายอากาศเวอร์ดิคอลกราวด์เพลน	59
รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter)	60
รูปที่ 4.2 เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR Meter) และ วัดวัตต์เมตร (Watt Meter)	60
รูปที่ 4.3 แอมป์มิเตอร์ (Ampere meter)	61
รูปที่ 4.4 เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer)	61
รูปที่ 4.5 วงจรรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ (RF Power Amplifier 30 watt)	62
รูปที่ 4.6 คัมมี่ โหลด(Dummy Load)	62
รูปที่ 4.7 สายอากาศแบบเวอร์ดิคอล กราวด์ เพลน	63
รูปที่ 4.8 สายนำสัญญาณ RG-58	63
รูปที่ 4.9 แสดงการต่อวัดสัญญาณ RF Power Amplifier	64
รูปที่ 4.10 สัญญาณ Spectrum Analyzer	64
รูปที่ 4.11 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	65
รูปที่ 4.12 สัญญาณ Spectrum Analyzer	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	66
รูปที่ 4.14 สัญญาณ Spectrum Analyzer	67
รูปที่ 4.15 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	68
รูปที่ 4.16 สัญญาณ Spectrum Analyzer	69



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลการคืนอรรถมาไลซ์ความถี่ต่อค่าอุปกรณ์ในวงจร	13
ตารางที่ 2.2 ผลการคืนอรรถมาไลซ์อิมพีแดนซ์ต่อค่าอุปกรณ์ในวงจร	16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันสถานีวิทยุชุมชนซึ่งเป็นวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม หลายแห่งในกรุงเทพมหานคร ใช้กำลังส่งสูงกว่าค่ากำลังส่งที่หน่วยงานเจ้าของสถานีเคยแจ้งจดทะเบียน โดยที่ช่องที่อยู่ติดกันของสถานีวิทยุกระจายเสียง ระบบ เอฟเอ็ม ในกรุงเทพมหานคร อยู่ห่างกันเพียง 250 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น โอกาสที่จะมีการรบกวนกันระหว่างสัญญาณของสถานีที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลต่อการรับฟังอาจเกิดขึ้นได้ ในกรณีที่สถานีใดสถานีหนึ่งใช้กำลังส่งมากและใช้ความแรงของสัญญาณเสียงในการมอดูเลตชัน (Modulation) สูงเกินกำหนด แต่เนื่องจากการควบคุมความแรงของการมอดูเลตชัน ยังไม่อาจกระทำได้อย่างได้ผลในหลายสถานี จึงต้องควบคุมทางด้านเครื่องส่งให้อยู่ในพิสัยที่กำหนดด้วย มาตรการบังคับให้ทุกสถานีใช้ลิมิตติง แอมป์ไฟร์เออ (Limiting amplifier) และ ฮาร์โมนิก ฟิลเตอร์ (Harmonic filter) กับเครื่องส่งทุกเครื่องเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องกระทำอย่างยิ่ง

วัตถุประสงค์

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมา จึงการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านแบบแอนาล็อก ใช้กับเครื่องส่งวิทยุชุมชนเพื่อกรองสัญญาณที่ต้องการส่งผ่านออกสายอากาศโดยไม่รบกวนสถานีคลื่นข้างเคียง

ขอบเขต

ในปฏิญานินพนธ์นี้จะทำการออกแบบวงจรซึ่งประกอบด้วย วงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยในการออกแบบนี้ตั้งสมมติฐานใช้คลื่นความถี่วิทยุชุมชนที่ความถี่ 98.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ในการทดลองทางด้านเครื่องส่งเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานการส่งคลื่นความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ซึ่งในประเทศไทยวิทยุเอฟเอ็มมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 88-108 เมกกะเฮิร์ตซ์รวม 100 สถานี โดยแต่ละสถานีจะกำหนดให้มีแบนด์วิดท์กว้างได้ไม่เกิน 200 กิโลเฮิร์ตซ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้

สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนจากสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ในกรุงเทพมหานครได้ในระดับหนึ่งโดยไม่จำเป็นต้องลดกำลังส่งสถานีของสถานีฯ ในกรุงเทพมหานครที่ใช้กำลังส่งสูงกว่าที่ได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วิวัฒนาการของวงจรกรองความถี่

ความสนใจในทฤษฎีและการออกแบบวงจรกรองได้เริ่มมีขึ้นพร้อมกับการพัฒนาการในช่วงเริ่มแรกของอุตสาหกรรมโทรคมนาคมในยุโรปและอเมริกาในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพัฒนาระบบสื่อสารแบบมัลติเพล็กซ์ทางความถี่เพื่อที่จะขยายโครงข่ายของระบบโทรศัพท์ออกไปเป็นตัวกระตุ้นที่สำคัญที่ทำให้เกิดการวิจัยในเรื่องวงจรกรองอย่างแพร่หลาย

ในช่วงทศวรรษ 1920 และ 1930 การพัฒนาทฤษฎีวงจรกรองได้มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยได้มีการแบ่งทฤษฎีวงจรกรองเป็นออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือส่วนการประมาณ (approximation) และส่วนการสังเคราะห์ โดยการประมาณในที่นี้หมายถึงการเลือกฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดคุณสมบัติ และการสังเคราะห์คือการเลือกโครงสร้างของวงจรและค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้วงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณในลักษณะที่ต้องการตามประมาณได้

ในช่วงเวลาเดียวกันนี้เองความต้องการวงจรกรองคุณภาพสูงก็กระตุ้นให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์พาสซีฟ (passive element) สำหรับใช้ในวงจรกรองคือขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน วงจรกรองสัญญาณเสียงโดยมากถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์เหล่านี้จนถึงทศวรรษ 1960 วงจรกรองเหล่านี้ยังถูกใช้งานอย่างมาก ปัจจุบันในงานเฉพาะด้าน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการพิสัยวัตติ (dynamic range) ที่กว้าง และสัญญาณรบกวนต่ำ

ต่อมาในช่วงระยะเวลาหลังสงครามโลกครั้งที่สอง เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานที่ความถี่ต่ำจะมีความสูญเสียมาก จึงมีการพัฒนาวงจรกรองที่ปราศจากขดลวดเหนี่ยวนำ (inductorless filter) ขึ้นมา โดยวงจรเหล่านี้จะประกอบด้วยวงจรแอคทีฟ (active element) ซึ่งในยุคแรกคือหลอดสุญญากาศ (vacuum) และต่อมาคืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) หรือวงจรย่อยที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ออปแอมป์ (op amp) ต่อร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยเราเรียกวงจรประเภทนี้ว่า วงจรกรอง active-RC อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าคงที่เวลา (time-constant) ของวงจรประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับผลคูณของค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC products) ซึ่งเราไม่สามารถสร้างให้มีความแม่นยำมากๆ ได้

อย่างไรก็ตามในทศวรรษ 1970 ได้มีการเริ่มใช้งานวงจรกรองประเภทใหม่ที่เรียกว่าวงจรกรองตัวเก็บประจุสวิตช์ (switched capacitor filter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุและสวิตช์ โดยวงจรกรองประเภทนี้จะมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับวงจรกรอง active-RC แต่จะใช้วิธีการประมวลสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signal) เพื่อให้ค่าเวลาคงที่ของวงจรขึ้นอยู่กับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอัตราส่วนของตัวเก็บประจุและความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (clock) ที่ป้อนให้วงจร ซึ่งเราสามารถทำให้มีความแม่นยำมาก ๆ ได้ วงจรกรองตัวเก็บประจุตัวเดียวสามารถนำไปสร้างวงจรรวม (integrated circuit :IC) ได้ง่ายและนิยมใช้กันแพร่หลายในการกรองสัญญาณความถี่ต่ำ เช่น ความถี่เสียง กล่าวโดยสรุป เราสามารถแบ่งวงจรมานี้ได้ตามลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรดังนี้

วงจรกรองพาสซีฟ (passive filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ วงจรกรองประเภทนี้สามารถใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่สัญญาณ ไพตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 300 MHz อย่างไรก็ตามเราไม่นิยมใช้วงจรพาสซีฟในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีความสูญเสียมาก ดังนั้นโดยทั่วไปวงจรพาสซีฟจะถูกใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่สัญญาณเสียง (audio frequency) ความถี่สัญญาณภาพ (video frequency) ขึ้นไปจนถึงความถี่วิทยุสูงมาก (VHF)

วงจรกรองแบบแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟร่วมกับตัวต้านทานและหรือตัวเก็บประจุ วงจรกรองแบบแอคทีฟที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ วงจรกรอง active-RC และวงจรกรองตัวเก็บประจุตัวเดียว (ซึ่งทั้งสองสามารถใช้งานในย่านความถี่ไพตรง 0– 500 kHz)

อย่างไรก็ตามในระบบที่ต้องการลักษณะการกรองสัญญาณที่มีการลดทอน (attenuation) สัญญาณที่คมมาก เราอาจจะต้องใช้งานวงจรกรองพาสซีฟที่เรียกว่าวงจรกรองกลไฟฟ้า (electromechanical filter) โดยวงจรกรองประเภทนี้ใช้การก้ำกร (resonance) ของการสั่นเชิงกล (mechanical/acoustic vibration) ในการกรองสัญญาณไฟฟ้า นอกจากนี้วงจรกรองประเภทนี้ยังมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีมาก ซึ่งถูกนำไปใช้อย่างมากในระบบสื่อสารวิทยุซึ่งปัญหาด้านความถี่สูง สัญญาณรบกวน และพิสัยทำให้ไม่สามารถใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟได้ อย่างไรก็ตามวงจรกลไฟฟ้าไม่สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่า 1 GHz ได้ ทั้งนี้ในย่านความถี่ดังกล่าวเราจะต้องใช้วงจรกรองไมโครเวฟ (microwave filter) แทน

อย่างไรก็ตามตั้งแต่ทศวรรษ 1980 เป็นต้นมาวงจรดิจิทัล (digital filter) ก็ได้รับความนิยมมากขึ้นตามลำดับ โดยทั้งนี้วงจรกรองแบบดิจิทัลมีข้อดีคือมีความแม่นยำที่สูงมากและสามารถปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือกินกำลังไฟสูงและไม่สามารถกรองสัญญาณความถี่สูงๆ ได้ดีเท่าวงจรกรองแบบแอนะล็อก

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกรอง

2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำบางชนิดที่นิยมเรียก “อินดักเตอร์” เป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติกระทำต่อต้านการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้ามาในตัวมัน ตัวเหนี่ยวนำนี้ถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรไฟฟ้าสำหรับการเก็บพลังงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมใช้ในงานด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

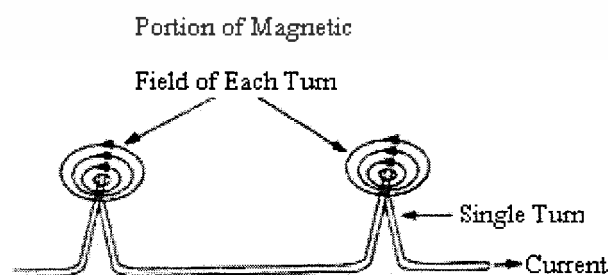
นำจะมีโครงสร้างคือ การนำเอาเส้นทองแดงมาพันเป็นขดจำนวนหลายๆรอบ บนแกนอากาศหรือแกนวัสดุอื่นใด ซึ่งขดลวดนี้จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมัน และการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลมาจากเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

การใช้งานของตัวเหนี่ยวนำในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ วงจรเครื่องรับ-ส่งวิทยุ วงจรเครื่องรับโทรทัศน์, วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรอื่นๆที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ

การพันตัวเหนี่ยวนำ

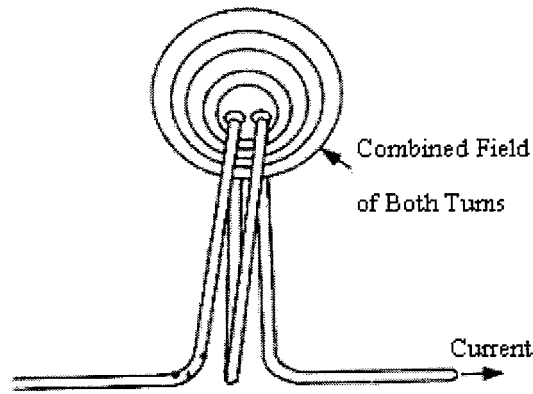
ตัวเหนี่ยวนำจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความยุ่งยากในการจัดซื้อให้ค่าความเหนี่ยวนำตามต้องการได้ส่วนมากจะนิยมการพันตัวเหนี่ยวนำมาใช้เอง โดยพื้นฐานแล้วความเหนี่ยวนำของขดลวดจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. จำนวนรอบของการพันขดลวดซึ่งจะมีผลต่อการเหนี่ยวนำโดยตรง คือถ้าพันขดลวดให้มีจำนวนรอบมากรอบความเหนี่ยวนำที่ปรากฏก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบน้อยความเหนี่ยวนำที่ปรากฏก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย โดยทั่วไปแล้วความเหนี่ยวนำจะมีการเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกำลังสองของรอบที่พัน
2. พื้นที่ตัดของแกนที่ขดลวดพันอยู่ คือถ้าแกนที่ใช้ในการพันขดลวดเป็นชนิดเดียวกันความเหนี่ยวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนนี้
3. ความซาบซึมได้ (Permeability : μ_r) ของแกนที่ใช้ในการพันขดลวด เช่น การใช้แกนเหล็กอ่อนจะมีผลทำให้ความเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะแกนเหล็กอ่อนเป็นทางที่นำเส้นแรงแม่เหล็กได้ดีกว่าแกนขดลวดชนิดอื่น อย่างเช่น ขดลวดที่ใช้แกนอากาศซึ่งมีค่าความซาบซึมได้ของแกนเท่ากับหนึ่ง เป็นต้น
4. ระยะห่างของการพันขดลวดและความยาวของแกนที่ใช้ คือ เมื่อกำหนดจำนวนรอบที่พันขดลวดเท่ากัน จะเห็นได้ว่าการพันขดลวดบนแกนที่สั้นจะทำให้ขดลวดที่พันมีระยะห่างของขดลวดอยู่ชิดกันมากอันมีผลทำให้เกิดความเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นได้



(ก) การพันขดลวดที่ระยะห่างกันมากผลก็คือความเหนี่ยวนำมีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) การพันขดลวดมีระยะประชิดกันผลก็คือความเหนี่ยวนำมีค่ามาก

รูปที่ 2.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของการพันขดลวด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความเหนี่ยวนำ (Inductance: L) จากการพันขดลวดซึ่งมีความยาวของขดลวดจะต้องมีขนาดมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวมันอย่างน้อยประมาณ 10 เท่าคือ

$$L = \mu_r \times \frac{N^2 \times A}{l} \times 1.26 \times 10^{-5} \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือความเหนี่ยวนำ หน่วยเฮนรี (H)

μ_r คือความซาบซึมได้ของแกนที่ใช้ (ความซาบซึมได้ของแกนอากาศเท่ากับ 1)

A คือพื้นที่ของแกน หน่วยตารางเมตร (m^2)

l คือ ความยาวของขดลวด หน่วยเมตร (m)

N คือจำนวนรอบของขดลวด หน่วยเป็นรอบ

(* กรณีที่คิดพื้นที่ของแกน (A) เป็นตารางเมตร (m^2) และความยาวของแกน (l) เป็น (m)

หรือ
$$L = \frac{4 \times \pi^2 \times r^2 \times n^2 \times \mu_r}{l \times 10^9} \quad (\text{ใช้แกนเหล็ก}) \quad (2.2)$$

$$L = \frac{4 \times \pi^2 \times r^2 \times n^2}{l \times 10^9} \quad (\text{ใช้แกนอากาศ}) \quad (2.3)$$

เมื่อ L คือความเหนี่ยวนำ หน่วยเฮนรี (H)

r คือรัศมีเฉลี่ยของขดลวด หน่วยเซนติเมตร (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n คือจำนวนรอบของขดลวด หน่วยรอบ

μ_r คือความซาบซึมได้ของแกนที่ใช้ (ความซาบซึมได้ของแกนอากาศเท่ากับ 1)

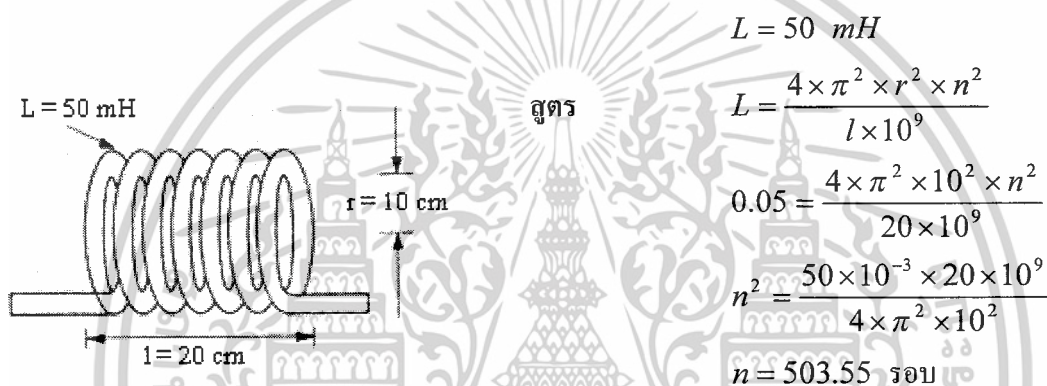
l คือความยาวของขดลวด หน่วยเมตร (m)

(* กรณีที่รัศมีของขดลวด (r) เป็นเซนติเมตร (cm) และความยาวของขดลวด (l) เป็น (cm)

ตัวอย่างที่ 2.1

ขดลวดแกนอากาศตัวครีมีเส้นใยได้ 10 ซม. วัดความยาวขดลวดได้ 20 ซม. มีค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้ 50 มิลลิเฮนรี่ จงคำนวณหาจำนวนรอบที่ใช้พันขดลวดมีกี่รอบ

วิธีทำ กำหนดให้ $l = 20 \text{ cm}$, $L = 50 \text{ mH}$



• จำนวนรอบที่พัน (n) = 503.55 รอบ

2.1.2 ตัวเก็บประจุ

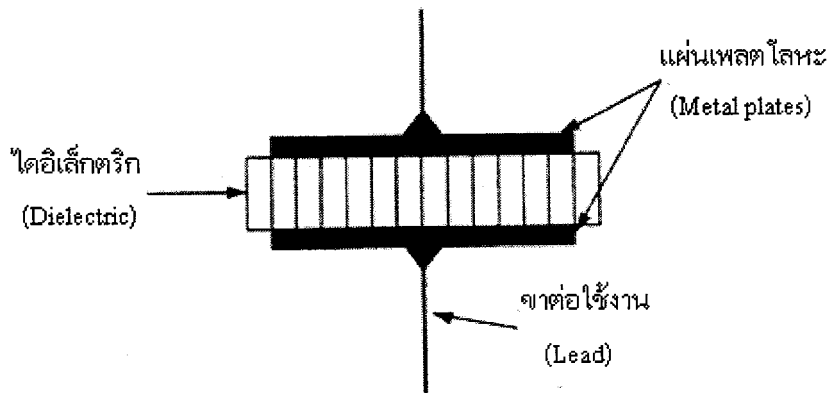
เมื่อนำเอาแผ่นตัวนำสองแผ่นมาวางเรียงขนานกันและต่อสายไฟไปยังขั้วต่อของแบตเตอรี่ ซึ่งจะส่งผลทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองนี้สามารถประจุไฟฟ้าได้ โดยเป็นธรรมชาติ

การวัดปริมาณศักย์ของประจุบนแผ่นตัวนำทั้งสองจะถูกเรียกว่า “ความจุ” (Capacitance) และพลังงานที่สามารถสะสมในอุปกรณ์ที่เรียกว่า “ตัวเก็บประจุ” (Capacitor) ซึ่งบางทีจะเรียกทับศัพท์ว่า “คาปาซิเตอร์” หรือ “คอนเดนเซอร์” (Condenser) โดยรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ชนิดนี้จะได้กล่าวถึงต่อไป

หลักการของตัวเก็บประจุ

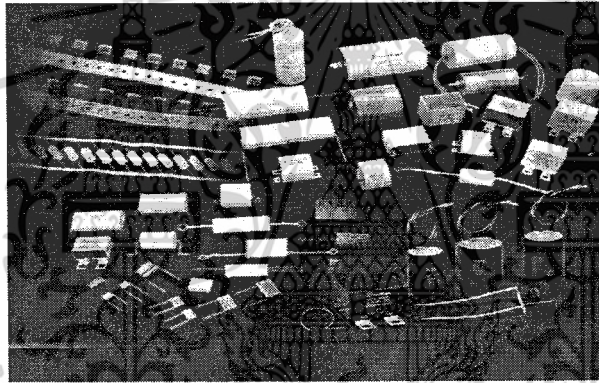
ตัวเก็บประจุ หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับประจุไฟฟ้าโดยจำนวนของพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้นี้ต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะใช้งานได้อย่างคุ้มค่า แต่ตัวเก็บประจุไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ ส่วนมากตัวเก็บประจุจะถูกนำไปใช้ในวงจรด้านอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นวางแยกออกจากกันโดยฉนวนกันไว้ วัสดุฉนวนนี้เรียกว่า “ไดอิเล็กตริก” (Dielectric) และแผ่นตัวนำจะเรียกว่า “แผ่นเพลต” (Plate)



รูปที่ 2.3 แสดงตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

ชนิดตัวเก็บประจุ

ในปัจจุบันนี้ตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีอยู่มากมายหลายชนิดและหลายรูปร่างซึ่งมีขนาดของค่าความจุต่ำๆ จนถึงความจุสูงถึงหลายพัน ไมโครฟารัด ยิ่งความจุมากเท่าใดขนาดก็จะยิ่งใหญ่อันตามไปด้วย ดังจะแสดงตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในรูปที่ 2.3

อัตราทนแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุทุกตัวจะมีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าบอกไว้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่ตัวเก็บประจุตัวนั้นจะใช้งานได้อย่างปลอดภัย เราไม่ควรนำเอาตัวเก็บประจุที่มีอัตราทนแรงดันต่ำไปใช้ที่วงจรแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าซึ่งมันจะทำให้ตัวเก็บประจุเกิดการชำรุดเสียหายแต่ถ้าเอาตัวเก็บประจุที่มีอัตราทนแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ไปใช้กับวงจรที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งมันจะเป็นการสร้างความปลอดภัยต่อแผ่นไดอิเล็กตริกที่จะไม่ทะลุหรือเกิดวงจรลัด (Short Circuit) ที่ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุจะต้องคำนึงถึงค่าอัตราทนแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ แต่แต่ละตัวมีค่าเท่าไร ซึ่งค่าความจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัวอาจมีค่ากันได้ แต่อัตราทนแรงดันไฟฟ้าอาจแตกต่างกันได้ อย่างเช่น $(10\mu F \ 6V)$ กับ $10\mu F \ 50V$ เป็นต้น อัตราทนแรงดันของตัวเก็บประจุ ดังนี้คือ อัตราทนแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (Working Voltage) หรืออัตราทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่จะใช้ได้ (Testing Voltage)

2.3 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ (Active filter) ซึ่งมีความแตกต่างกันคือวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ไม่มีการขยายทางไฟฟ้า ได้แก่ ตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำซึ่งอุปกรณ์แบบพาสซีฟสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีการขยายทางไฟฟ้า ได้แก่ ออปแอมป์ มอสเฟต เป็นต้นซึ่งต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะขับเคลื่อนให้ทำงานได้ ซึ่งวงจรกรองความถี่ที่จะนำมาใช้ในโครงงานนี้คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ซึ่งจะได้อธิบาย ทฤษฎีและหลักการต่อไป

2.3.1 รูปแบบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ (Filter)

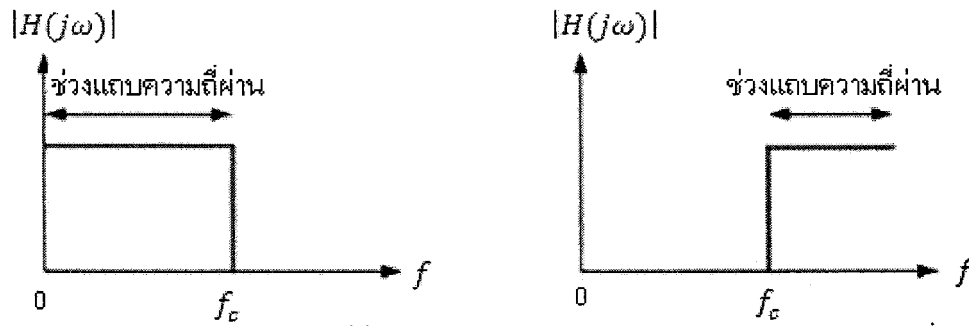
รูปแบบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่มีอยู่ด้วยกัน 4 แบบคือ

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter : LPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านไปได้ และมีการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่สูงออกไป แสดงดังรูป 2.4 (ก)
2. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (High-pass Filter : HPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ และมีการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำออกไป แสดงดังรูป 2.4 (ข)
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter : BPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงความถี่บางช่วงผ่านไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำและสูงกว่าออกไป แสดงดังรูป 2.4 (ค)
4. วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Band-Stop Filter : BSF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าผ่านออกไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดไว้แสดงดังรูป 2.4 (ง)

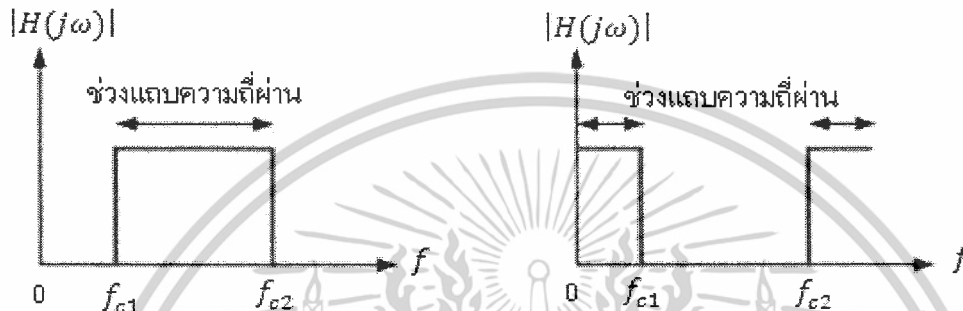
2.3.2 คุณลักษณะของวงจรกรอง (Filter characteristics)

คุณลักษณะของวงจรกรองเป็นตัวกำหนดหรือบอกให้ทราบระดับของการตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการ (Rejection) และคุณภาพของวงจรกรองซึ่งโดยทั่วไปแล้วได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



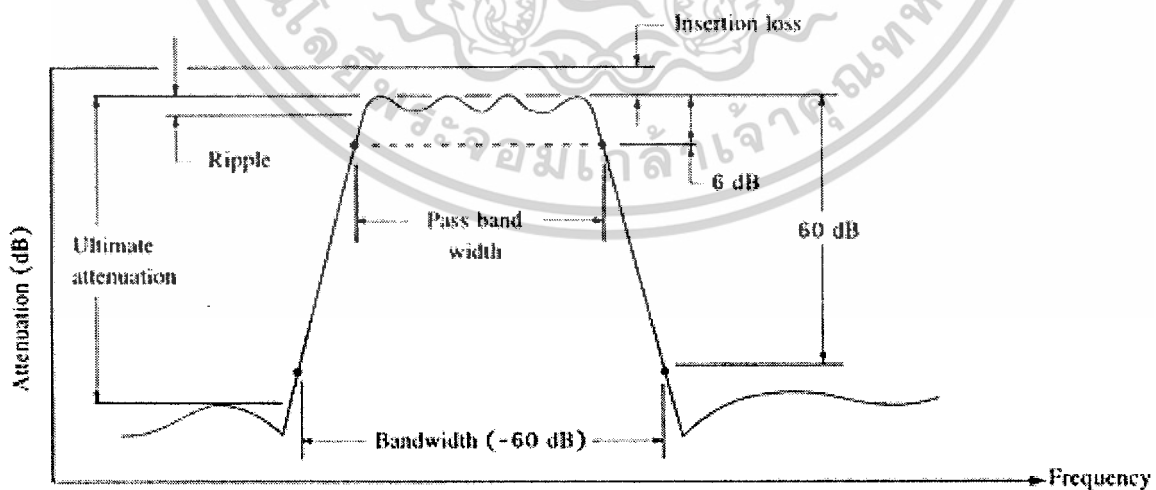
(ก) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) (ข) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (HPF)



(ค) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ผ่าน (BPF) (ง) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่หยุดผ่าน (BSF)

รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองของวงจรกรองรูปแบบต่างๆ

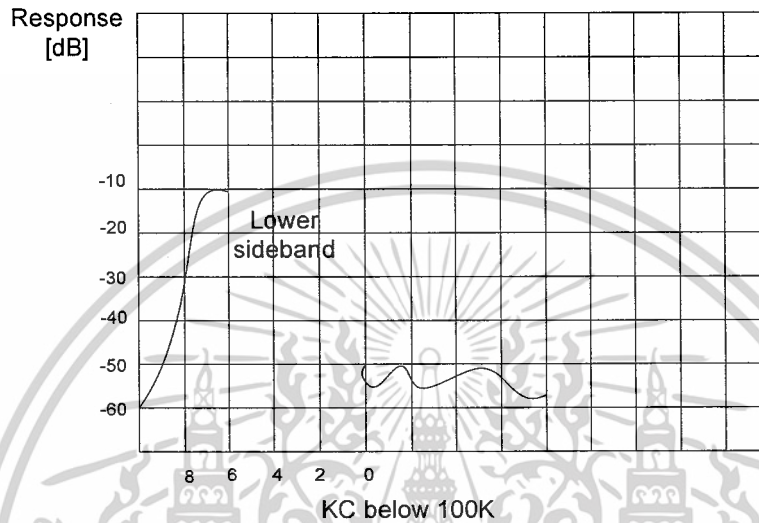
1. Characteristic curves
2. Insertion loss
3. Bandpass or pass bandwidth
4. Shape factor



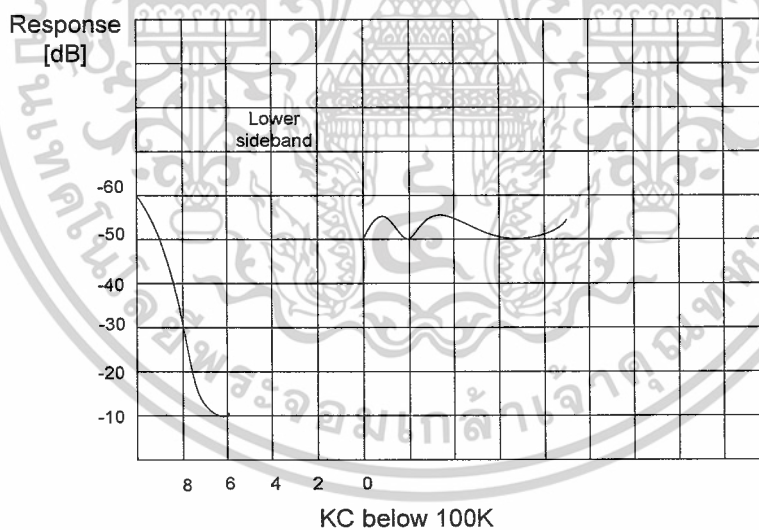
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดการตอบสนองทางความถี่และแอมพลิจูดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristic curves เป็นลักษณะการตอบสนองทางความถี่ที่ปรากฏที่เอาต์พุตของวงจรกรองที่พล็อตเทียบกับความถี่เรียกว่า “Characteristic or response curves” รูปร่างของ Characteristic curves นั้นขึ้นอยู่กับ การออกแบบและ โครงสร้างของวงจรกรองซึ่งลักษณะของ Characteristic หรือ response curves ของวงจรฟิลเตอร์กรองความถี่ไซด์แบนด์ (Sideband filter) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



(ก) เส้นโค้งตอบสนองไซด์แบนด์ฟิลเตอร์



(ข) เส้นโค้งแบบลดทอนของไซด์แบนด์ฟิลเตอร์

รูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองไซด์แบนด์

Characteristic curves อีกวิธีหนึ่งเราเรียกว่า “Attenuation curves” ดังแสดงในรูปที่สังเกตเห็นได้ว่าเอาต์พุตของวงจรกรองที่มีความโค้งลักษณะนี้จะถูกออกแบบให้ขจัดความถี่ไซด์แบนด์ด้านสูงดังนั้นเส้นโค้งลักษณะนี้จะเหมาะสมสำหรับกรองความถี่ไซด์แบนด์ด้านต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insertion loss เป็นตัวกำหนดหรือบอกให้ทราบถึงปริมาณของการลดทอนกำลังของวงจรกรองที่เกิดขึ้นที่ความถี่ที่ต้องการอยู่ในเทอมของ Insertion loss ถ้าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์แล้วจะกำหนดค่าเป็นเดซิเบล (Decibel : dB)

$$dB_{loss} = 20 \log \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.4)$$

Bandpass เป็นตัวบอกให้ทราบถึงช่วงความถี่ที่ผ่านวงจรฟิลเตอร์ไปได้ ซึ่งค่าแบนด์พาสของวงจรกรองนั้น มีค่าเท่ากับแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของวงจรกรองที่สามารถผ่านสัญญาณความถี่ไปได้โดยไม่เกินค่าปริมาณของการลดทอนกำลังที่กำหนดไว้ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ กิโลเฮิรตซ์ หรือเมกะเฮิรตซ์ โดยทั่วไปแล้ว ค่าลดทอนกำลังกำหนดไว้ที่ 3 เดซิเบล จากส่วนยอดของสัญญาณความถี่ที่เรียกของ Characteristic curves ลงมา

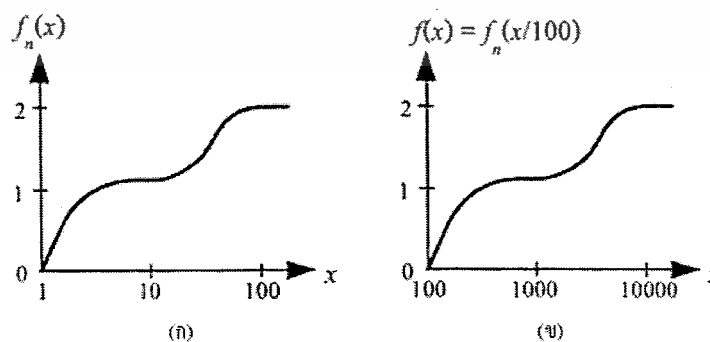
Shape factor เป็นเทอมที่กำหนดคุณสมบัติหรือรูปร่างของวงจรกรอง (ใช้สำหรับไซค์แบนด์) เราเรียกว่า “Shape factor” และอัตราส่วนของช่วงความถี่ (Bandpass) คิดที่จุด 60 และ 3 เดซิเบล

2.3.3 การนอร์มาไลซ์และการดีนอร์มาไลซ์ ค่าความถี่และอิมพีแดนซ์

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการศึกษาเกี่ยวกับการนอร์มาไลซ์ (normalization) ซึ่งคือการทำให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานที่เหมือนกันทั้งนี้จะได้เห็นในขั้นตอนนี้ต่อไปว่าแนวคิดเรื่องการนอร์มาไลซ์และการ (denormalization) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกรรมวิธีการออกแบบวงจรกรองอย่างเป็นระบบ

2.3.3.1 การนอร์มาไลซ์ความถี่

โดยทั่วไปฟังก์ชัน โครจข่ายตำแหน่งของโพลและซีโรหรือวงจรต้นแบบในการออกแบบวงจรกรองมักจะเป็นวงจรกรองที่มีแบนด์วิดท์หรือความถี่กึ่งกลางเท่ากับ 1 rad/s โดยเราจะเรียกค่าความถี่นี้ว่าความถี่นอร์มาไลซ์ (Normalized frequency) ทั้งนี้ในการออกแบบวงจรกรองเราจะต้องแปลงความถี่นอร์มาไลซ์นี้ให้เป็นค่าความถี่ที่สอดคล้องกับที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดคุณสมบัติ (specification) โดยเราเรียกการเปลี่ยนดังกล่าวนี้ว่าการดีนอร์มาไลซ์ความถี่ (frequency denormalization)



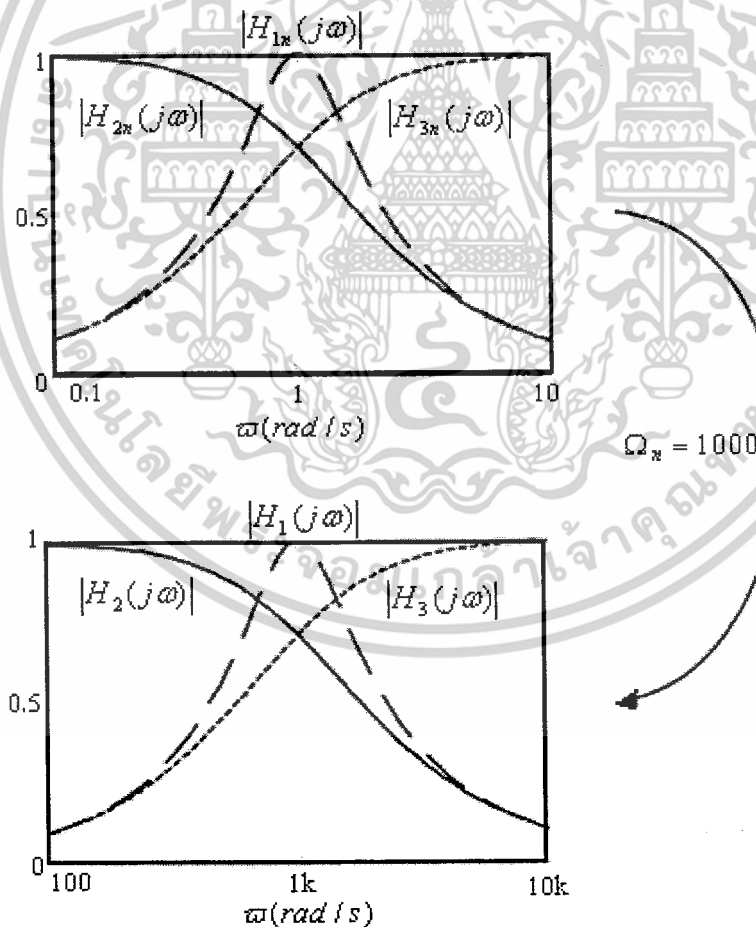
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการสเกลแกน x ของฟังก์ชันใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของการดีนอร์มาไลซ์ความถี่ พิจารณารูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงกราฟของฟังก์ชัน $f_n(x)$ และฟังก์ชัน $f_n(x) = f_n(x/100)$ ตามลำดับจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองจะมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการยกเว้นแกนนอนของกราฟรูป 2.7 (ข) จะถูกสเกลไปด้วยอัตราส่วน 100:1 เมื่อเทียบกับแกนนอนของกราฟรูป 2.7 (ก) จากตัวอย่างที่จะเห็นได้ว่าถ้าเรามีฟังก์ชัน $f_n(x)$ ใดๆ เราสามารถสเกลแกน x ของฟังก์ชันดังกล่าวด้วยอัตราส่วน $\Omega_n = 1$ ได้โดยการเปลี่ยนฟังก์ชัน $f_n(x)$ เป็นฟังก์ชัน $f_n(x) = f_n(x/\Omega_n)$

2.3.3.2 การดีนอร์มาไลซ์ความถี่ฟังก์ชันโครงข่าย

ในทำนองเดียวกันถ้าเรามีฟังก์ชันโครงข่าย $H_n(s)$ ใดๆ เราสามารถแสดงได้ว่าฟังก์ชัน $H_n(s) = H_n(s/\Omega_n)$ จะมีผลตอบสนองทางความถี่ในลักษณะเดียวกับ $H_n(s)$ แต่แกนความถี่ ω จะถูกสเกลด้วยอัตราส่วน $\Omega_n : 1$ การสเกลความถี่ดังกล่าวนี้จะเรียกว่าการดีนอร์มาไลซ์ความถี่ โดยเราจะเรียก Ω_n ว่าค่าความถี่ของการดีนอร์มาไลซ์ความถี่ (frequency denormalization constant)



รูปที่ 2.8 ผลของการดีนอร์มาไลซ์ความถี่ที่มีค่าผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงผลของการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ให้แก่ฟังก์ชันโครงข่ายของวงจรความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูง และวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ผลของการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ให้ฟังก์ชันโครงข่ายใดๆจะทำให้โพลและซีโรของฟังก์ชันโครงข่ายนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นไป Ω_n เท่าตัวอย่างเช่นฟังก์ชัน

$$H_n(s) = \frac{s+2}{s+1} \quad (2.5)$$

ซึ่งมีโพลเท่ากับ -1 และซีโรเท่ากับ -2 เมื่อถูกทำการคืนอร์มาไลซ์ความถี่จะกลายเป็น

$$H_n(s) = \frac{s}{\Omega_n} = \frac{(s/\Omega_n)+2}{(s/\Omega_n)+1} = \frac{s+2\Omega_n}{s+\Omega_n} \quad (2.6)$$

ซึ่งมีโพลเท่ากับ $-\Omega_n$ และซีโรเท่ากับ $-2\Omega_n$

2.3.3.3 การคืนอร์มาไลซ์ความถี่วงจร

การคืนอร์มาไลซ์ความถี่ให้กับวงจรใดๆจะทำได้โดยการเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่เช่นตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่นถ้าแต่เดิมในวงจรมีขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีความเหนี่ยวนำและมีความจุเท่ากับ L เฮนรี และ C ฟารัดตามลำดับ นั่นคืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทั้งสองจะเท่ากับ $Z_{nL}(s) = sL$ และ $Z_{nC}(s) = 1/sC$ ตามลำดับการคืนอร์มาไลซ์ความถี่จะทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทั้งสองเปลี่ยนไปเป็น

$$Z_L(s) = Z_{nL}(s/\Omega_n) = s(L/\Omega_n) \quad (2.7)$$

และ

$$Z_C(s) = Z_{nC}(s/\Omega_n) = \frac{1}{s(L/\Omega_n)} \quad (2.8)$$

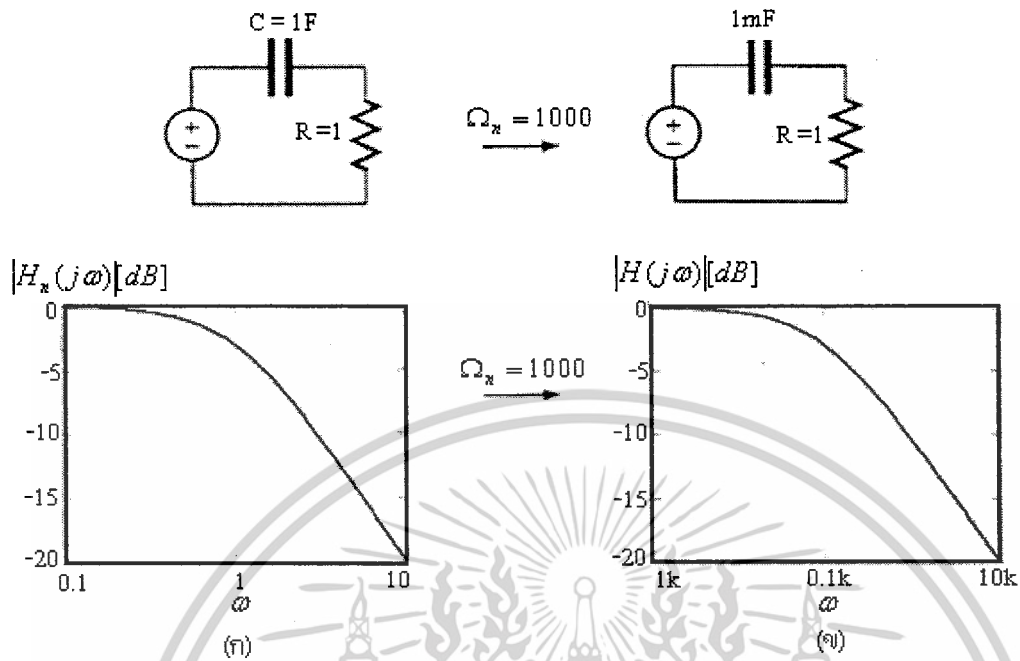
ตามลำดับนั้นก็จะเห็นได้ว่าการคืนอร์มาไลซ์ความถี่จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนไป L/Ω_n ในทำนองเดียวกันการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ ก็จะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุเปลี่ยนจาก C เป็น C/Ω_n ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการทำให้วงจรมีคุณสมบัติทางความถี่สูงขึ้นไปได้โดยการลดค่า L และ C ภายในวงจรลงไปนั่นเองตารางที่ 2.1 แสดงผลของการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ที่มีค่าอุปกรณ์ต่างๆของวงจรจากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการทำการคืนอร์มาไลซ์ความถี่จะส่งผลกระทบต่อเฉพาะค่าของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

ตารางที่ 2.1 ผลการคืนอร์มาไลซ์ความถี่ต่อค่าอุปกรณ์ในวงจร

ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	
การคืนอร์มาไลซ์ความถี่	หลังการคืนอร์มาไลซ์ความถี่
R	R
L	L/Ω_n
C	C/Ω_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2.2



รูปที่ 2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน; (ก) ก่อนการคืนormaไลซ์ความถี่, (ข) หลังการคืนormaไลซ์ความถี่

รูปที่ 2.9 แสดงวงจรและผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนการคืนormaไลซ์ความถี่ทั้งนี้ฟังก์ชัน โครนชาของวงจรก่อนและหลังการคืนormaไลซ์ความถี่ก็คือ

$$H_n(s) = \frac{1}{s+1} \quad (2.9)$$

และ

$$H_n(s) = H_n\left(\frac{s}{1000}\right) = \frac{1000}{s+1000} \quad (2.10)$$

ตามลำดับโดยทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการคืนormaไลซ์ความถี่จะทำให้ความถี่คutoffของวงจรถูกเลื่อนจาก 1 rad/s ไปอยู่ที่ 1000 rad/s

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรและผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ต่ำก่อนการคืนormaไลซ์ความถี่ทั้งนี้ฟังก์ชัน โครนชาของวงจรก่อนและหลังการคืนormaไลซ์ความถี่คือ

$$H_n(s) = \frac{s}{s^2 + s + 4} \quad (2.11)$$

และ

$$H(s) = H\left(\frac{s}{250}\right) = \frac{s/250}{(s/250)^2 + (s/250) + 4} = \frac{250s}{s^2 + s250 + 250000} \quad (2.12)$$

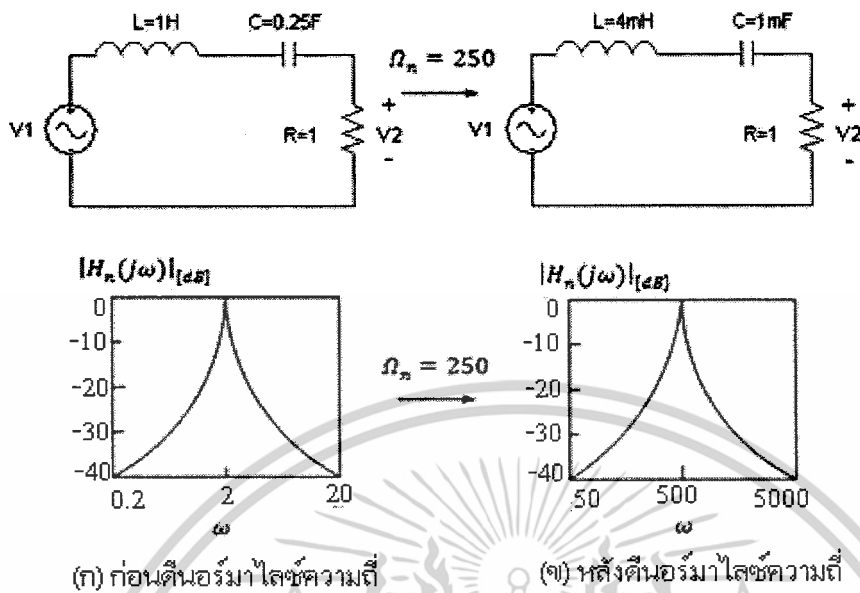
ตามลำดับโดยทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการคืนormaไลซ์ความถี่จะทำให้ความถี่กึ่งกลางของวงจรถูกเลื่อนจาก

2 rad/s ไปอยู่ที่ 500 rad/s และยังทำให้แบนด์วิดธ์ของวงจรเพิ่มจาก 1 rad/s ไปเป็น 250 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2.3



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรและผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านก่อนและการคืนอร์มาไลซ์ความถี่, (ก) ก่อนการคืนอร์มาไลซ์ความถี่, (ข) หลังการคืนอร์มาไลซ์ความถี่

2.3.3.4 การคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์

ในตารางการออกแบบวงจรค่าของอุปกรณ์ที่ใช้มักอยู่ในหลักหน่วยเช่น $1\Omega, 1F, 1H$ แต่ในทางปฏิบัติค่าของอุปกรณ์ที่ใช้จะไม่เป็นไปตามนี้ตัวอย่างเช่นค่าของตัวเก็บประจุของวงจรมักมีค่าไม่เกินหลัก μF (ถ้าเป็นวงจรรวมตัวเก็บประจุมีค่าความจุในหลัก nF จะถือว่ามีขนาดใหญ่) ดังนั้นในการออกแบบวงจรด้วยสมการค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมเราจะต้องทำการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ (impedance denormalization) วงจรกรองด้วยสมการ

$$Z_R(s) = Z_n(s) \quad (2.13)$$

โดยที่ $Z_n(s)$ คือค่านอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ (normalized impedance) หรือค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ก่อนทำการคืนอร์มาไลซ์ค่า $Z(s)$ คือค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์หลังการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ (ถ้าอุปกรณ์ที่จะใช้ในวงจรจริง) และ Z_n คือค่าคงที่ของการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ตัวอย่างเช่นถ้าในวงจรมีตัวต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีค่าความต้านทานค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุเท่ากับ R, L, C ตามลำดับเมื่อทำการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์แล้วค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทั้งสามจะเปลี่ยนเป็น

$$Z_R(s) = Z_n(s) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_L(s) = Z_n(sL) = s(Z_n L) \quad (2.15)$$

และ

$$Z_C(s) = Z_n\left(\frac{1}{sC}\right) = \frac{1}{s(C/Z_n)} \quad (2.16)$$

ตามลำดับนั้นหมายความว่าเราจะได้อัตราส่วนความต้านทานความเหนี่ยวนำและค่าความจุของตัวต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเท่ากับ $Z_n R, Z_n L, C/Z_n$ ตามลำดับจะเห็นได้ว่าการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ถ้าต้องการลดค่าความจุของตัวเก็บประจุก็ต้องเพิ่มค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของตัวต้านทานและขดลวดเหนี่ยวนำลงไปให้อัตราส่วนเดียวกัน

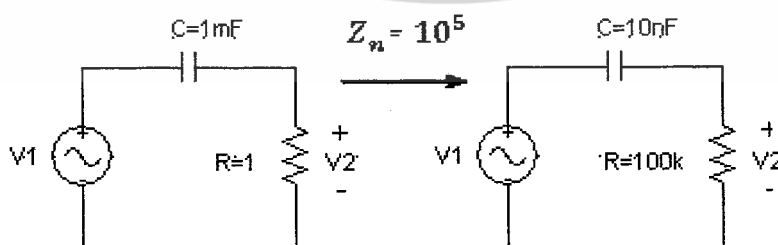
จะสังเกตได้ว่าข้อแตกต่างที่สำคัญของการคืนอร์มาไลซ์ความถี่และการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์คือการคืนอร์มาไลซ์ความถี่จะเป็นการสเกลผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในขณะที่การทำคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์จะเป็นการเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์ในวงจร

ตารางที่ 2.2 ผลการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ต่อค่าอุปกรณ์ในวงจร

ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	
ก่อนทำการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์	หลังทำการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์
R	$Z_n R$
L	$Z_n L$
C	C/Z_n

ตัวอย่างที่ 2.4

จากตัวอย่างที่ 2.2 วงจรที่ได้หลังจากการคืนอร์มาไลซ์ความถี่มีการใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงถึง $1mF$ จึงทำการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์ วงจรดังกล่าวให้ตัวเก็บประจุในวงจรมีค่าเท่ากับ $10nF$



รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.4

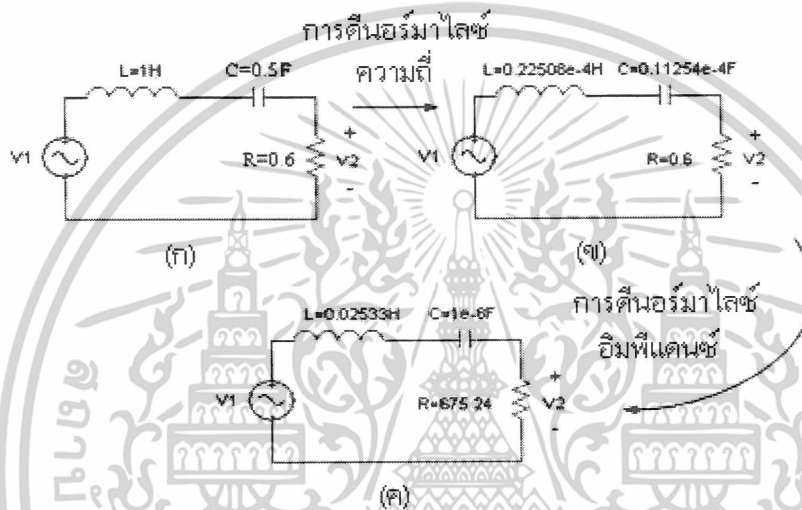
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 แสดงการแปลงอิมพีแดนซ์วงจรในตัวอย่างที่หนึ่งให้เป็นไปตามที่โจทย์กำหนด

ตัวอย่างที่ 2.5

พิจารณาฟังก์ชันการโอนย้ายแรงดัน (Voltage transfer function) ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่สองที่มีความถี่กึ่งกลางเท่ากับ $\sqrt{2}rad/s$ ในรูปที่ 2.12 (ก)

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = H_n(s) = \frac{0.6}{(s+2)/(s+0.6)} = \frac{0.6s}{s^2 + 0.6s + 2} \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.12 วงจรสำหรับตัวอย่างที่ 2.5

โดยจากฟังก์ชันการโอนย้ายข้างบนเราสามารถแสดงได้ว่าในวงจรนี้มีโพลเป็นคู่คอนจูเกตมีค่าเท่ากับ $-0.3 \pm j1.382$ ตามลำดับ

ถ้าต้องการคืนอร์มาไลซ์ความถี่วงจรนี้เพื่อให้ได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีความถี่กึ่งกลางเท่ากับ $10kHz$ เราสามารถทำได้โดยเลือกค่าคงที่การคืนอร์มาไลซ์ความถี่เท่ากับ

$$\Omega_n = \frac{2\pi \times 10^4}{\sqrt{2}} = 4.443 \times 10^4 \tag{2.18}$$

ซึ่งจะทำให้เราได้ฟังก์ชันการโอนย้ายแรงดันเป็น

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = H(s) = H_n(s/\Omega_n) = \frac{0.6(s/4.443 \times 10^4)}{(s/(4.443 \times 10^4))^2 + 0.6(s/(4.443 \times 10^4)) + 2} \tag{2.19}$$

นั่นคือ
$$H(s) = \frac{0.6s \times 4.443 \times 10^4}{s^2 + 0.6 \times 0.443 \times 10^4 s + 2(0.6/(4.443 \times 10^4))} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการที่ 2.20 เป็นฟังก์ชันโครงข่ายที่มีโพลอยู่ที่ $-1.333 \times 10^4 \pm j6.14 \times 10^4$ และจากตารางที่ 2.2 ในการคืนอร์มาไลซ์ความถี่วงจรรูปที่ 2.12 (ก) จะต้องเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำให้เป็น 0.6Ω (คงเดิม)

$$0.5F / (4.443 \times 10^4) = 0.1125 \times 10^{-4} F \quad (2.21)$$

และ $1H / (4.443 \times 10^4) = 0.2251 \times 10^{-4} H \quad (2.22)$

ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) จากวงจรในรูปที่ 2.12 (ข) ถ้าต้องการใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุเท่ากับ $10nF$ จะต้องแปลงค่าอุปกรณ์ตัวอื่นด้วยค่าคงตัวการนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_n = \frac{0.1125 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-9}} = 1125.4 \quad (2.23)$$

นั่นคือจะต้องเปลี่ยนค่าความต้านทานและขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรเป็น

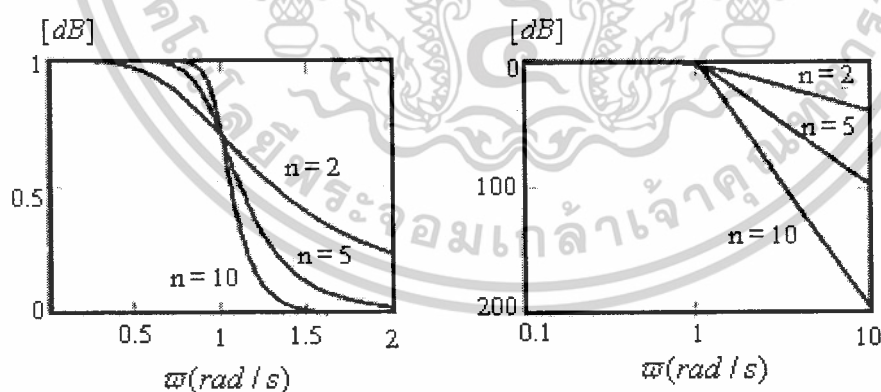
$$1125.4 \times 0.6\Omega = 674.24\Omega \quad (2.24)$$

และ $1125.4 \times 0.2251 \times 10^{-4} H = 0.02533 H \quad (2.25)$

ตามลำดับ รูปที่ 2.12 (ค) แสดงวงจรให้รูปที่ 2.12 (ข) หลังการคืนอร์มาไลซ์อิมพีแดนซ์แล้ว

2.3.4 ทฤษฎีการประมาณ

ทฤษฎีในการประมาณ (Approximation theory) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สำคัญที่จะถูกใช้ในขั้นตอนแรกของการออกแบบ ในโครงงานนี้จะขอก้าวเฉพาะในส่วนการประมาณผลตอบสนองทางขนาด (magnitude response) ที่สำคัญสองประเภทคือ แบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth) และแบบเชบิเชฟ (Chebyshev) เพื่อให้สอดคล้องกับส่วนของการสร้างฮาร์ดแวร์



รูปที่ 2.13 กราฟผลตอบสนองทางขนาดแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่อันดับ n ต่างๆ เมื่อ $H_o = 1$

2.3.4.1 ฟังก์ชันบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth Function)

สามารถพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่าผลตอบสนองทางขนาดแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่อยู่ในรูป

$$|H(j\omega)| = \sqrt{\frac{H_o^2}{1 + \omega^{2n}}} \quad \text{หรือ} \quad |H(j\omega)|^2 = \frac{H_o^2}{1 + \omega^{2n}} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือผลตอบสนองทางขนาดแบบความถี่ต่ำผ่านที่มีความราบเรียบที่สุดที่จุด $\omega = 0$ รูปที่ 2.13 แสดงกราฟสมการที่ 2.26 ที่ H_0 ค่าต่างๆ ทั้งนี้ผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ธในสมการที่ 2.26 เป็นผลตอบสนองทางขนาดที่ถูกลอมาไลซ์ (normalized magnitude response) แล้ว โดยสามารถสรุปคุณสมบัติด้านต่างๆของผลตอบสนองดังกล่าวได้ดังนี้

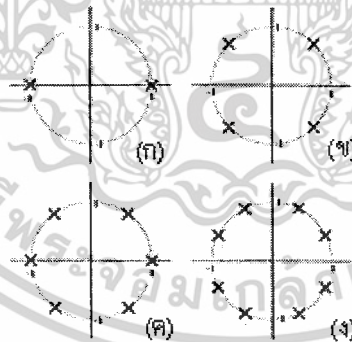
1. อัตราขยายไฟตรงเท่ากับ H_0 (ถ้าคิดในหน่วย dB จะได้ $H_{0|dB|} = 20\log(H_0)$)
2. ย่านความถี่ $0 \leq \omega \leq 1\text{rad/s}$ เรียกว่าย่านความถี่ผ่าน
3. ความถี่ $\omega = 1\text{rad/s}$ เรียกว่าความถี่ตัด (cut-off frequency)
4. ที่ $\omega = 1\text{rad/s}$ จะได้ $|H(j\omega)| = H_0 / \sqrt{1+1^n} = H_0 / \sqrt{2} \cong 0.707H_0$

ไม่ว่าอันดับ จะเป็นเท่าไรก็ตาม ซึ่งถ้าคิดในหน่วยจะพบว่าที่ค่าความถี่อัตราขยายจะมีค่าตกลงมาจากอัตราไฟตรงเท่ากับ $H_{0|dB|} - 20\log(H_0 / \sqrt{2}) = 20\log \sqrt{2} = 3.01\text{dB}$

5. ที่ $\omega = 1\text{rad/s}$ ความชันของ $|H(j\omega)|^2$ จะเท่ากับ $-0.5nH_0^2$
6. ฟังก์ชัน $|H(j\omega)|$ มีค่าลดลงอย่างโมโนโทนิค (monotonic) เมื่อ ω มีค่ามากขึ้น

2.3.4.2 การหาตำแหน่งโพลของฟังก์ชันโครงข่ายแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่ถูกลอมาไลซ์

โดยปกติสามารถหาสมการแสดง $|H(j\omega)|^2$ จากฟังก์ชันโครงข่าย $H(s)$ ได้ค่อนข้างง่ายแต่ในทางกลับกันการหา $H(s)$ จาก $|H(j\omega)|^2$ จะเป็นเรื่องที่ไม่ง่ายนัก เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจะเริ่มพิจารณาในกรณีที่เท่ากับ



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งโพลของ $|H(j\omega)|^2$ เมื่อ (ก) $n = 1$, (ข) $n = 2$, (ค) $n = 3$, (ง) $n = 4$

$$\text{กรณี } n = 1 \quad |H(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \omega^2} \quad (2.27)$$

ถ้าแทน $\omega = s/j$ ลงในสมการข้างบนลงได้

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \left(\frac{s}{j}\right)^2} = \frac{H_0^2}{1 - s^2} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าโพลของ $|H(j\omega)|^2$ คือรากของสมการ $s^2 = 1$ ซึ่งก็คือ ± 1 นั่นเอง ดังนั้น

$$|H(j\omega)|^2 = \left(\frac{H_o}{1+s} \right) \left(\frac{H_o}{1-s} \right) \quad (2.29)$$

ซึ่งพบว่า
$$H(s)H(-s) = \left(\frac{H_o}{1+s} \right) \left(\frac{H_o}{1-s} \right) \quad (2.30)$$

จะเห็นว่ามีส่วนสองทางเลือกคือ

$$H(s) = \frac{H_o}{1+s} \text{ หรือ } H(s) = \frac{H_o}{1-s} \quad (2.31)$$

อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าโพลของระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องเป็นโพลทางซ้าย (LHP Pole) ดังนั้น

จึงเลือก $H(s) = \frac{H_o}{1+s}$ เพราะจะทำให้โพลของระบบเท่ากับ -1

กรณี $n = 2$
$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_o^2}{1+\omega^4} \quad (2.32)$$

ถ้าแทน $\omega = s/j$ ลงในสมการข้างบนลงได้

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_o^2}{1+\left(\frac{s}{j}\right)^4} = \frac{H_o^2}{1-s^4} \quad (2.33)$$

จะเห็นว่าโพลของ $|H(s)|^2$ คือรากของสมการ $s^4 = -1$ ซึ่งก็คือ $\exp(\pi/4), \exp(j3\pi/4), \exp(j5\pi/4)$, และ $\exp(j7\pi/4)$

ดังนั้น
$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_o^2}{(s-p_I)(s-p_{II})(s-p_{III})(s-p_{IV})} \quad (2.34)$$

โดย $p_I = \exp(\pi/4) = p_H = \exp(j3\pi/4)$, $p_{III} = \exp(j5\pi/4)$ และ $p_{IV} = \exp(j7\pi/4)$

และจากรูป 2.14 (ข) แสดงตำแหน่งของ $p_I = p_{IV}$ บนระนาบเชิงซ้อน จะเห็นได้ว่า $p_H = p_I$ และ

$p_{III} = -p_{IV}$ จากเงื่อนไขทางด้านเสถียรภาพของระบบเราจึงเลือก

$$H(s) = \frac{H_o}{(s-p_I)(s-p_H)} \quad (2.35)$$

โดย $p_I = p_H = \exp(j5\pi/4) = \cos(5\pi/4) + j\sin(5\pi/4) = -0.70711 + j0.70711$

โดยทั้งนี้จะสังเกตได้ว่า p_I และ p_{II} เป็นคู่คอนจูเกตกันหรือจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเศษส่วนของโพลีโนเมียลได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{H_o}{s^2 + 1.4142s + 1} = \frac{H_o}{s^2 + s/0.70711 + 1} \quad (2.36)$$

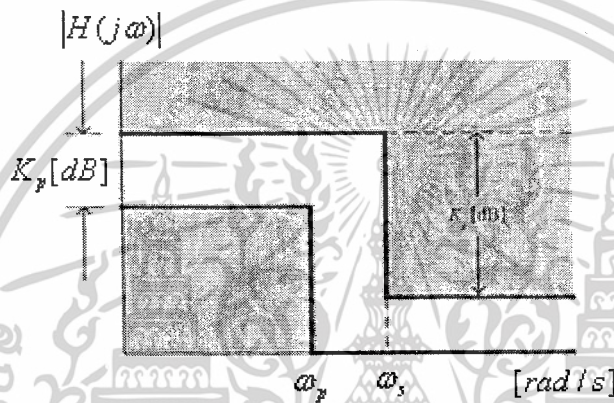
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } \frac{1}{(s-p_i)(s-p_i^*)} = \frac{1}{s^2 - s(p_i + p_i^*) + p_i p_i^*} = \frac{1}{s^2 - [\text{Re}\{p_i\}] + |p_i|} \quad (2.37)$$

ดังนั้นเราสามารถแสดงฟังก์ชันโครงข่ายแบบบัตเตอร์เวิร์ทให้อยู่ในรูป

$$H(s) = \begin{cases} \frac{H_0}{(s^2 + c_1 s + 1)(s^2 + c_2 s + 1) \dots (s^2 + c_{(n/2)} s + 1)} & ; n = \text{odd number} \\ \frac{H_0}{(s+1)(s^2 + c_1 s + 1)(s^2 + c_2 s + 1) \dots (s^2 + c_{(n-1)/2} s + 1)} & ; n = \text{even number} \end{cases} \quad (2.38)$$

2.3.4.3 การกำหนดอันดับวงจรรอง



รูปที่ 2.15 ข้อกำหนดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

โดยทั่วไปข้อกำหนดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ K_p, K_s, ω_p และ ω_s โดยจะเรียกย่านความถี่ $0 \leq \omega \leq \omega_p$ ว่าย่านความถี่ผ่าน และเรียกย่านความถี่ $\omega \leq \omega_s$ หยุด และ $K_p [dB]$ คืออัตราการลดทอน (เมื่อเทียบกับอัตราขยายสูงสุด) สูงสุดที่ยอมให้มีได้ในย่านความถี่ผ่าน ส่วน $K_s [dB]$ คืออัตราการลดทอน (เมื่อเทียบกับอัตราขยายสูงสุด) ที่ต่ำที่สุดที่ยอมให้มีได้ในด้านความถี่หยุด จากรูปที่ 2.15 สามารถแสดงได้ว่า

$$K_p = 20 \log H_o - 20 \log |H(j\omega)| = 20 \log \left(\frac{H_o}{|H(j\omega_p)|} \right) \quad (2.39)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า $|H(j\omega)| = \sqrt{H_o^2 / (1 + \omega_p^{2n})}$ ลงในสมการข้างบนจะได้

$$k_p = 20 \log \sqrt{\omega_s^n} = \sqrt{1 + \omega_p^{2n}} = 10 \log(1 + \omega_p^{2n}) \quad (2.40)$$

และเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\omega_p^n = \sqrt{10^{0.1K_p - 1}} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันสามารถแสดงได้ว่า

$$\omega_s^n = \sqrt{10^{0.1K_{s-1}}} \quad (2.42)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.42 มาหารด้วยสมการที่ 2.41 จะได้

$$\left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^n = \log \sqrt{\frac{10^{0.1K_{s-1}}}{10^{0.1K_{p-1}}}} \quad (2.43)$$

ทำการเข้าล็อกทั้งสองข้างของสมการข้างบนแล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$n = \log \sqrt{\frac{10^{0.1K_{s-1}}}{10^{0.1K_{p-1}}}} / \log \left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \quad (2.44)$$

2.3.4.4 โพลีโนเมียล และฟังก์ชันแบบเชฟบีเชฟ

ถ้ากำหนดให้ $C_n(\omega)$ คือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าโพลีโนเมียลแบบเชฟบีเชฟอันดับที่

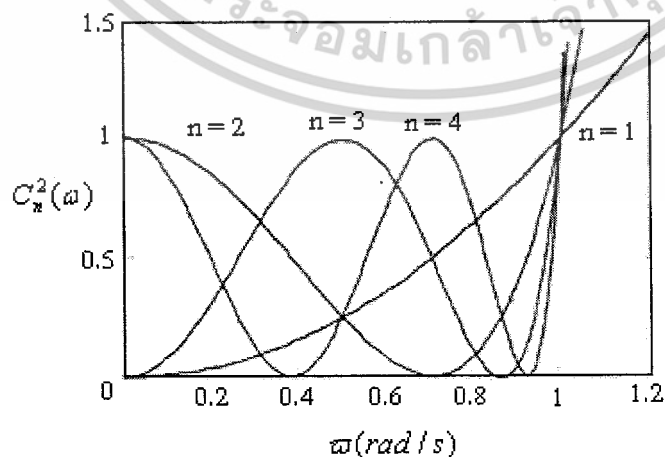
n นิยามทางคณิตศาสตร์ของ $C_n(C_n(\omega))$ คือ

$$C_n(\omega) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1} \omega) & ; \omega < 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1} \omega) & ; \omega > 1 \end{cases} \quad (2.45)$$

นอกเหนือจากการแสดง $C_n(\omega)$ ในรูปของฟังก์ชันข้างบนนี้แล้ว สามารถแสดงได้ด้วยว่า

$$\begin{aligned} C_1(\omega) &= \omega \\ C_2(\omega) &= 2\omega^2(\omega) - C_n(\omega) - C_{n-1}(\omega) \\ C_3(\omega) &= 4\omega^3 - 3\omega \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$C_{n+1}(\omega) = 2\omega^3 C_n(\omega) - C_{n-1}(\omega)$$

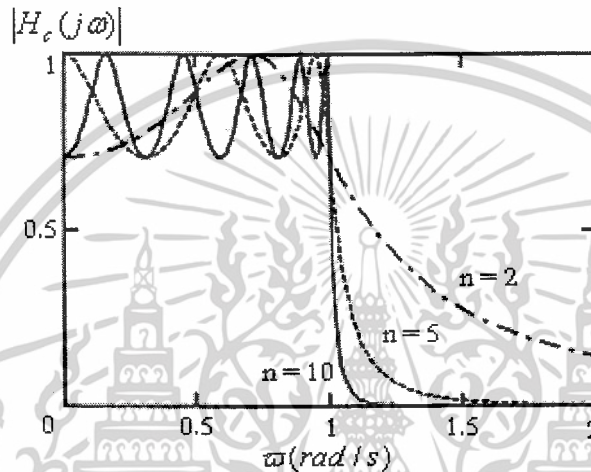


รูปที่ 2.16 ค่าของ C_n^2 เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแสดงค่าได้ว่าผลตอบสนองทางขนาดที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันเชฟบีเชฟ ดังแสดงในสมการที่ (2.47) ข้างล่างนี้จะเป็นผลตอบสนองทางขนาดแบบความถี่ต่ำผ่านที่มีลักษณะการกระเพื่อมแบบเท่าเทียม (equal ripple) ในย่านความถี่ผ่านและมีการลดลงแบบโมโนโทนิค (monotonic) ในย่านความถี่หยุด

$$|H_c(j\omega)| = \frac{H_{\max}}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega)}} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองทางขนาดแบบเชฟบีเชฟ เมื่อ $\varepsilon = 1$, $H_{\max} = 1$ และ $n = 2, 5$ และ 10

รูปที่ 2.17 แสดงผลตอบสนองทางขนาดแบบเชฟบีเชฟในสมการที่ (2.47) ซึ่งเป็นผลตอบสนองทางขนาดที่ถูกระบุมาไลซ์ (normalized magnitude response) ให้อ่านความถี่ผ่านอยู่ในช่วง $0 \leq \omega \leq 1 \text{ rad/s}$ โดยสามารถสรุปคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของผลตอบสนองดังกล่าวได้ดังนี้

1. ในกรณีที่ n เป็นจำนวนคี่ อัตราขยายไฟตรงเท่ากับ $H_0 = H_{\max}$
 ในกรณีที่ n เป็นจำนวนคู่ อัตราขยายไฟตรงเท่ากับ $H_0 = H_{\max} / \sqrt{1 + \varepsilon^2}$
2. ย่านความถี่ $0 \leq \omega \leq 1$ เรียกว่าย่านความถี่ผ่าน
3. ผลตอบสนองทางขนาดในย่านความถี่ผ่านจะมีลักษณะของการกระเพื่อมอย่างเท่าเทียม
4. ในย่านความถี่ผ่าน ผลตอบสนองทางขนาดจะกระเพื่อมอยู่ระหว่างค่า $H_{\max} / \sqrt{1 + \varepsilon^2}$ และ H_{\max} โดยในกรณีเป็น n เลขคู่ ผลตอบสนองทางขนาดจะมีค่าเท่ากับ H_{\max} ที่ความถี่ $\omega = \cos(k\pi/2n)$ เมื่อ $k = 1, 3, \dots, n-1$ และในกรณีที่ n เป็นเลขจำนวนคี่ ผลตอบสนองทางขนาดจะมีค่าเท่ากับ H_{\max} ที่ความถี่ $\omega = \cos(k\pi/2n)$ เมื่อ $k = 1, 3, \dots, n-1$
5. ความถี่ $\omega = 1 \text{ rad/s}$ เรียกว่าความถี่ตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ที่ $\omega = 1 \text{ rad/s}$ ผลตอบสนองทางขนาดจะเท่ากับ $H_{\max} / \sqrt{1 + \varepsilon^2}$ ไม่ว่าอันดับ n จะเป็นเท่าไรก็ตาม

7. ย่านความถี่ $1 \text{ rad/s} \leq \omega \leq \omega_c$ เรียกว่าย่านความถี่เปลี่ยน

8. ย่านความถี่ $\omega \leq \omega_c$ เรียกว่าย่านความถี่หยุด

9. ผลตอบสนองทางขนาดในย่านความถี่หยุดจะมีค่าลดลงอย่างโมโนโทนิค

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 2.17 กับรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าสำหรับ n ใดๆ ผลตอบสนองทางขนาดแบบเซฟบีเซฟจะทำให้เกิดความคมของการลดทอนสัญญาณในย่านความถี่เปลี่ยนมากกว่าแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

2.3.5 การแปลงวงจรของความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองแบบอื่น

วงจรกรองความถี่ต่ำเป็นวงจรกรองความถี่ที่จะสร้างขึ้นเป็นอันดับแรก เพื่อที่จะนำไปใช้ในการแปลงเป็นวงจรกรองความถี่แบบอื่นๆอีกต่อไป โดยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation)

2.3.5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

ก่อนที่จะสร้างวงจรกรองความถี่แบบอื่นจำเป็นจะต้องสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนเป็นอันดับแรก สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างที่ 2.6

ตัวอย่างที่ 2.6

ต้องการ : วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3 dB ที่ 1000 Hz

20 dB ต่ำสุดที่ 2000 Hz

$R_s = R_L = 600 \Omega$

ผลลัพธ์ : (ก) คำนวณ A_s

$$A_s = \frac{f_s}{f_c} = \frac{2000 \text{ Hz}}{1000 \text{ Hz}} = 2 \quad (2.48)$$

(ข) เลือกความถี่ที่จะทำการนอร์มไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจากกราฟแสดงคุณลักษณะการลดทอน สำหรับวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ [ภาคผนวก ข] มีค่าการลดทอนมากกว่า 18 dB ที่ 2 rad/s

(ค) ตารางที่ 12-2 [ภาคผนวก ง] ระบุค่าอุปกรณ์สำหรับออกออกแบบนอร์มไลซ์วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธซึ่งมีอันดับตั้งแต่ $n = 2$ ถึง $n = 10$

(ง) ทำการคืนนอร์มไลซ์วงจรกรอง โดยใช้ $Z = 600$ และ สเกลความถี่ (frequency-scaling factor : FSF) คือ $2\pi f_c$ หรือ 6280

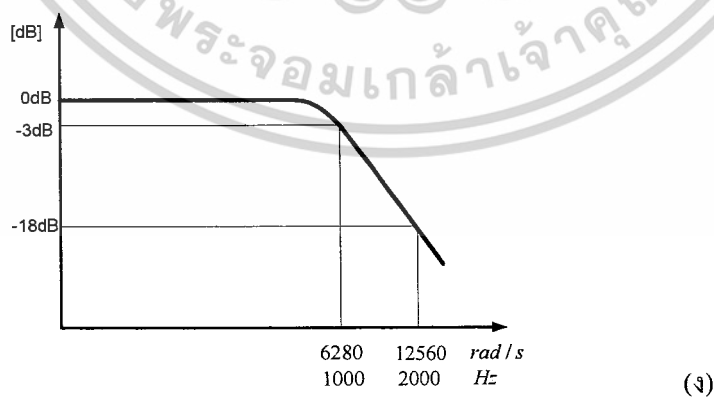
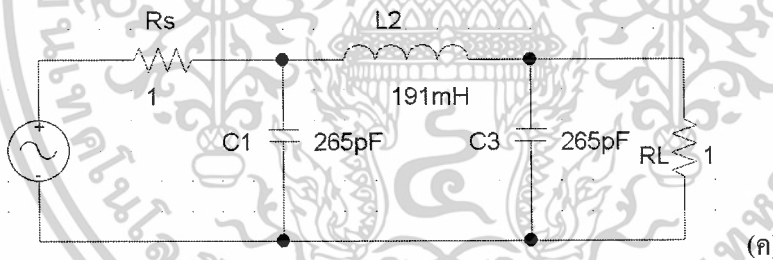
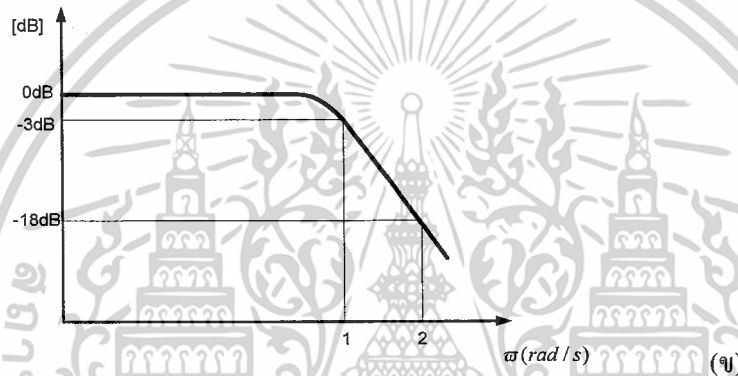
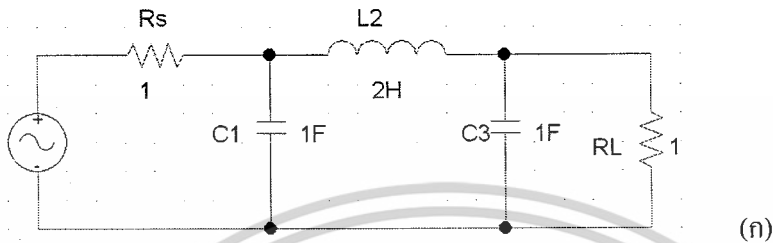
$$R_s' = R_L' = 600$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_2' = \frac{L \times Z}{FSF} \times \frac{2 \times 600}{6280} = 191 \text{mH} \quad (2.49)$$

$$C_1' = C_3' = \frac{C}{FSF \times Z} = \frac{1}{6280 \times 600} = 0.265 \mu\text{F} \quad (2.50)$$

ผลลัพธ์ของวงจรกรองแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน; (ก) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท, (ข) การตอบสนอง

ทางความถี่, (ค) ดินอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน, (ง) การตอบสนองทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.2 การแปลงวงจรความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรความถี่สูงผ่าน

ในวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ผ่านการนอร์มาไลซ์สามารถแปลงเป็นวงจรความถี่สูงผ่านโดยแทนตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวด้วยตัวเก็บประจุ และแทนค่าตัวเก็บประจุแต่ละตัวด้วยตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_{hp} = \frac{1}{L_{lp}} \quad (2.51)$$

และ

$$L_{hp} = \frac{1}{C_{lp}} \quad (2.52)$$

ตัวอย่างที่ 2.7

ต้องการ : วงจรความถี่สูงผ่าน

3dB ที่ 1 MHz

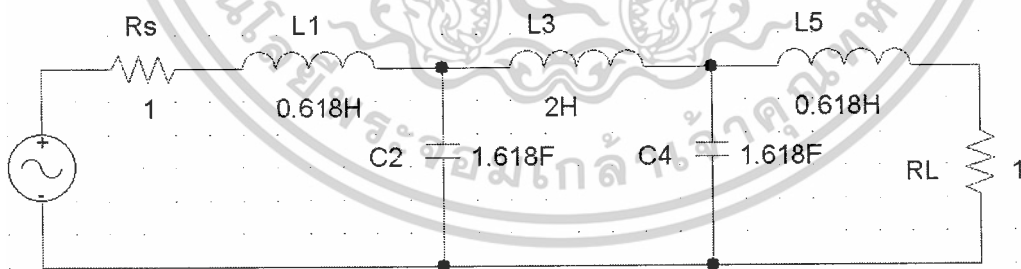
28 dB ต่ำสุดที่ 500 kHz

$$R_s = R_L = 300\Omega$$

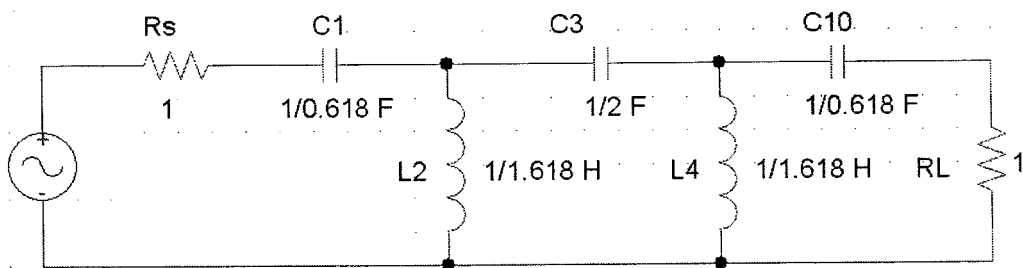
ผลลัพธ์ : (ก) จำนวน A_s

$$A_s = \frac{f_s}{f_c} = \frac{1\text{MHz}}{500\text{kHz}} = 2 \quad (2.53)$$

(ข) เลือกนอร์มาไลซ์วงจรความถี่ต่ำผ่านการลดทอนมากกว่า 28dB ที่ 2rad/s ตารางที่ 12-2 [ภาคผนวก ง] ระบุค่าอุปกรณ์สำหรับออกออกแบบนอร์มาไลซ์วงจรแบบบัตเตอร์เวิร์ทซึ่งมีย่านตั้งแต่ $n = 2$ ถึง $n = 10$

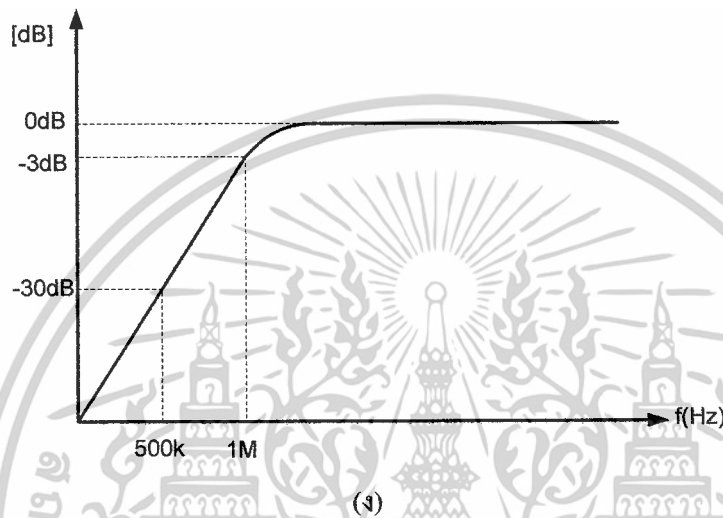
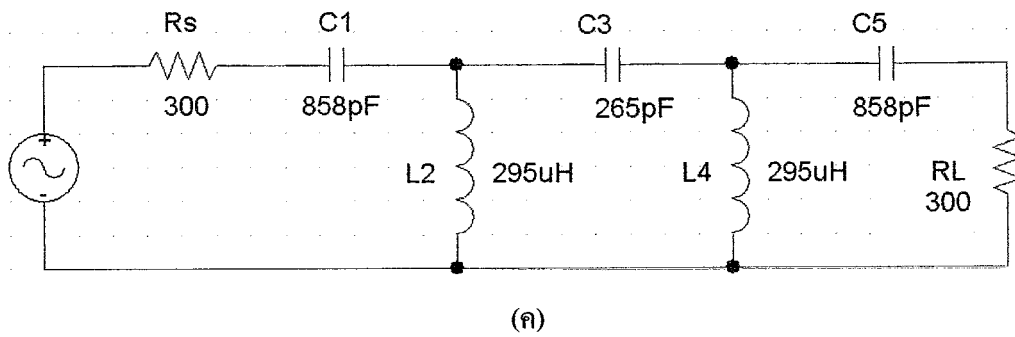


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่สูงผ่าน; (ก) นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
 (ข) การแปลงวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, (ค) ความถี่และอิมพีแดนซ์สเกลวงจรกรอง
 (ง) การตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่สูง

(ค) การแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านโดยแทนตัวเหนี่ยวนำด้วยตัวเก็บประจุและแทนตัวเก็บประจุด้วยตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข)

(ง) คำนอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่สูงผ่านโดยใช้ $Z = 300$ และความถี่ในการสเกลค่า

FSF ที่ $2\pi f_c$

$$C'_1 = \frac{C}{FSF \times Z} = \frac{1/0.618}{6.28 \times 10^6 \times 300} = 858 \text{ pF} \quad (2.54)$$

$$C'_3 = 265 \text{ pF}$$

$$C'_5 = 858 \text{ pF}$$

$$L'_2 = \frac{L \times Z}{FSF} = \frac{(1/1.618) \times 300}{6.28 \times 10^6} = 29.5 \text{ } \mu\text{H} \quad (2.55)$$

จะได้ฟิลเตอร์สุดท้ายดังรูปที่ 2.19 (ค) มีผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 2.19 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.3 การแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

การแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านนั้นจะต้องพิจารณาว่า ผลตอบสนองทางความถี่ที่เราต้องการนั้นมีค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่าความถี่ตัด (cut-off frequency) ทางด้านความถี่สูง เทียบกับความถี่ตัดทางด้านความถี่ต่ำ (f_{cmax} / f_{cmin}) มีค่าเป็นอย่างไร ถ้ามีค่ามากกว่า 2 สามารถที่จะใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่ออนุกรมกับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ซึ่งจะทำได้เป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งเรียกว่า “วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์กว้าง” (Wide-band Bandpass filter) แต่ถ้าเป็นในกรณีตรงกันข้ามกับที่กล่าวไว้ข้างต้น จำเป็นที่จะต้องใช่วิธีการแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ด้วยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation) ซึ่งวงจรกรองแถบความถี่ผ่านดังกล่าวจะเรียกว่า “วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์แคบ” (Narrow-band Bandpass filter)

ตัวอย่างที่ 2.8

ต้องการ : วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบ LC

ความถี่กลางที่ 98.75 MHz

3dB ที่ 96.25 MHz และ 101.25 MHz

60dB ที่ 93.75MHz และ 103.75 MHz

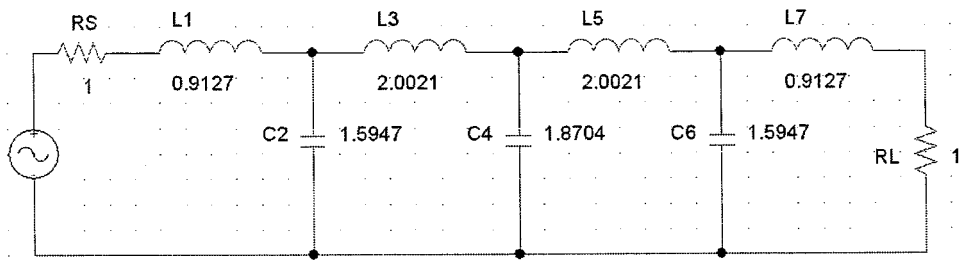
$$R_S = R_L = 50\Omega$$

ผลลัพธ์ : (ก) เนื่องจากค่าอัตราส่วนของความถี่คัตออฟด้านสูงกับ ความถี่คัตออฟด้านต่ำมีค่าน้อยกว่า 2 ดังนั้นจะเลือกใช้วิธีการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่แบบแบนด์แคบ (Narrow - band bandpass)

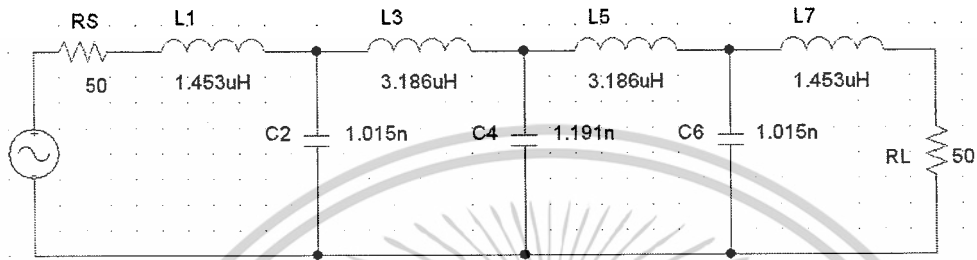
(ข) คำนวณค่าความชันของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

$$A_s = \frac{\text{Stopband bandwidth}}{\text{Passband bandwidth}} = \frac{10\text{MHz}}{5\text{MHz}} = 2 \quad (2.56)$$

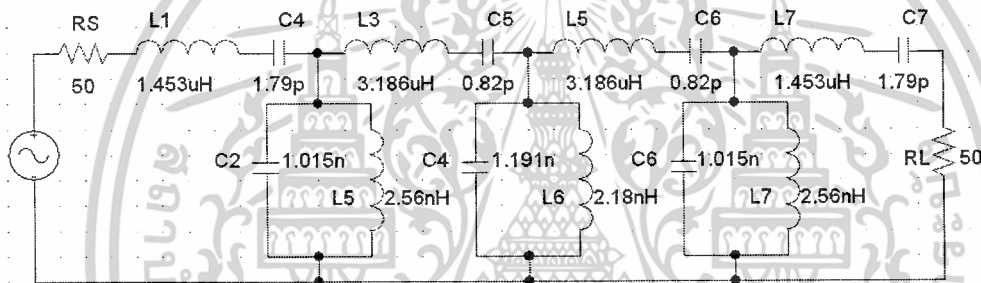
(ค) นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Normalize low-pass) จะต้องเลือกค่าที่เตรียมไว้ให้เกินกว่า 60dB ที่ 2 rad/s รูปที่ 2-41[ภาคผนวก ค] แสดงวงจรกรองอันดับ 7 ของ Chebyshev ที่ 0.01-dB นี่ก็คือคุณสมบัติของวงจรกรองที่ต้องการซึ่งจะไปตรงกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้นอร์มาไลซ์ไว้ในตารางที่ 12.27[ภาคผนวก จ]



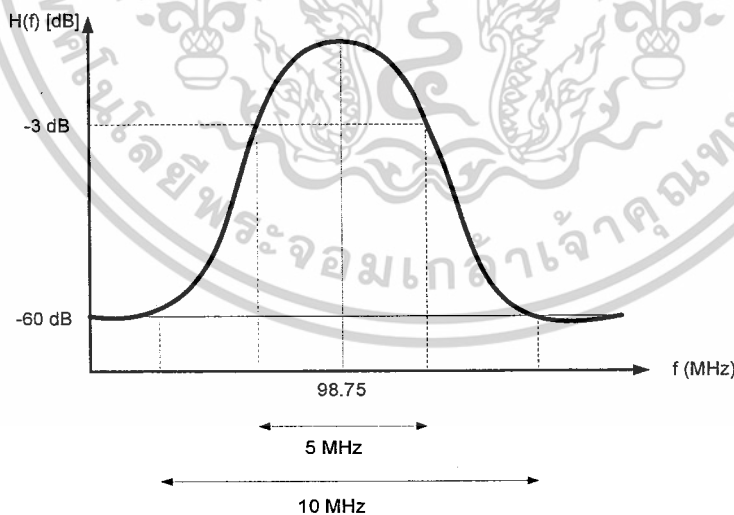
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.20 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์แคบ (Narrow - band bandpass), (ก) นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ข) สเกลค่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ค) แปลง LPF ไปเป็น BPF โดยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation), (ง) ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้

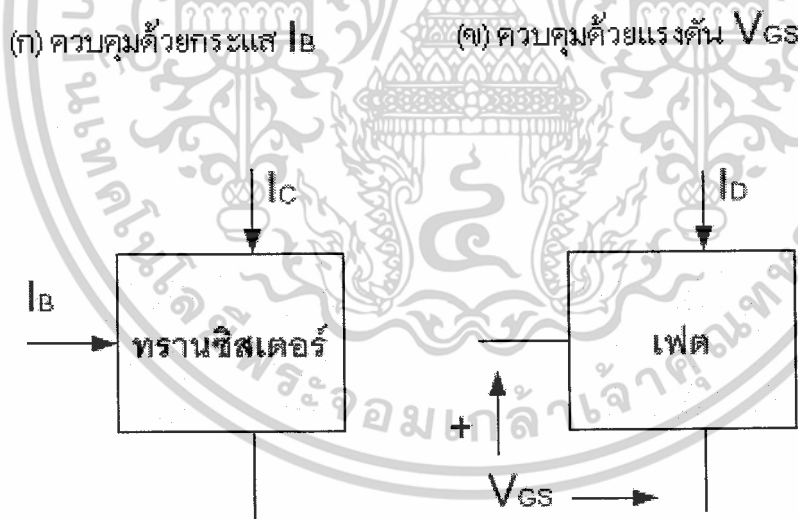
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ง) ในที่นี้จะทำการ สเกลค่าในวงจร โดยการให้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $50\ \Omega$ และความถี่ คัดตอป $f_c = 8\text{MHz}$ เอาตัวเหนี่ยวนำทุกตัวคูณด้วย Z/FSF และเอาตัวเก็บ ประจุทุกตัวหารด้วย $Z \times FSF$ ในที่นี้ $FSF = 2\pi f_c$ การคืนอร์มาไลซ์วงจรรอง แสดงดังรูปที่ 3.7 (ข)
- (จ) การสเกลวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โดยวิธีการ แปลงความถี่ (Frequency Transformation) ค่าของอุปกรณ์ภายในวงจรหาค่าความ สัมพันธ์ได้จาก $\omega_0^2 LC = 1$ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.7 (ค)

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

2.4.1 เฟต

เฟต (FET) มาจากชื่อเต็มว่า ฟิวด์เอฟเฟกทรานซิสเตอร์ (Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำชนิดขั้วเดียว (Unipolar) มีลักษณะโครงสร้างและหลักการการทำงานแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ เพราะทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดสองขั้ว การทำงานของทรานซิสเตอร์ต้องอาศัยกระแส ช่วยควบคุมการทำงานทั้งกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮล ส่วนเฟตต้องใช้แรงดันในการควบคุมการ ทำงานของทรานซิสเตอร์และเฟตแสดงดังรูปที่ 12.20



รูปที่ 12.21 เปรียบเทียบการควบคุม การทำงานของทรานซิสเตอร์และเฟต

รูปที่ 12.20 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์และเฟตรูปที่ 12.20(ก) ทรานซิสเตอร์ถูกควบคุมการทำงานด้วยกระแสเบส (I_B) ส่วนรูปที่ 12.20 (ข) เฟตถูกควบคุมการทำงาน ด้วยแรงดันที่ขาเกตและขาซอส V_{GS} กระแส I_C ของทรานซิสเตอร์จะถูกควบคุมโดยตรงจากกระแส I_B ส่วนกระแส I_D ของเฟตจะถูกควบคุมโดยตรงจากแรงดัน V_{GS}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟตเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานในการขยายสัญญาณและใช้ทำงานในหน้าที่ต่างๆ เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ นับวันเฟตยิ่งมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการนำไปใช้งาน เพราะเฟตมีคุณสมบัติหลายประการดีกว่าทรานซิสเตอร์ สรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ขบวนการผลิตเฟตสามารถนำไปใช้ในการผลิต IC
2. เฟตสามารถต่อขยายสัญญาณแบบหลายภาคได้ดี
3. เฟตทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์
4. สามารถสร้างเฟตให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าทรานซิสเตอร์
5. เฟตไม่มีผลแรงดันต้านภายในเมื่อนำไปใช้เป็นสวิตช์
6. อุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของเฟตน้อยกว่าทรานซิสเตอร์มาก
7. คุณสมบัติโครงสร้างบางชนิดของเฟตสามารถสร้างให้มีความไวในการทำงานได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์
8. เฟตมีสัญญาณรบกวนต่ำกว่าทรานซิสเตอร์ จึงเหมาะสมกับการใช้งานในภาคขยายสัญญาณอัตราขยายต่ำ
9. อิมพีแดนซ์ทางอินพุตของเฟตสูงมากประมาณ $100 M\Omega$ มากกว่าในทรานซิสเตอร์มาก ซึ่งมีเพียงค่าประมาณ $2k\Omega$ เท่านั้น

การทำงานของเฟต ต้องใช้แรงดันในการควบคุมกระแสเหมือนกับการทำงานของหลอดสุญญากาศนั่นคือกระแสจะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน สิ่งนี้เองเป็นเหตุให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ มีชื่อเรียกว่า ฟิวด์เอฟเฟลททรานซิสเตอร์ ซึ่งมีความหมายว่าทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า

2.4.1.1 ชนิดและประเภทของเฟต

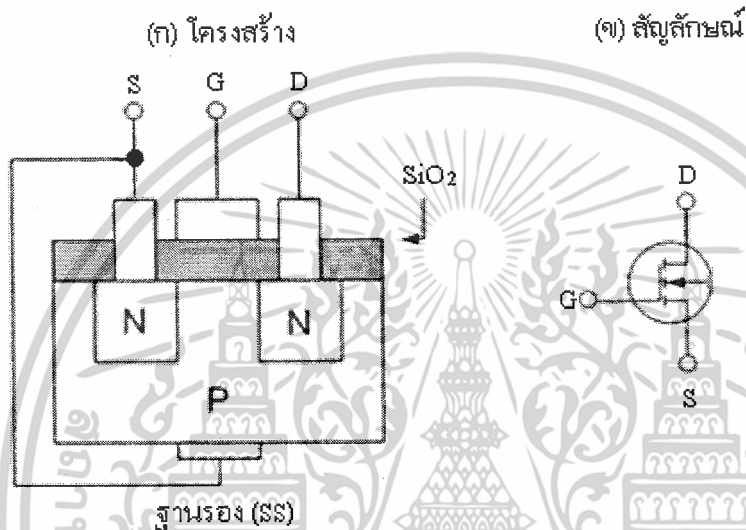
ในปัจจุบันเฟตได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำงานและประยุกต์ใช้งานได้กับอุปกรณ์หลายชนิดมากขึ้น ตัวเฟตเองก็ถูกพัฒนาให้มีประเภทละชนิดมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้เฉพาะเจาะจงมากขึ้น เกิดคุณภาพและประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น เฟตที่สร้างมาใช้งานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ัจจันฟิวด์เอฟเฟลททรานซิสเตอร์ (Junction Field Effect Transistor) หรือเรียกย่อๆว่า เจเฟต (JFET) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดพีแชนแนล (P-Channel) และชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel)
2. มีทอลอ็อกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ ฟิวด์เอฟเฟลททรานซิสเตอร์ (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) หรือเรียกย่อๆว่า มอสเฟต (MOSFET) แบ่งย่อยออกเป็น 2 แบบคือ
 - ก. ดีพลีชันมอสเฟต (Depletion MOSFET) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิด P แชนแนล และชนิด N แชนแนล
 - ข. เอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต (Enhancement MOSFET) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิด P แชนแนล และชนิด N แชนแนล

ในโครงงานนี้จะขอกล่าวเฉพาะในส่วนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต ชนิด N แชนแนล เพื่อให้สอดคล้องกับส่วนของการสร้างฮาร์ดแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET มีโครงสร้างคือ ขา G ถูกแยกออกเป็นอิสระโดยมีฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ชั้นกลาง ส่วนของ D และ S ถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง (SS) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม คือเป็นชนิดเดียวกับฐานรอง (SS) ทำให้แยกส่วนของ D และ S ออกจากกัน เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล เป็นมอสเฟตที่ส่วนของ D และ S เป็นสารชนิด N ถูกสร้างขึ้นบนฐานรอง (SS) ชนิด P ส่วนของ D และ S ถูกแยกออกจากกันด้วยฐานรอง (SS) โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 12.21



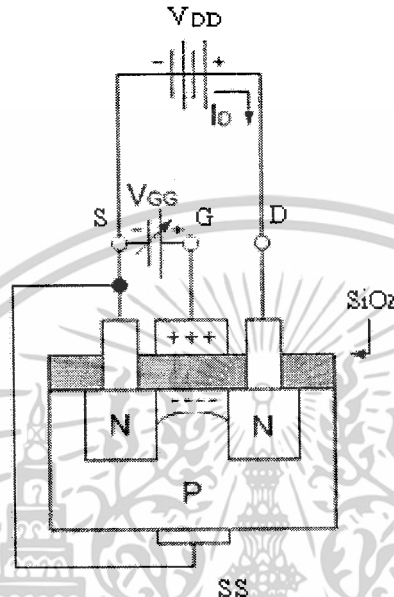
รูปที่ 2.22 เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล

จากรูปที่ 12.21 เป็นโครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล แชนแนลของ MOSFET ดูได้จากสารที่นำมาสร้างเป็นส่วน D และ S ถ้าใช้สารกึ่งตัวนำชนิด N ก็เป็น N แชนแนล ถ้าใช้สารกึ่งตัวนำชนิด P ก็เป็น P แชนแนล ส่วนรูปที่ 12.10 (ข) เป็นสัญลักษณ์ของเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล ส่วนของ D และ S ไม่ต่อถึงกัน และส่วนของ G ก็ถูกแยกออกเพราะถูกฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขึ้นไว้ สัญลักษณ์หัวลูกศรชี้เข้าแสดงไว้ที่ส่วนของฐานรอง (SS) บอกให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำของฐานรอง(SS) เป็นชนิด P (ใช้หลักการจำบวกเข้า ลบออก) ส่วน D และ S ใช้สารชนิดตรงข้ามคือชนิด N การต่อใช้งานของ MOSFET ขาฐานรอง (SS) ต้องต่อเข้ากับขา S เสมอ จึงเขียนสัญลักษณ์ให้ขาฐานรอง (SS) ต่อกับขา S เหลือขาใช้งานเพียง 3 ขา คือขา D , ขา S , และขา G การจ่ายไบอัสให้เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ต้องจ่ายไบอัสดังนี้ จ่ายไบอัสตรงให้ขา G กับขา S เทียบกัน จ่ายไบอัสกลับให้ขา D ลักษณะวงจรไบอัสเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 12.22

จากรูปที่ 12.22 เป็นวงจรไบอัสเบื้องต้นของเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ถ้าจ่ายไบอัสเฉพาะขา D กับขา S ด้วยแรงดัน V_{DD} จะไม่มีกระแส I_D ไหลในวงจรระหว่างขา D กับขา S เพราะขา D กับขา S ถูกขึ้นด้วยฐานรอง (SS) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม เกิดความต้านทานการสูงระหว่างรอยต่อส่วนของ D กับ S ด้านการไหลของกระแส I_D นั่นคือเอน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ MOSFET ไม่ทำงานเมื่อจ่ายแรงดันบวก V_{GG} ให้ขา G เทียบกับขา S เป็นการจ่ายไบอัสตรงให้ขา G กับขา S ศักย์บวกที่ขา G จะผลักให้โฮลที่สารระหว่างรอยต่อ D กับ S เคลื่อนที่ออกไป และดึงอิเล็กตรอนอิสระเข้าไปแทนที่ ทำให้สารกึ่งตัวนำระหว่างรอยต่อ D กับ S เปลี่ยนสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N เหมือนกับ D และ S ต่อสารกึ่งตัวนำ D และ S เข้าด้วยกัน เกิดกระแส I_D ไหลในวงจร



รูปที่ 2.23 วงจรไบอัสเบื้องต้นของ ทรานซิสเตอร์ MOSFET ชนิด N แชนแนล

ถ้าจ่ายไบอัสตรงที่ขา G กับขา S น้อย ศักย์บวกที่ขา G จะผลักโฮลออกไปน้อย ดึงอิเล็กตรอนเข้ามาแทนที่น้อย ระหว่างรอยต่อ D กับ S เปลี่ยนสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N น้อย เกิดกระแส I_D ไหลน้อย ถ้าจ่ายไบอัสตรงที่ขา G กับขา S มาก ศักย์บวกที่ขา G ผลักโฮลออกไปมาก ดึงอิเล็กตรอนอิสระเข้ามาแทนที่มาก สารระหว่างรอยต่อ D กับ S เปลี่ยนสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N มาก เกิดกระแส I_D ไหลมาก สามารถควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ MOSFET ชนิด N แชนแนลได้ ลักษณะการทำงานเหมือน NPN ทรานซิสเตอร์

2.4.1.2 วงจรพื้นฐานและรายละเอียดของเฟต

เนื่องจากความต้านทานระหว่างรอยต่อเกิดกับขอสของเฟตมีค่าสูงมากเป็นเมกะโอห์ม ($M\Omega$) เพราะลักษณะโครงสร้างบางแบบของเฟตส่วนของเกตถูกแยกออกจากส่วนของเดรนและซอสและเฟตบางแบบขาเกตกับขาซอสถูกจ่ายไบอัสกลับให้ ค่าความต้านทานที่สูงนี้เป็นค่าความต้านทานทางอินพุตของวงจร มีเสมือนว่าไม่มีกระแสไหลเข้าทางขาเกตเลย ดังนั้นการทำงานของเฟตจึงขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนให้เกตเท่านั้น ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน นั่นคือเฟตทำงานโดยใช้แรงดัน

เฟตมีมากมายหลายแบบหลายชนิดหลายเบอร์เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์แต่ละแบบแต่ละชนิดแต่ละเบอร์ จะมีความเหมาะสมในการทำงานในการนำไปใช้แตกต่างกัน เพราะการออกแบบสร้างเฟตมาใช้งานต้องสร้างให้เฉพาะเจาะจงลงไป เพื่อให้การทำงานของเฟตได้ผลดีมีประสิทธิภาพและเกิดความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

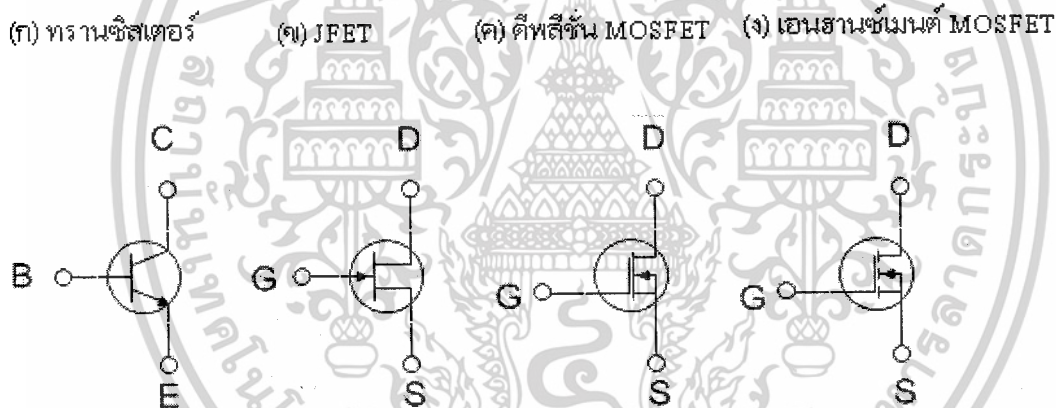
ทนทานต่อการใช้งาน ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้ทราบรายละเอียดของเฟตจึงมีความสำคัญช่วยให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นสามารถเลือกเฟตไปใช้งานได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

การจัดวงจรขาร่วมของเฟต เฟตคือทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง ถึงแม้ว่าโครงสร้างจะแตกต่าง แต่เฟตมี 3 ขา เหมือนกับทรานซิสเตอร์ นำไปใช้ในวงจรขยายสัญญาณ ได้เหมือนกัน ทำให้หลักการจ่ายไบอัสและหลักการจัดวงจรขาร่วมคล้ายกับทรานซิสเตอร์ ถึงแม้จะเหมือนกันทั้งหมด แต่ก็มีบางส่วนที่เหมือนกัน นอกจากนั้นขาต่างๆของเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับขาต่างๆ ของทรานซิสเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกัน เปรียบเทียบกันได้ดังนี้

ขา C ของทรานซิสเตอร์ เปรียบได้กับขา ของเฟต D ซึ่งได้รับการจ่ายไบอัสกลับเหมือนกัน

ขา E ของทรานซิสเตอร์ เปรียบได้กับขา ของเฟต S ซึ่งได้รับการจ่ายไบอัสตรงเหมือนกัน

ขา B ของทรานซิสเตอร์ เปรียบได้กับขา ของเฟต G การจ่ายไบอัสให้ขา B นี้แตกต่างกันบ้างคือขา B ของทรานซิสเตอร์ต้องได้รับไบอัสตรง เทียบกับขา E ซึ่งเหมือนกับเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET ต้องได้รับไบอัสตรงที่ขา G เทียบกับขา S ส่วน JFET และดีพลีชัน MOSFET จะได้รับไบอัสกลับที่ขา G เทียบกับขา S ลักษณะการเปรียบเทียบขาต่อขาของทรานซิสเตอร์และเฟตแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบขาของ ทรานซิสเตอร์และเฟต

เฟตมี 3 ขาเหมือนทรานซิสเตอร์ และทำงานคล้ายกับทรานซิสเตอร์ ดังนั้น การจัดวงจรขาร่วมของเฟต สามารถทำได้คล้ายกับการจัดวงจรขาร่วมของทรานซิสเตอร์ คือสามารถจัดวงจรขาร่วมได้ 3 แบบ คือ

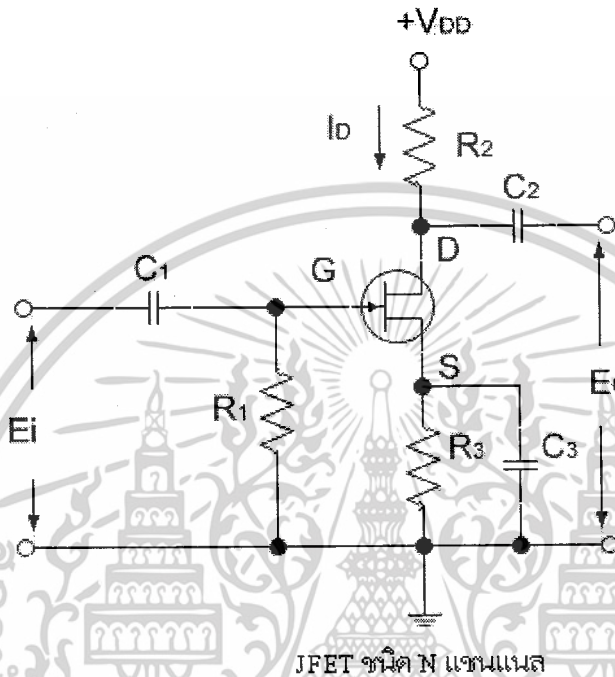
1. วงจรเกตร่วม (Common Gate)
2. วงจรเดรนร่วม (Common Drain)
3. วงจรซอร์สร่วม (Common Source)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวเฉพาะ ในส่วนของวงจรซอร์สร่วม (Common Source) เพื่อให้สอดคล้องกับส่วนของการสร้างฮาร์ดแวร์

วงจรซอร์สร่วม วงจรซอร์สร่วมเป็นวงจรใช้ขา S เป็นขาร่วมระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต ขาอินพุตถูกป้อนเข้าที่ขา G ขาเอาต์พุตถูกป้อนออกที่ขา D ลักษณะของวงจรซอร์สร่วมแบบพื้นฐานแสดงดังรูป 2.24 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.24 เป็นวงจรซอร์สรวมแบบพื้นฐานของ JFET ชนิด N แชนแนล สัญญาณอินพุตถูกป้อนเข้าที่ขา G กับขา S โดยให้ขา S เป็นขาร่วม ขา G ได้รับไบอัสกลับจึงทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมาก สัญญาณออกเอาต์พุตถูกป้อนออกที่ขา D กับขา S เนื่องจากขา D ได้รับไบอัสกลับเทียบกับกับขา S ซึ่งเป็นสารทอนเดียวกันจึงทำให้อาต์พุตอิมพีแดนซ์ มีค่าต่ำกว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ แต่ถึงแม้ว่าจะมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำก็ตามก็ยังมีค่าสูงกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมิตเตอร์ร่วมของทรานซิสเตอร์ส่วนเฟส



รูปที่ 2.25 วงจรซอร์สรวมแบบพื้นฐาน

ของสัญญาณอินพุตจะต่างกัน 180 องศา คือถ้าสัญญาณอินพุตเป็นบวก สัญญาณออกเอาต์พุตจะเป็นลบ และถ้าสัญญาณอินพุตเป็นลบ สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นบวก วงจรซอร์สรวม นำไปใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณทั่วไป ให้คุณภาพดีทั้งด้านการขยายแรงดันและขยายกำลัง

ลักษณะของวงจรขยายกำลัง วงจรขยายกำลังมีอยู่หลายชนิด สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของจุดทำงานไฟตรง (Quiescent point Q-point) ซึ่งจะแบ่งวงจรขยายออกได้เป็น 4 แบบใหญ่ คือ

วงจรขยาย Class A

วงจรขยาย Class B

วงจรขยาย Class AB

วงจรขยาย Class C

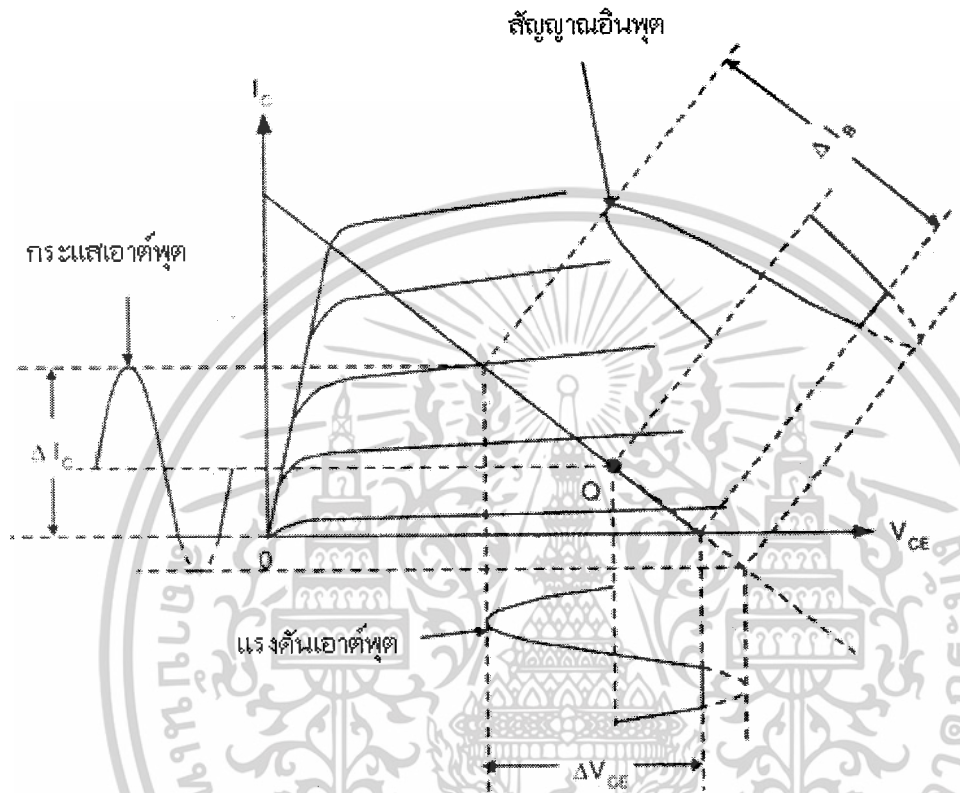
ในโครงการนี้จะขอกว่าเฉพาะในส่วนของวงจรขยาย Class AB เพื่อให้สอดคล้องกับส่วนของการสร้างฮาร์ดแวร์

วงจรขยาย Class B เนื่องจากเป็นความต้องการลดความเพี้ยนตรงรอยต่อระหว่างรอยต่อของสัญญาณซีกบวกและซีกลบ ของวงจรขยาย Class B นี้ ต้องการลดประสิทธิภาพของวงจร Class B ลงไป เป็นการนำเอาคุณสมบัติของวงจรขยาย Class A และ Class B มาใช้ร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่าวงจรขยาย Class AB ที่มีคุณลักษณะอยู่ระหว่าง Class A และ Class B ซึ่ง Class AB มีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าวงจรขยาย Class B ดีกว่า Class A และสามารถลดความผิดเพี้ยนคลอสโอเวอร์ (Crossover distortion) ลงได้มาก ดังนั้นวงจร Class AB จึงให้ทั้งความเพี้ยนต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง นิยมใช้ในภาคขยายกำลัง



รูปที่ 2.26 แสดงการทำงานของวงจรขยาย Class AB (Class-AB Amplifier)

ตารางข้อมูลของเฟต การเลือกรายละเอียดของเฟตในการประยุกต์ใช้งาน สามารถทำได้โดยดูจากตารางข้อมูลของเฟตเบอร์นั้นๆที่กำหนดไว้ผู้ผลิตจะบอกรายละเอียดต่างๆไว้ในตารางข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างตารางข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.26 และตารางในภาคผนวก ฉ.

จากรูปที่ 2.26 เป็นรายละเอียดและค่าสูงสุดของเฟตเบอร์ BLF 254 ของฟิลลิปส์ มีรายละเอียดต่างๆบอกได้ดังนี้เป็นเฟตประเภท เอนฮานฮานซ์เมนต์ MOSFET ชนิด N แชนแนล ผลิตจากราตุซิลิกอน ใช้กับสัญญาณขนาดใหญ่ในความถี่ย่าน VHF ตัวถังเป็นแบบ SOT 123A มีคุณสมบัติและค่าสูงสุดในการทำงานต่างๆ แสดงดังตารางใน ภาคผนวก ฉ.

คุณสมบัติ

1. ขยายพาวเวอร์สูง
2. สัญญาณรบกวนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุณหภูมิคงที่
5. ทนต่อการไม่แมทของโหลด

ค่าสูงสุดในการทำงาน

1. แรงดันสูงสุดที่เดรนและซอส (V_{DS}) = 60V
2. แรงดันสูงสุดที่เกิดและซอส (V_{GS}) = $\pm 20V$
3. กระแสเดรนสูงสุด (I_D) = 6A
4. การกระตัวรวมของกำลัง (Ptot) = 68 W
5. อุณหภูมิสะสมภายในตัว (Tstg) = 150 C°
6. อุณหภูมิสูงสุดที่รอยต่อใช้งานได้ (T_j) = 200C°

นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดทางไฟฟ้าต่างๆ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 C° นั่นคือเมื่อนำเฟตไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง 25 C° เฟตจะทำงานได้สมรรถนะที่สุดตามค่าต่างๆ ที่บอกไว้ในตารางคุณสมบัติ ถ้าอุณหภูมิใช้งานแตกต่างกันไปจากนี้การทำงานของเฟตอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ค่ารายละเอียดทางไฟฟ้าแสดงดังตารางใน ภาคผนวก ฉ.

จากรูปในภาคผนวก ฉ. เป็นรายละเอียดทางไฟฟ้าของเอนฮานฮานซ์เมนต์ MOSFET เบอร์ BLF 254 ค่ารายละเอียดทางไฟฟ้ามีกนิยมอบค่าไว้ประมาณ 2-3 ค่า คือค่าต่ำสุด (Min) ค่าใช้งาน (Type) และค่าสูงสุด (Max) การกำหนดค่าทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานของเฟตถ้ามีค่าใช้งานควรใช้ค่าตามนั้น แต่ถ้าไม่มีค่าใช้ควรใช้ค่าต่ำสุด เพื่อความปลอดภัยในการทำงานของเฟต สิ่งสำคัญคือการใช้งานต้องจ่ายค่าต่างๆ ให้ตัวเฟตไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดในตารางข้อมูล และควรใช้งานให้ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ เพราะค่าเหล่านี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะในการทำงานของเฟตด้วย และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ทำงานด้วย

2.4.2 ดัมมี่ โหลด

ดัมมี่ โหลด บางครั้งเรียกว่า ดัมมี่ เอนเทนนา (Dummy antenna) หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ต่อแทนสายอากาศในขณะปรับแต่งเครื่องส่งหรือตรวจสอบกำลังเครื่องส่ง เพื่อมาให้คลื่นวิทยุออกไปรบกวนสถานีอื่น ในทางปฏิบัติจะสร้างหรือจัดหาดัมมี่ โหลด ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงความต้านทานบริสุทธิ์ให้มากที่สุดที่ย่านความถี่ที่ใช้งานและให้มีค่าอิมพีแดนซ์ตามที่ต้องการหรือมีค่าใกล้เคียงกับที่ต้องการ ดัมมี่ โหลดที่ใช้งานกันทั่วไปจะทำให้เกิด SWR ได้บ้าง และดัมมี่ โหลดที่ดีจะมีค่า SWR ต่ำมากที่สุดตลอดย่านความถี่ คุณสมบัติอีกอย่างของดัมมี่ โหลด จะต้องแมทซ์กับเครื่องส่งตลอดย่านความถี่ คือ มีช่วงที่กว้างมากที่สุดและไม่มีการแพร่กระจายออกจากดัมมี่ โหลดหรือควรมีค่าต่ำ

2.4.3 สายอากาศ

สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของเครื่องส่งและเครื่องรับ ทำหน้าที่แพร่กระจาย คลื่นจากเครื่องส่งให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกอากาศและรับคลื่นวิทยุเข้าสู่เครื่องรับ สายอากาศที่ใช้เป็นสื่อกลางระหว่างเครื่องส่งและอากาศ หรือ เครื่องรับและอากาศมีมากมายหลายชนิด ตั้งแต่สายอากาศวิทยุ AM – FM วิทยุรับส่ง โทรทัศน์ ไมโครเวฟ เครื่องบิน และสายอากาศ สื่อสารดาวเทียม เป็นต้น แต่ละแบบยังแบ่งออกเป็นชนิดเฉพาะกรณี ดังนั้นการ เลือกใช้สายอากาศ จึงขึ้นอยู่กับงานที่ใช้และย่านความถี่ที่ใช้ ตลอดจนประสิทธิภาพของการใช้งาน

2.4.3.1 ชนิดของสายอากาศ

1. ตามลักษณะการใช้งาน แบ่งออกเป็น

1.1 สายอากาศในแนวนอน (Horizontal antenna) เช่น สายอากาศไดโพล

1.2 สายอากาศในแนวตั้ง (Vertical antenna) เช่น สายอากาศมาโคนี

1.3 สายอากาศชนิดพิเศษ เช่น สายอากาศยาก็ ล็อกเพอริออดิก

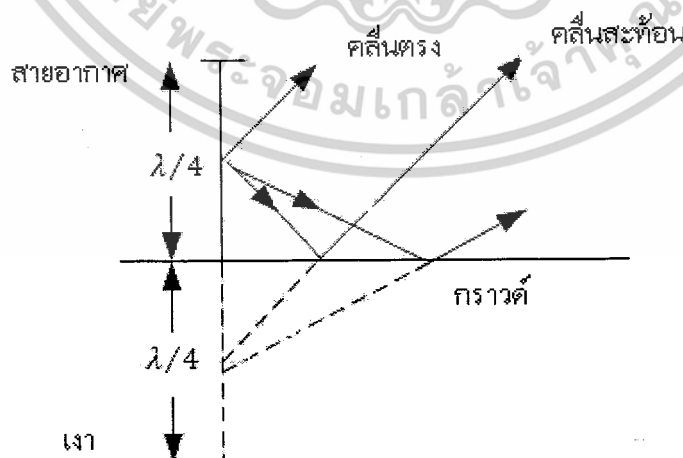
2. ตามความถี่ ซึ่งเป็นที่นิยมมาก แบ่งออกเป็น

2.1 ย่านความถี่ปานกลางและความถี่สูง

2.2 ย่านความถี่ VHF UHF และไมโครเวฟ

ในโครงการจะขอกล่าวเฉพาะในส่วนของสายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์ เพลน หรือมาโคนี

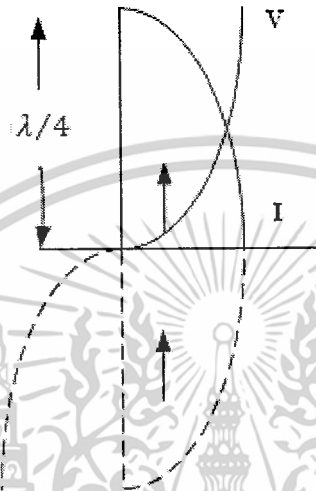
2.4.3.2 สายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์ เพลน หรือมาโคนี เป็นสายอากาศที่มีความยาว $\lambda/4$ วางในแนวตั้งบนระนาบตัวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ ผลที่ได้เสมือนใช้สายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่นวางในแนวตั้ง เพราะระนาบกราวด์เปรียบเสมือนเงาที่ทำให้เกิดสายอากาศอีกชุดหนึ่งยาว $\lambda/4$ วางในแนวตั้ง รวมความยาวทั้งสองข้างได้ $\lambda/2$ ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงหลักการเบื้องต้นสายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์เพลน

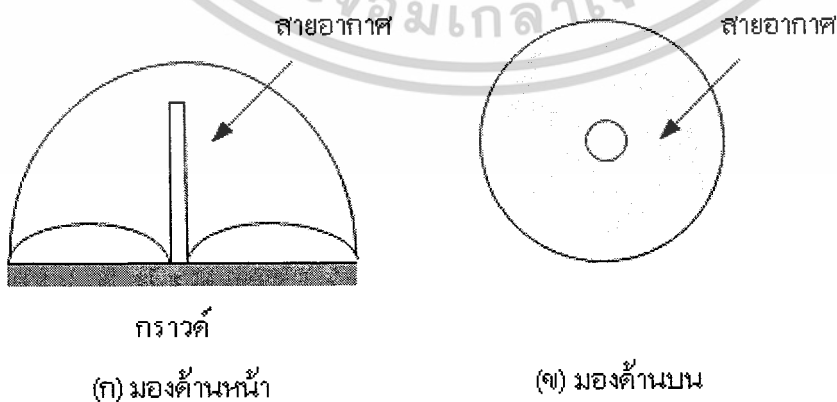
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะกระแสและแรงดันบนสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 กระแสจะมีค่าสูงสุดที่พื้นกราวด์ ส่วนแรงดันจะมีค่าต่ำสุดทำให้ที่กราวด์มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ จะใช้เป็นจุดต่อสายส่งซึ่งมีอิมพีแดนซ์ประมาณ 36 โอห์ม และที่ปลายด้านบนจะมีค่ากระแสต่ำสุด แรงดันสูงสุด ทำให้ที่ปลายด้านบนมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก



รูปที่ 2.28 ลักษณะกระแสและแรงดันสายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์เฟลน

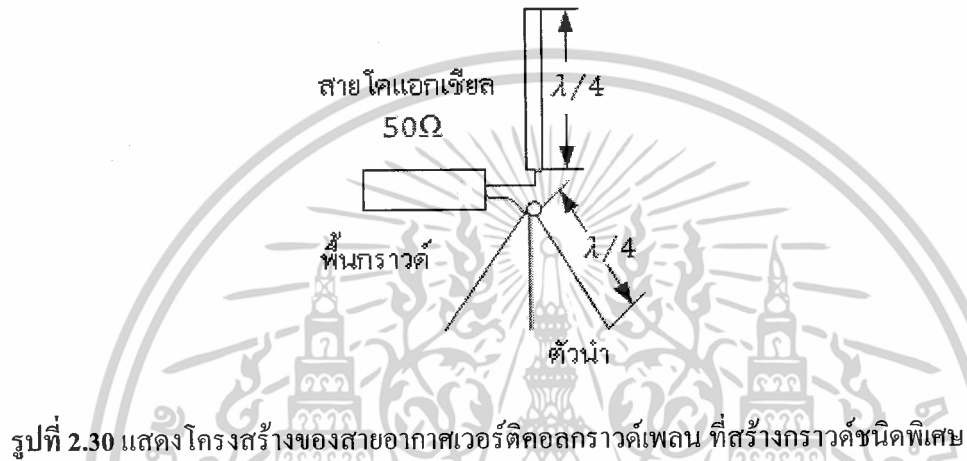
รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวเท่าๆกันทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน เป็นสายอากาศที่วางในแนวตั้ง มีโพลาริเซชันในแนวตั้ง จะมีการแพร่กระจายคลื่นได้ดีเมื่อพื้นที่ ทำหน้าที่เป็นกราวด์ มีสภาพเป็นความนำที่ดี รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์เฟลน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบเวอร์ติคอลลกราวด์เพลน มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง พื้นกราวด์จะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ และที่ขนาดความสูงของสายอากาศที่แตกต่างกัน จะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแตกต่างกันด้วย

ในโครงการนี้กราวด์พิเศษโดยการต่อลวดตัวนำออกจากฐานสายอากาศไปรอบทิศทางอย่างน้อย 3 ทิศลวดตัวนำแต่ละเส้นจะมีความยาว แต่ละเส้นจะมีความยาว $\lambda/4$ จะทำหน้าที่เสมือนกราวด์ให้กับสายอากาศ ดังรูปที่ 2.30

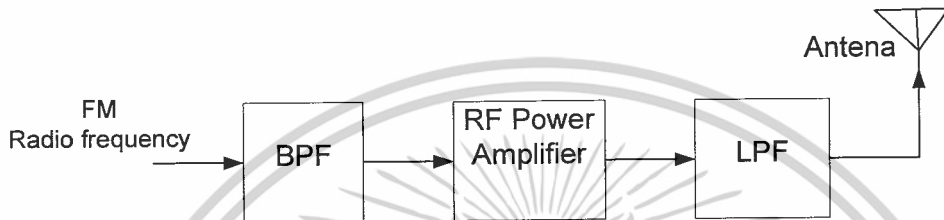


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องของทฤษฎีและหลักการของวงจรกรอง ต่อไปจะเป็นวิธีการนำเอาทฤษฎีและหลักการเหล่านั้นมาทำการสังเคราะห์สร้างวงจรกรอง เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชน แนวคิดในการนำวงจรกรอง มาประยุกต์ใช้กับเครื่องส่งวิทยุชุมชนเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 การนำวงจรกรองมาประยุกต์ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชน

จากรูปเป็นการนำวงจรกรองมาประยุกต์ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชน ซึ่งวงจรกรองที่นำมาใช้ก็คือ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass Filter: BPF) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter: LPF) ดังแสดงได้จากรูปที่ 3.1

3.1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass Filter)

หน้าที่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass Filter: BPF) คือ จะยอมให้ช่วงความถี่ใด ความถี่หนึ่งผ่านได้เท่านั้น ส่วนความถี่อื่นนอกเหนือจากนี้จะไม่ยอมให้ผ่าน ดังนั้น BPF จึงช่วยในการป้องกัน ความถี่เบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น ในคลื่นความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ไม่ให้ไปแทรกสอดคลื่นความถี่สถานีวิทยุเอฟเอ็ม สถานีอื่น อีกทั้งยังช่วยในการลดค่าความถี่ฮาร์โมนิกที่ไม่ใช่ฮาร์โมนิกที่ 1 ที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ได้อีกทางหนึ่งด้วย

การคำนวณ

ออกแบบวงจรตามข้อกำหนด ซึ่งวงจรกรองความถี่ในโครงงานนี้สามารถสร้างได้ให้ใกล้เคียงกับข้อกำหนดมากที่สุดเป็นดังนี้

วิธีทำที่ 1

กำหนดให้: วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบ LC

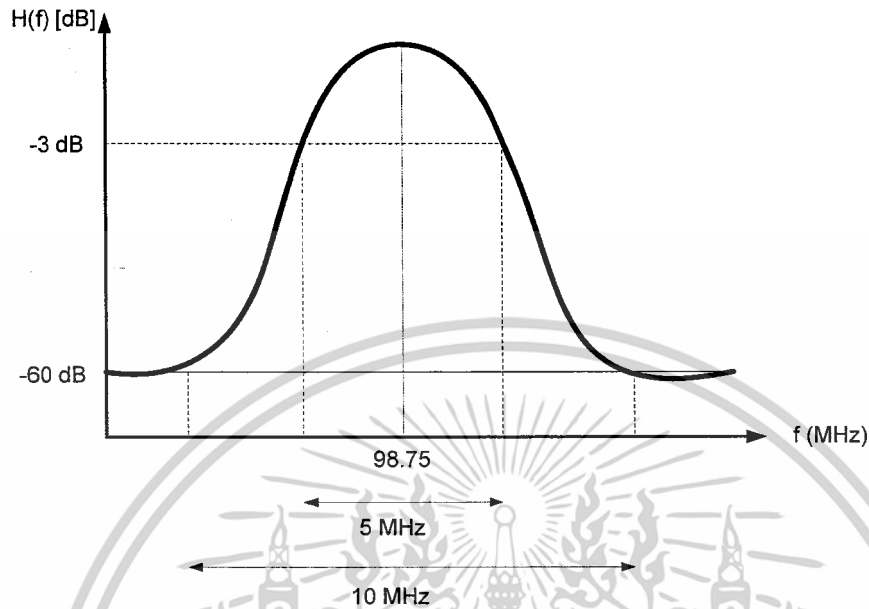
ความถี่กลางที่ 98.75 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 3dB ที่ 96.25 MHz และ 101.25 MHz

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60dB ที่ 93.75MHz และ 103.75 MHz

$$R_S = R_L = 50\Omega$$



รูปที่ 3.2 ลักษณะของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ทำการออกแบบ

เป็นผลให้ : (ก) เนื่องจากค่าอัตราส่วนของความถี่คutoff ด้านสูงกับ ความถี่คutoff ด้านต่ำ $f_{c,max} / f_{c,min}$ มีค่าเท่ากับ 2 พอດดังนั้นจะเลือกใช้วิธี การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์กว้าง (Wide-band bandpass) หรือแบบแบนด์แคบ (Narrow-band bandpass) ลองใช้วิธีการออกแบบวงจรกรองแบบแบนด์แคบ

(ข) คำนวณค่าความชันของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

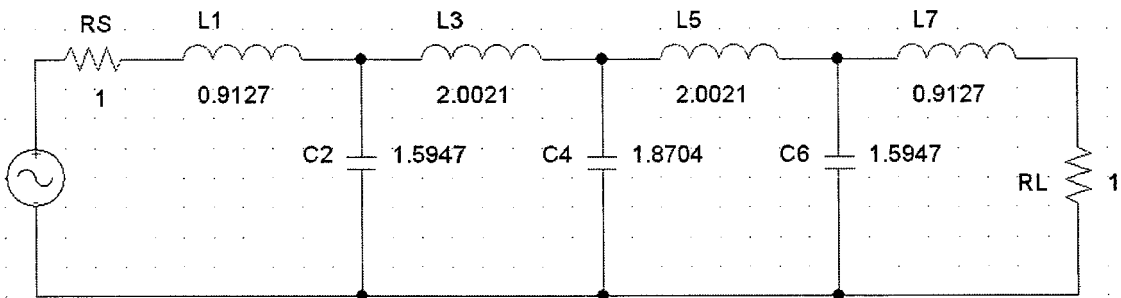
$$A_s = \frac{\text{Stopband bandwidth}}{\text{Passband bandwidth}} = \frac{10\text{MHz}}{5\text{MHz}} = 2 \quad (3.1)$$

(ค) นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Normalize low-pass) จะต้องเลือกค่าที่เตรียมไว้ให้เกินกว่า 60 dB ที่ 2 rad/s รูปที่ 2-41[ภาคผนวก ค] แสดงวงจรกรองอันดับ 7 ของ Chebyshev ที่ 0.01-dB นี่คือนคุณสมบัติของวงจรกรองที่ต้องการ ซึ่งจะไปตรงกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้นอร์มาไลซ์ไว้แล้วดังตารางที่ 12.27 [ภาคผนวก จ]

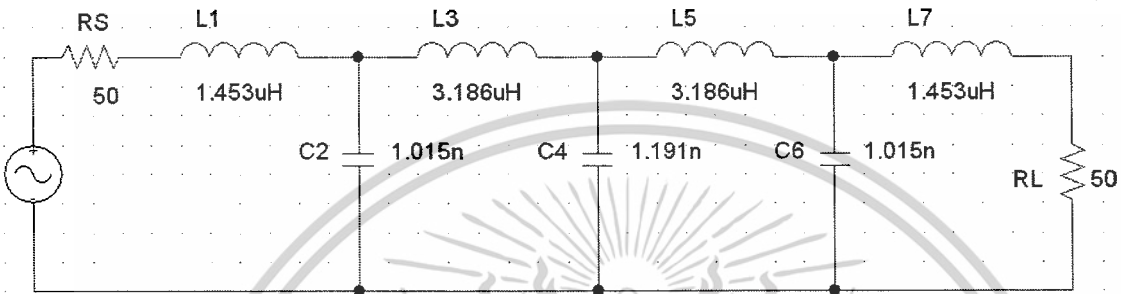
(ง) ในที่นี้จะทำการ สเกลค่าในวงจรโดยการให้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω และ ความถี่คutoff $f_c = 8\text{MHz}$ เอาตัวเหนี่ยวนำทุกตัวคูณด้วย Z / FSF และเอาตัวเก็บประจุทุกตัวหารด้วย $Z \times FSF$ ในที่นี้ $FSF = 2\pi f_c$ การคืนนอร์มาไลซ์วงจรกรองแสดงดังรูปที่ 3.7(ข)

(จ) การสเกลวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน โดยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation) ค่าของอุปกรณ์ภายในวงจรหาค่าความสัมพันธ์ได้จาก $\omega_0^2 LC = 1$ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.7(ค)

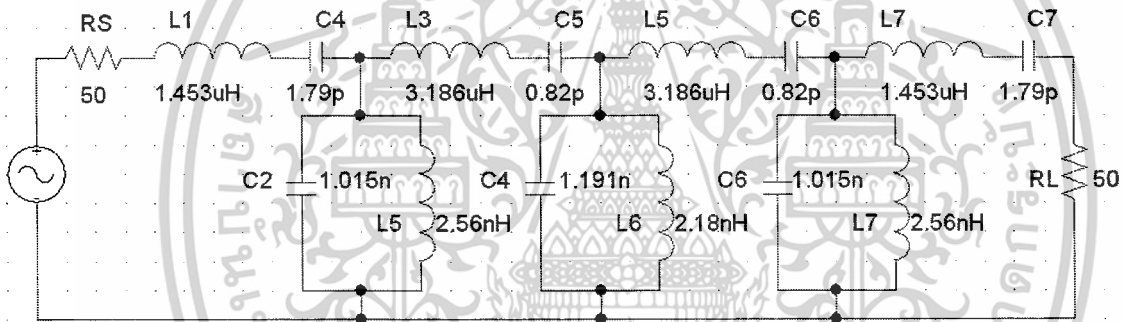
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์แคป (Narrow-band bandpass); (ก) นอร์มัลไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน, (ข) สเตลค่าวงจกรองความถี่ต่ำผ่าน, (ค) แปลง LPF ไปเป็น BPF โดยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation)

วิธีทำที่ 2

กำหนดให้: วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบ LC

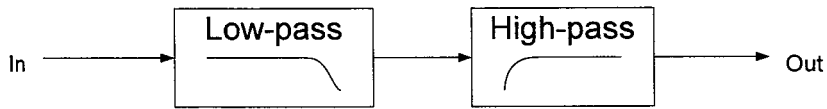
ความถี่กลางที่ 98.75 MHz

3dB ที่ 96.25 MHz และ 101.25 MHz

$$R_S = R_L = 50\Omega$$

เป็นผลให้: (ก) เนื่องจากค่าอัตราส่วนของความถี่คัตออฟด้านสูงกับ ความถี่คัตออฟด้านต่ำมีค่าเท่ากับ 2 พอดี ลองการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์กว้าง (Wide-band bandpass) โดยการนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ต่ออันดับกับวงจรกรองความถี่สูงผ่านดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

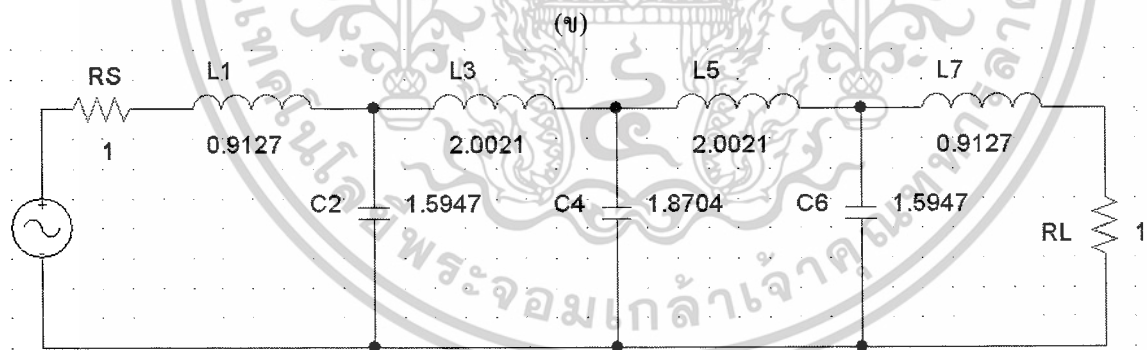
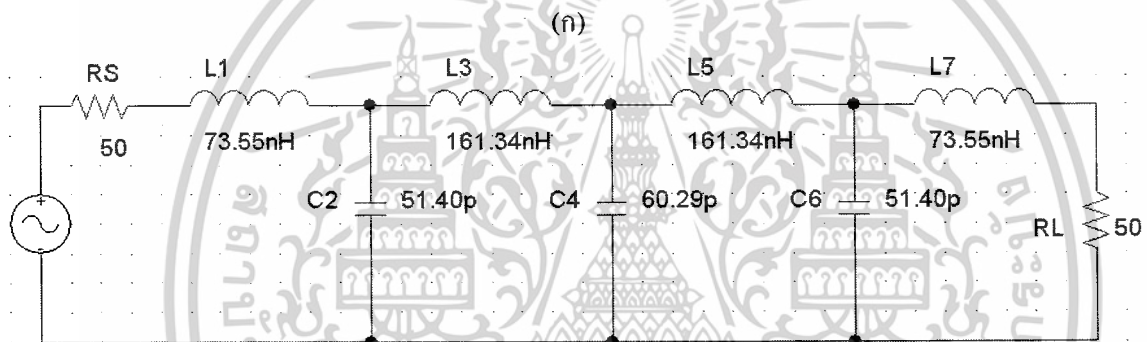
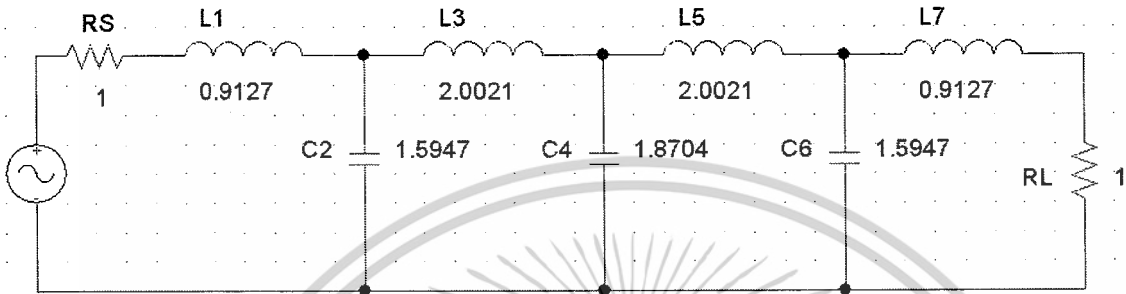


HPF:

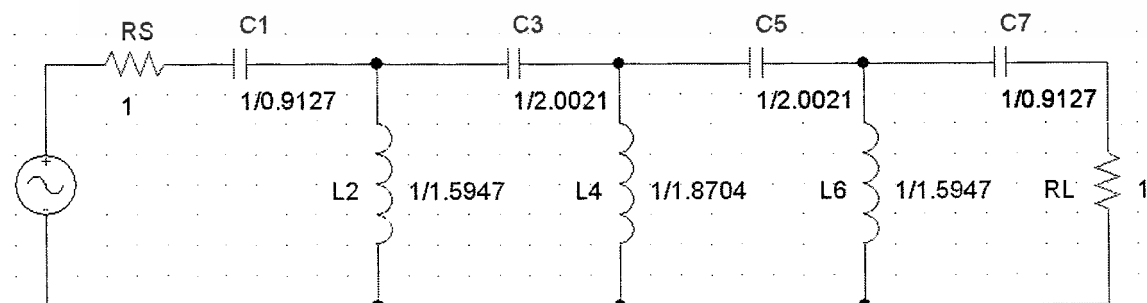
3dB ที่ 94.75 MHz

LPF:

3dB ที่ 102.75 MHz

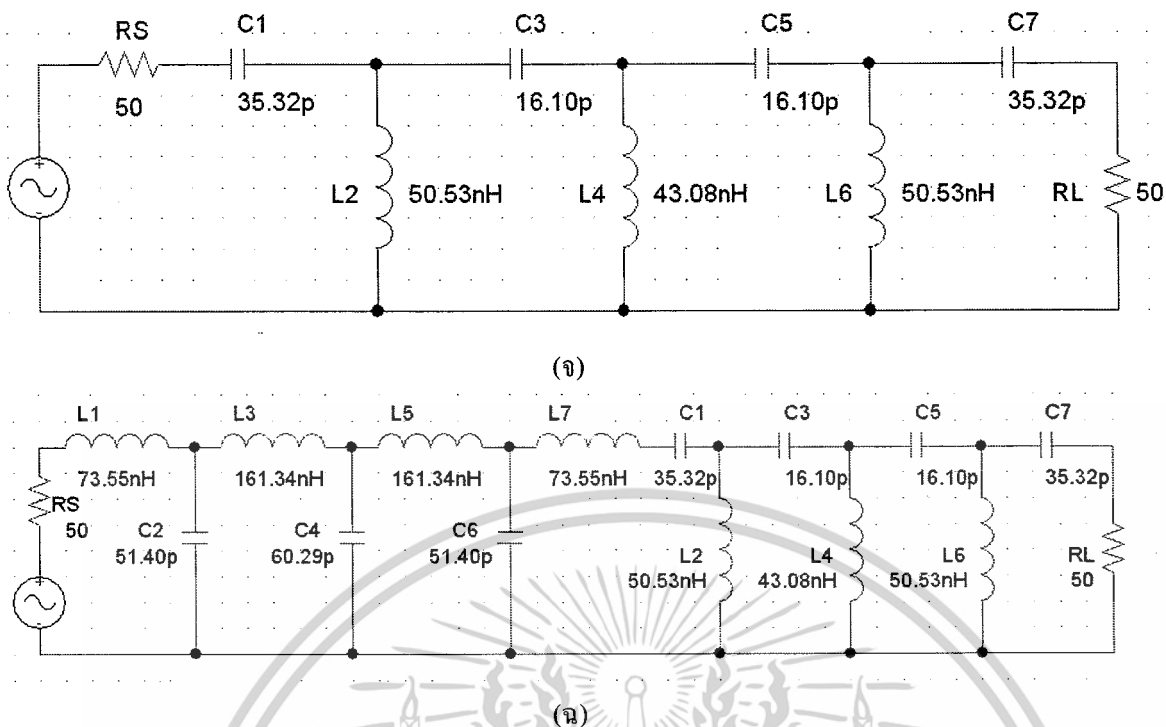


(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแบนด์กว้าง; (ก) นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำ, (ข) สเกลค่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน, (ค) นอมาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, (ง) แปลงเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, (จ) สเกลค่าวงจรกรองความถี่สูงผ่าน, (ฉ) นำโครงข่ายทั้งสองมาต่อแบบอันดับกัน

(ข) LPF และ HPF จะสามารถออกแบบโดยเป็นอิสระต่อกันคำนวณค่าความชันของวงจรกรองโดยจะได้ค่าเดียวกันกับสมการที่ 3.2 คือค่าความชัน $A_c = 2$ จะนำค่านี้ไปใช้ในการหาอันดับของวงจรกรองจากกราฟ Attenuation characteristics ดังรูปที่ 2-41[ภาคผนวก ค] ในภาคผนวก ซึ่งจะได้อันดับของ LPF และ HPF อันดับ 7 ของ Chebyshev ที่ 0.01-dB นอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถดูได้จากตาราง 12.27[ภาคผนวก จ] ในภาคผนวกส่วนของ LPF นอร์มาไลซ์วงจรกรองแสดงไว้ในรูปที่ 3.7(ก) การสเกลค่าความถี่และอิมพีแดนซ์จะทำได้โดยการนำเอาตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดคูณด้วย Z / FSF และเอาตัวเก็บประจุทุกตัวหารด้วย $Z \times FSF$ ในที่นี้ $FSF = 2\pi f_c$, $f_c = 98.75\text{MHz}$ และ $Z = 50\Omega$ การได้อันดับของวงจรกรองแสดงดังรูปที่ 3.7(ข)

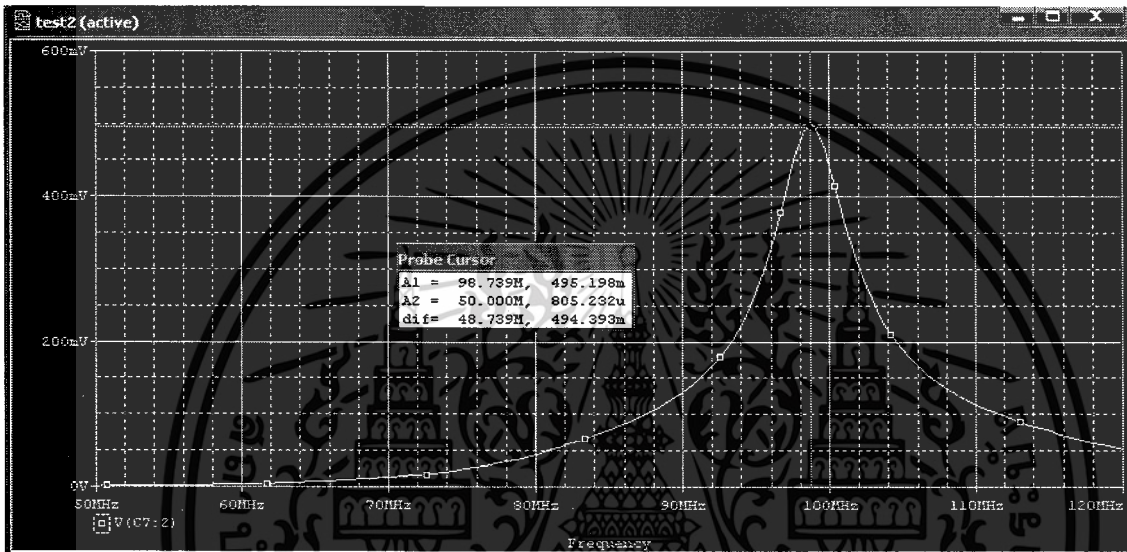
(ค) ส่วนของ HPF ค่าการนอร์มาไลซ์วงจรกรองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7(ค) เมื่อทำการแปลง Normalize low-pass ไปเป็น Normalize high-pass โดยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency transformation) เรียบร้อยแล้ว โดยสังเกตจากรูปที่ 3.7(ง) โครงข่ายสามารถทำการได้อันดับของวงจรกรองโดยการคูณตัวเหนี่ยวนำทุกตัวด้วย Z / FSF และเอา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุทุก ตัวหารด้วย $Z \times FSF$ ในที่นี้ $FSF = 2\pi f_c$, $f_c = 98.75\text{MHz}$
 และ $Z = 50\Omega$ การคืนอร์มาไลซ์วงจรกรองความถี่สูงผ่านแสดงดังรูปที่ 3.7(จ)
 (ง) วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในตอนนี้สามารถนำมารวม
 กันได้แล้วดังรูป 3.7(ฉ)

การสร้าง

1. ทดสอบวงจรฟิลเตอร์ด้วยการ simulate ในโปรแกรม PSpice



ความถี่กลาง: 98.75 MHz

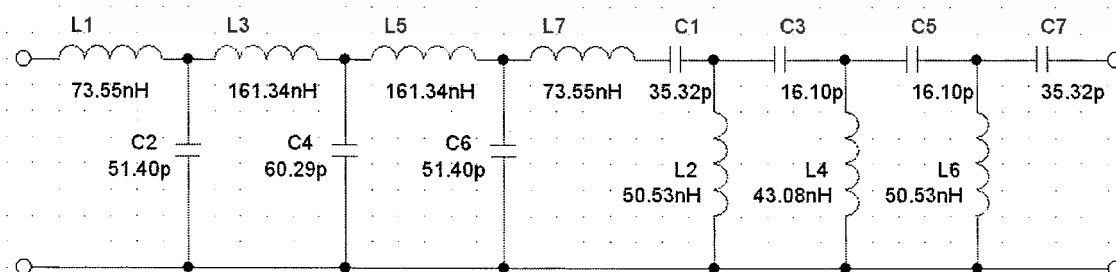
แรงดันเอาต์พุตสูงสุด: 500 mV

3dB ที่ความถี่: 96.25 MHz, 101.25MHz

แรงดันเอาต์พุตที่ 3dB: 353.5 mV

รูปที่ 3.5 ผลการ simulate วงจรกรองแถบความถี่ในโปรแกรม PSpice

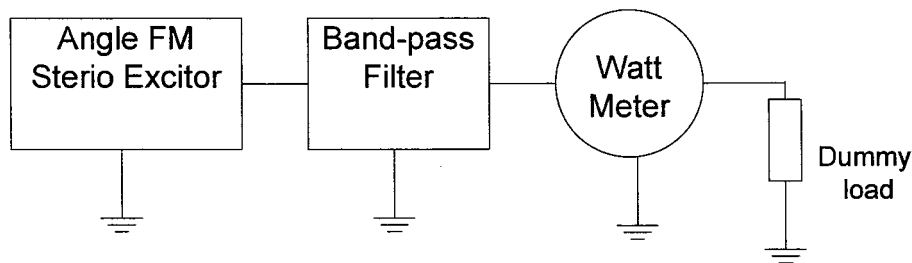
2. ทำการประกอบวงจรตามที่ได้ออกแบบมาตามรูปที่ 3.7(ฉ) โดยให้ค่าที่ใกล้เคียงกับวงจรที่
 ออกแบบไว้ให้มากที่สุดโดยไม่ต้องต่อตัวต้านทาน R_S และ R_L



รูปที่ 3.6 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบโดยปราศจาก R_S และ R_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบการสร้างและทดสอบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



รูปที่ 3.7 ระบบการสร้างและทดสอบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแต่งวงจรมีดังนี้คือ เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอ็ฟเอ็ม วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน วัตต์มิเตอร์ และ ตัวต้านทานวัตต์สูง 50 โอห์ม

เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอ็ฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) จะทำหน้าที่กำเนิดความถี่ตั้งแต่ 96-110 MHz และจะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 2 วัตต์ เท่ากันทุกๆความถี่ (แล้วแต่รุ่นและยี่ห้อ) โดยจะเลือกความถี่ที่จะป้อนให้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบไว้ที่ความถี่ 98.75 MHz กำลังไฟฟ้า 2 วัตต์ เป็นตัวบ่งชี้ในการปรับแต่ง ให้ได้ผลตอบสนอง ออกมาตรงกับที่เราออกแบบไว้ให้มากที่สุด โดยเราจะใช้วัตต์มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานกำลังวัตต์สูง ซึ่งเราต้องการให้กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 98.75 MHz แล้วค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับความถี่จาก เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอ็ฟเอ็มสูงขึ้น หรือต่ำลงซึ่งไม่ใช่ช่วงความถี่ที่ต้องการให้ผ่าน

การปรับแต่งวงจรให้มีผลตอบสนองทางความถี่ เป็นแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบมาให้ได้นั้น ก็มีอยู่สองวิธี คือการปรับค่าความจุของตัวเก็บประจุ และการปรับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดให้มากขึ้นหรือลดลง ให้ใกล้เคียงกับค่าของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบไว้ให้มากที่สุด โครงการนี้ได้ทดลองใช้ ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Trimmer) และขดลวดแกนอากาศซึ่งขดลวดสามารถปรับค่าได้ โดยการเพิ่มหรือลดขนาดต่างๆ ตามสูตรคำนวณค่าเหนี่ยวนำด้านล่างนี้

$$L = \frac{4 \times \pi^2 \times r^2 \times n^2}{l \times 10^9} \quad (3.2)$$

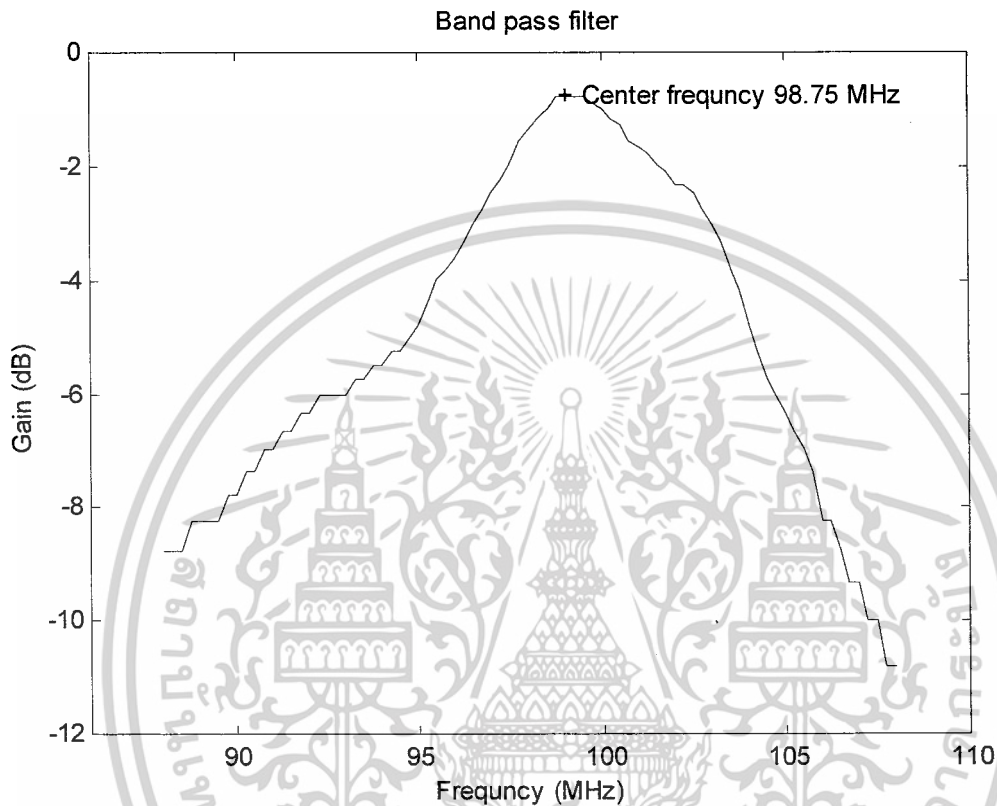
โดยที่

- L : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
- r : ค่ารัศมีของแกน
- n : จำนวนรอบที่พัน
- l : ความยาวของขดลวด

สามารถปรับแต่งได้ในขณะที่มีกำลังไฟฟ้าป้อนให้กับวงจรเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง ของผลตอบสนองทางความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการ เมื่อทำการปรับแต่งให้ได้ตามต้องการแล้วจะเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่

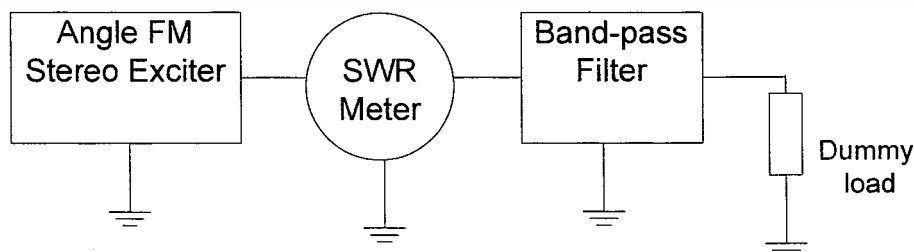
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาทางเอาต์พุตของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่กลาง 98.75MHz เท่านั้น อาจจะมีการสูญเสียบ้าง ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงจากอินพุตและเมื่อปรับความถี่จาก เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ที่ป้อนความถี่ให้กับวงจรให้สูงขึ้นหรือต่ำลงกำลังไฟฟ้าก็จะลดลงไปเรื่อยๆซึ่งจะใกล้เคียงกับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ที่เราออกแบบไว้ แสดงดังกราฟ ที่ทำการพล็อตออกมาด้านล่างนี้



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

4. ทำการวัดค่า SWR ว่ามีค่าเท่าใดควรจะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งจะทำให้วงจรเกิดการแมชต์กับอุปกรณ์อื่นที่ความต้านทาน 50 โอห์ม การวัดค่า SWR จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่สร้างขึ้น สามารถทดลองวัดค่า SWR ได้จากการต่อวงจรตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 3.9 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้า 2 วัตต์ จาก Angle FM Stereo Exciter ที่ความถี่ 98.75 เมกะเฮิรตซ์ให้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ได้กำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุต 1.8 วัตต์โดยมีค่าความต้านทานที่ใช้แทนสายอากาศหรือตัวมีโหลด 50 โอห์ม สามารถวัดค่าได้ เท่ากับ 1.25 จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ ดังนี้

$$P_{in} = 2W, P_{out} = 1.8W, Z_{in} = 50\Omega, SWR = 1.25$$

- การลดทอน (Attenuation) $A(dB) = 10\log(P_{in} / P_{out})$ (3.3)

$$= 10\log(2/1.8)$$

$$= 0.457dB$$

- อัตราการขยาย (Gain) $Gain(dB) = 10\log P_{out} / P_{in}$ (3.4)

$$= 10\log(1.8/2)$$

$$= -0.457dB$$

- สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

$$\Gamma = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (3.5)$$

$$= \frac{1.25 - 1}{1.25 + 1}$$

$$= 0.111$$

- ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

$$R_L(dB) = -20\log|\Gamma| \quad (3.6)$$

$$= -20\log|0.111|$$

$$= 19.1dB$$

- ประสิทธิภาพการสะท้อน (Reflection efficiency)

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (3.7)$$

$$= 1 - |0.111|^2$$

$$= 0.988$$

- ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง (Impedance of Filter)

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (3.8)$$

$$|Z_o| = Z_{in} \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \quad (3.9)$$

$$= 50 \times \frac{1 - 0.111}{1 + 0.111}$$

$$= 40.004\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter: LPF)

หน้าที่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter: LPF) คือ จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่าน และจะไม่ยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ ซึ่งจะช่วยในการลดทอนค่าความถี่ฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกที่ 1 ซึ่งอาจไปรบกวนย่านความถี่อื่น ที่ไม่ใช่ย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ดังนั้นจึงต้องทำการลดทอนสัญญาณในส่วนนี้ให้มีค่าน้อยที่สุดด้วย LPF

การคำนวณ

โครงการนี้จะป็นวงจรกรองแบบอะนาล็อก ตามวิธีของ Chebyshev ซึ่งเป็นแบบ All-Pole Filter LC Low-pass filter สามารถออกแบบโดยตรงจาก ตารางที่เตรียมไว้ในภาคผนวก วงจรกรองที่เหมาะสมอันดับแรกจะต้องเลือกใช้หลักเกณฑ์ที่แน่นอน ที่กำหนดไว้ในภาคผนวก แล้วจึงค่อยทำการสเกลค่าความถี่ค่าอิมพีแดนซ์ ให้ได้ตามที่ต้องการ

วิธีทำ

กำหนดให้ : LC Low-pass filter

3dB ที่ 108.75 MHz

60dB ที่ 197.5 MHz

$$R_S = R_L = 50 \Omega$$

เป็นผลให้ : (ก) เพื่อที่จะทำการ normalize low-pass จึงต้องทำการคำนวณ A_s

$$A_s = \frac{f_s}{f_c} = \frac{197.50 \text{ MHz}}{108.00 \text{ MHz}} = 1.816 \quad (3.10)$$

(ข) เลือก normalize filter จากกราฟในภาคผนวก พิจารณาจากกราฟแล้วว่าต้องใช้ $n = 7$ ที่ 0.01-dB Chebyshev จึงจะได้คุณสมบัติตามที่กำหนด

(ค) ในตารางที่ 12-28 ได้บรรจุค่าของส่วนต่างๆ ไว้สำหรับการ normalize ที่ 0.01-dB Chebyshev LC filter ได้จัดไว้ตามลำดับ จาก $n = 2$ ถึง $n = 10$ ซึ่งวงจรที่ต้องใช้ตรงกับที่ $n = 7$ ซึ่งมีค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายและภาระ เท่ากันที่ 1Ω ($R_S = R_L = 1 \Omega$)

(ง) ทำการ denormalize low-pass filter โดยใช้ $Z = 50 \Omega$ และ frequency-scaling factor (FSF) = $2\pi f_c$

$$R_S = R_L = 50 \Omega$$

$$FSF = 2\pi f_c = 2\pi \times 108 \times 10^6 = 678.584 \times 10^6 \quad (3.11)$$

$$L'_1 = L'_7 = \frac{L \times Z}{FSF} = \frac{0.9127 \times 50}{678.584 \times 10^6} = 67.25 \text{ nH} \quad (3.12)$$

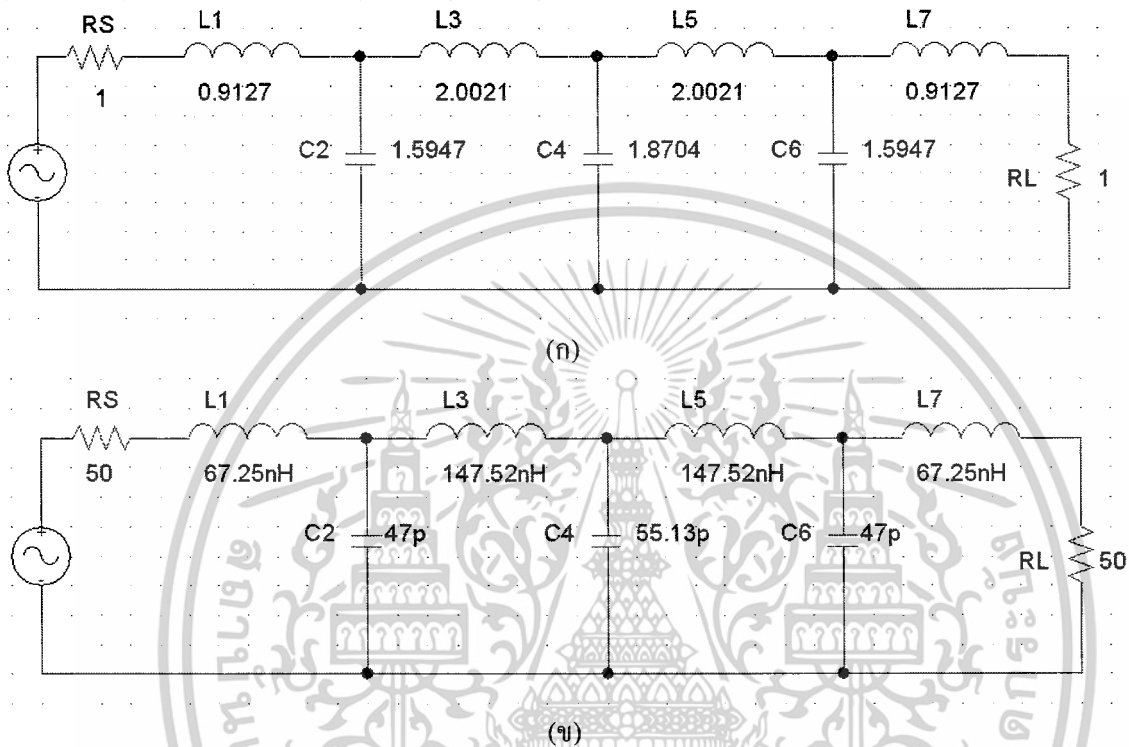
$$L'_3 = L'_5 = 147.52 \text{ nH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C'_2 = C'_6 = \frac{C}{FSF \times Z} = \frac{1.5947}{678.584 \times 10^6 \times 50} = 47.00 \text{ pF} \quad (3.13)$$

$$C'_4 = 55.13 \text{ pF}$$

ผลที่ได้จากการคำนวณของวงจรกรอง แสดงดังรูปที่ 3.2(ข)



รูปที่ 3.10 ผลที่ได้จากการคำนวณ, (ก) normalize filter จากตารางที่ 12-27, (ข) สเกลค่าความถี่และอิมพีแดนซ์วงจรกรอง

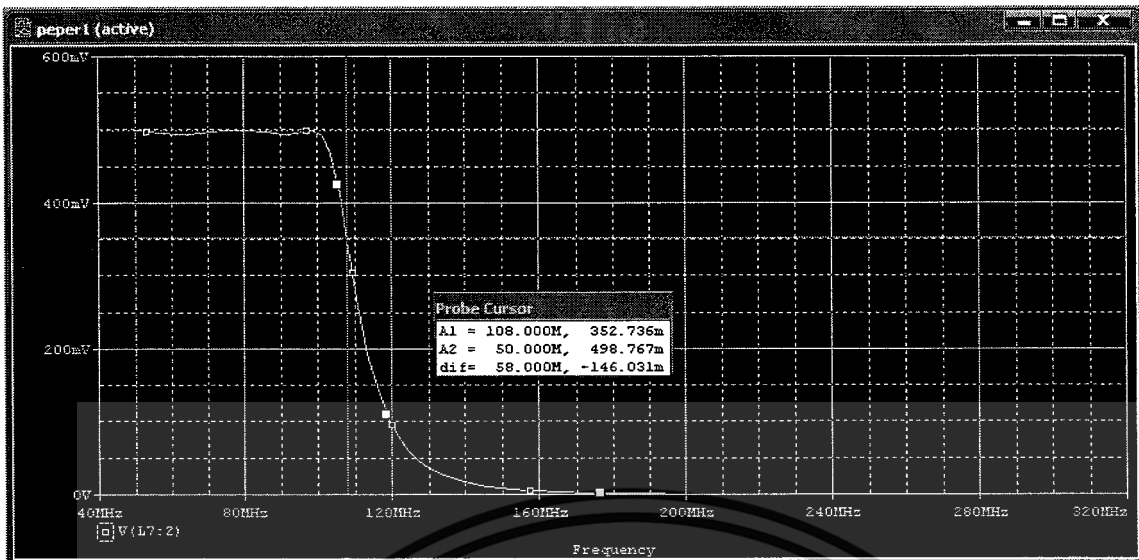
Normalize low-pass filter ที่ใช้ในการออกแบบที่แสดงในตารางนั้น จะมีแหล่งจ่ายกระแสเป็นอินพุตต่อแบบขนานอยู่กับตัวต้านทาน 1Ω ซึ่งสมมูลกับวงจรที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันเป็นอินพุตที่มีตัวต้านทานอนุกรมอยู่ ผู้อ่านสามารถกลับไปศึกษาทฤษฎีของ เทวินิน (Thevenin's theorem)

การสร้าง

ในขั้นตอนการสร้างนี้เมื่อทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเสร็จสมบูรณ์ จะรู้ว่าสิ่งที่ทำมานั้นถูกต้องหรือไม่ก็ต้องทำการ simulate ดูในโปรแกรมก่อนว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจหรือไม่ แล้วจึงค่อยประกอบวงจรตามค่าอุปกรณ์ที่ได้ให้ครบถ้วน แล้วจึงจะนำฮาร์ดแวร์ที่ได้นั้นนำมาปรับแต่งให้ได้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ต้องการ โดยเครื่องมือปรับแต่งต่างๆ ดังจะได้กล่าวต่อไป

1. ทดสอบวงจรฟิลเตอร์ด้วยการ simulate ในโปรแกรม PSpice

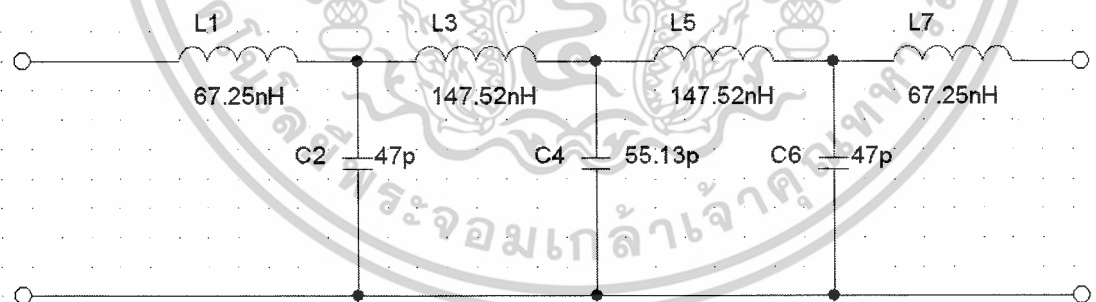
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความถี่คัตออฟ: 108.00MHz แรงดันเอาต์พุตสูงสุด: 500 mV
 3dB ที่ความถี่: 108.00 MHz แรงดันเอาต์พุตที่ 3dB: 353.5 mV
 60dB ที่ความถี่: 197.50 MHz

รูปที่ 3.11 ผลการ simulate วงจรฟิลเตอร์ใน โปรแกรม PSpice

2. ทำการต่อวงจรฟิลเตอร์ให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับวงจรที่ออกแบบไว้ให้มากที่สุดโดยไม่ต้องต่อตัวต้านทาน R_S และ R_L



รูปที่ 3.12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบโดยปราศจาก R_S และ R_L

เทคนิคการปรับแต่งวงจรให้ได้ค่าใกล้เคียงกับวงจรที่ออกแบบไว้ คือ ชั้นแรกจะกล่าวถึงตัวเก็บประจุ (Capacitor: C) ก่อน ว่าถ้านำ C มาต่ออนุกรมกันจะทำให้ได้ค่าความจุเป็น

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (3.14)$$

และถ้านำ C มาต่อขนานกันจะทำให้ได้ค่าความจุเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (3.15)$$

ในส่วนของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor: L) ถ้านำ L มาต่ออนุกรมกันจะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots \quad (3.16)$$

และถ้านำ L มาต่อขนานกันก็จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots \quad (3.17)$$

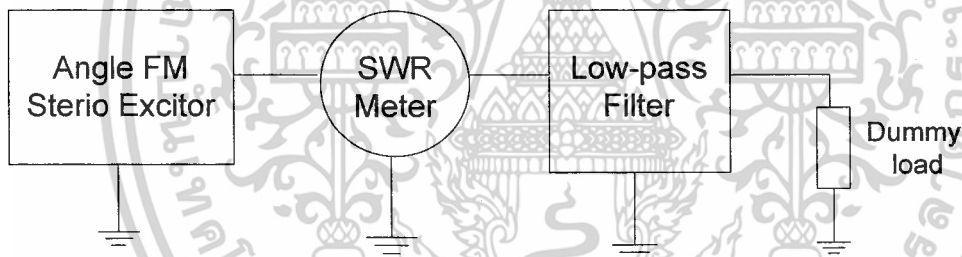
สำหรับ L ก่อนที่จะใช้พื้นฐานการคำนวณนี้ได้ ต้องทำการสังเคราะห์สร้าง L ขึ้นมาให้ได้ก่อนโดยการใช้สูตรในการพันขดลวด (coil) ตามสูตร

$$L = \frac{4 \times \pi^2 \times r^2 \times n^2}{l \times 10^9} \quad (3.18)$$

ให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับค่า L ในวงจรที่ออกแบบไว้ให้มากที่สุด ถ้าหากค่า L ที่คำนวณได้มีค่ามากซึ่งจะทำให้ขดลวดมีขนาดใหญ่ ก็แก้ปัญหาโดยการพันขดลวดหลายๆค่าแล้วนำมาต่ออนุกรมกัน และยังมีเทคนิคการปรับค่า L เช่น ยึดออกค่า L ลด หดเข้าค่า L เพิ่ม เป็นต้น สามารถสังเกตได้จากสูตรการพัน ขดลวด

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดซึ่งจะนำเอาพื้นฐานนี้มาใช้ในการทำให้ค่าความจุ และค่าความเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าใกล้เคียงกับวงจรที่ออกแบบไว้ให้มากที่สุด

3. ประกอบวงจรดังรูป



รูปที่ 3.13 ระบบการการสร้างวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแต่งวงจร LPF มีดังนี้คือ เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR meter) และ ดัมมี่โหลด (Dummy load)

4. ทำการปรับแต่งวงจรให้ได้ตามข้อกำหนดที่ออกแบบมา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ในเครื่องส่งวิทยุชุมชนจะทำหน้าที่ในการกำจัดความถี่ฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกที่ 1 (Fundamental Wave) ออกไปเพื่อไม่ให้ไปรบกวนย่านความถี่อื่น โดยวิธีการปรับแต่งเป็นดังนี้

นำวงจรรองตามรูปที่ 3.4 มาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบตามรูปที่ 3.5 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ป้อนความถี่และกำลังไฟฟ้าจาก เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ให้กับระบบแล้วทำการปรับแต่งค่าความจุและหรือค่าความเหนี่ยวนำในวงจร(ใน โครงการนี้จะทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำ โดยคงค่าความจุไว้) ให้มีค่าเป็นดังต่อไปนี้คือ ที่ความถี่ต้น 88.00 MHz ที่ความถี่ส่ง 98.75 MHz และที่ความถี่ปลาย 108.00 MHz ของย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ต้องปรับค่าอุปกรณ์ในวงจร แล้วให้ได้ค่า SWR มีค่าเข้าใกล้ 1 ให้มากที่สุด ที่ทำเช่นนี้ก็เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ (Matching Impedance) กับอุปกรณ์ทุกส่วนในระบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็มเท่านั้น ส่วนในย่านความถี่อื่นๆที่นอกเหนือจากนี้ (ที่ไม่ใช่ย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม 88-108 MHz) เราจะไม่คำนึงถึงการแมตช์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่า SWR ควรมากกว่า 1 มากๆ ถ้าปรับค่าอุปกรณ์ในวงจรฟิลเตอร์ให้ได้ดังนี้แล้ว จึงจะทำให้วงจรองความถี่ต่ำผ่านมีส่วนช่วยลดทอนสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกอื่นๆ ได้ ซึ่งสังเกตจากการ simulate ได้ว่าช่วงตอบสนองทางความถี่ที่ให้ผ่านจะครอบคลุมทั้งย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ส่วนในย่านความถี่ที่สูงกว่านี้จะยอมให้ผ่านน้อยมากหรือแทบจะไม่ผ่านเลยทีเดียว โดยการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องส่งวิทยุชุมชน โดยจะต่อแบบอันดับไว้ทางด้านหลังของวงจรขยายกำลังวิทยุ (RF Power amplifier) ก่อนส่งออกสู่อากาศโดยสายอากาศดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะสามารถกำจัดความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบทั้งหมดของเครื่องส่งวิทยุชุมชน

5. จากการวัดค่า SWR จากวงจรองความถี่ต่ำผ่านที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าได้ เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้า 2 วัตต์ จาก Angle FM Stereo Exciter ที่ความถี่ 98.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ให้กับวงจรองความถี่ต่ำผ่าน ได้กำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุต 2 วัตต์ โดยมีค่าความต้านทานที่ใช้แทนสายอากาศหรือดัมมีโหลด 50 โอห์ม สามารถวัดค่าได้ เท่ากับ 1 จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ดังนี้

$$P_{in} = 2W, P_{out} = 2W, Z_{in} = 50\Omega, SWR = 1$$

$$\begin{aligned} \text{- การลดทอน (Attenuation)} \quad A(dB) &= 10\log(P_{in} / P_{out}) \\ &= 10\log(2/2) \\ &= 0 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \text{- อัตราการขยาย (Gain)} \quad Gain(dB) &= 10\log(P_{out} / P_{in}) \\ &= 10\log(2/2) \\ &= 0 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \text{- สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)} \\ \Gamma &= \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \\ &= \frac{1 - 1}{1 + 1} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

- ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

$$\begin{aligned} R_L(dB) &= -20\log|\Gamma| \\ &= -20\log|0| \\ &= \infty \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.22)$$

- ประสิทธิภาพการสะท้อน (Reflection efficiency)

$$\begin{aligned} e_r &= 1 - |\Gamma|^2 \\ &= 1 - |0|^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

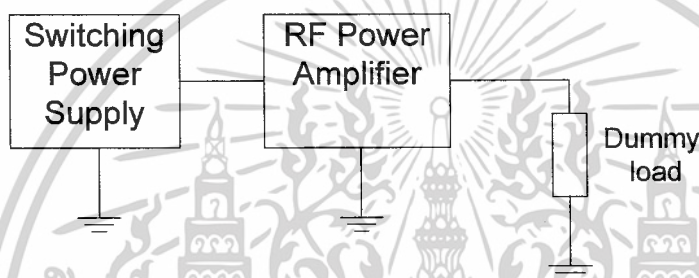
- ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} Z_o &= Z_{in} \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \quad (3.25) \\ &= 50 \times \frac{1 - 0}{1 + 0} \\ &= 50 \Omega \end{aligned}$$

3.3 วงจรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)

ต่อวงจรเพื่อทำการปรับแต่ง วงจรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ 30 วัตต์



รูปที่ 3.14 การประกอบวงจรเพื่อทดสอบวงจรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุ

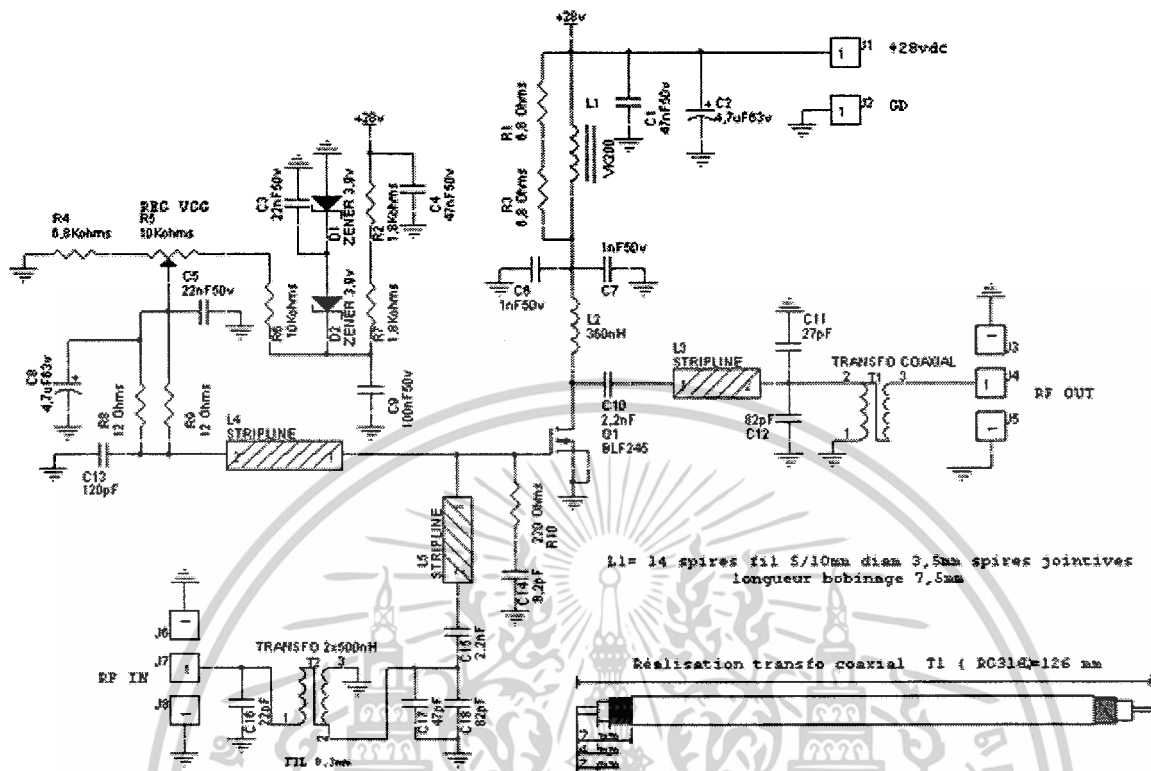
เนื่องจากทรานซิสเตอร์ Mosfet BLF245 สามารถตอบสนองการทำงานได้ดีในย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (88-108MHz) จากโครงสร้างวัสดุออกแบบ Mosfet มาจากโรงงานจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้สร้างวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุเอฟเอ็ม กำลังส่งประมาณ 10-60 วัตต์จากการทดลอง RF power amplifier 88-108MHz ที่กำลังส่ง 30W ในโครงการนี้จะใช้วงจรทำงานแบบคลาส AB โดยใช้ทรานซิสเตอร์ Mosfet BLF245 โดยประกอบวงจรต้นแบบจากคู่มือของ Philip และหาอุปกรณ์ตามข้อกำหนด

การประกอบที่ควรทราบในการออกแบบวงจรเบื้องต้นเมื่อประกอบวงจรบนแผ่น PCB เรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องจัดกระแส VGS ทาง Gate ของ Mosfet เนื่องจากวงจรเป็นการจัดทำงานแบบคลาส AB ข้อที่ควรทราบเบื้องต้นเพื่อให้สามารถจัดการทำงานของบรอดได้เหมาะสม ทำให้ตัว Mosfet ทำงานตามข้อกำหนดและไม่พังเสียหายก่อนเป็นดังนี้ ค่าแรงดัน และกระแส ที่ใช้ขับ Mosfet BLF245 ให้ทำงานที่คลาส AB โดยดูได้จากคู่มือการใช้ (Data sheet) ที่เตรียมไว้ให้แล้วในภาคผนวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

1. ID (Drain Current) ตามคู่มือของ Philip Mosfet BLF245 ที่ 100MHz (ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้คือ 98.75MHz) กระแส ID drain 10mA

2. VGs (Gate source Voltage) จุดที่จะทำให้ Mosfet เสียหายตามโศกของโรงงานที่ให้มีบนตัวอุปกรณ์ จากการสังเกตจะเป็นโศก K จะอยู่ที่ 3V สูงสุด ดังนั้นห้ามให้แรงดัน VGs มีค่าเกิน 3V เป็นอันขาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปวงจรการทดลอง RF Power Amplifier สามารถแสดงได้ตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 3.15 วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ

หมายเหตุ : ข้อที่ควรทราบเบื้องต้นเพื่อให้สามารถจัดการทำงานของบรอดได้เหมาะสม ทำให้ตัวมอสเฟตทำงานตาม ข้อกำหนดและ ไม่พึงเสียหายก่อน จุดที่จะทำให้มอสเฟตเสียหายตาม ใค้ัด โรงงาน สามารถสังเกตดูบนตัวมอสเฟตซึ่งใช้ ใค้ัด K อยู่ที่แรงดัน 3V สูงสุด

3.4 ดัมมี่โหลด (Dummy load)

ดัมมี่โหลดคืออุปกรณ์ที่ใช้แทนสายอากาศ ป้องกันไม่ให้กำลังคลื่นวิทยุแพร่ออกสู่อากาศ กล่าวคือ ตัวที่เอาไว้หลอกว่าเป็นสายอากาศนั่นเอง ลักษณะของดัมมี่โหลดก็คือจะเป็นตัวต้านทานที่ทนกำลังไฟฟ้าได้สูง ในการใช้งานจำเป็นต้องคิดไว้บนแผ่นระบายความร้อนที่มีขนาดใหญ่พอสมควรทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่า ดัมมี่โหลดที่ใช้งานทนกำลังไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงไรถ้าทนกำลังได้มากขนาดของแผ่นระบายความร้อน ก็จะยิ่งใหญ่มากตามไปด้วย แต่มีข้อแม้ว่าดัมมี่โหลดที่นำมาใช้นั้นจะต้องมีค่าการทนกำลังไฟฟ้ามากกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะเข้ามาสู่ดัมมี่โหลด มิเช่นนั้นจะทำให้ดัมมี่โหลดพัง ทำไมถึงต้องเป็นเช่นนั้น ก็เนื่องมาจากดัมมี่โหลดจะทำการแปลงกำลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นกำลังงานความร้อนแล้วระบายลงสู่แผ่นระบายความร้อนนั่นเองเป็นผลให้กำลังคลื่นวิทยุไม่สามารถที่จะแพร่ออกสู่อากาศได้ เนื่องจากจะถูกดัมมี่โหลดดูดกลืนกำลังงานไปจนหมดแล้วนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ต้องการ : ความต้านทาน 50Ω ที่ทนกำลังคลื่นวิทยุได้ $200W$

ใช้ตัวต้านทาน 100Ω ที่ทนกำลังคลื่นวิทยุได้ $100 W$ จำนวน 2 ตัว

เป็นผลให้ : นำตัวต้านทานมาทำการต่อขนานกันโดยค่าความต้านทานและค่าทนกำลังไฟฟ้าที่ได้จะเป็น

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100}$$

$$R = 50\Omega$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (3.27)$$

$$P = 100 + 100 = 200 \text{ W}$$

การสร้าง

ในโครงการนี้จะใช้ตัวต้านทาน 100Ω ที่ทนกำลังคลื่นวิทยุได้ $100W$ สองตัวต่อแบบขนานกันจะได้คัมมิโพลต์ที่มีค่าความต้านทาน 50Ω ทนกำลังคลื่นวิทยุได้ $200W$ พอได้สร้างได้ตั้งรูปด้านล่างนี้

3.5 สายอากาศเวอร์ติคัลกราวด์เพลน (Vertical ground plane Antenna)

การคำนวณ

สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นได้จากสูตร

$$\lambda = c / f \text{ เมตร} \quad (3.28)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น (เมตร)

c คือความเร็วแสง (300 ล้านเมตรต่อวินาที)

f คือความถี่ที่ใช้งาน (Hz)

สูตรนี้ใช้คำนวณในกรณีที่คลื่นเดินทางในสายอากาศ (Free space) ความจริงของสายอากาศจะไม่เท่ากับในสายอากาศแต่ขึ้นอยู่กับความหนาของตัวนำที่นำมาเป็นสายอากาศและชนิดของตัวนำ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวนำช้ากว่าในสายอากาศและค่าความต้านทานของโลหะ (Radiation resistance) ในทางปฏิบัติจึงทำให้สั้นกว่าในอากาศประมาณ 6 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการ : หาค่าความยาวทางฟิสิกส์ของสายอากาศแบบเวอร์ติคอลลกราวด์ เพลน ใช้งานที่

ความถี่ที่ 98.75 MHz

เป็นผลให้ : จากสูตร

$$\lambda = c / f \quad (3.29)$$

$$= 3 \times 10^8 / 98.75 \times 10^6$$

$$= 3.038 \text{ เมตร}$$

$$\lambda / 4 = 3.038 / 4 \quad (3.30)$$

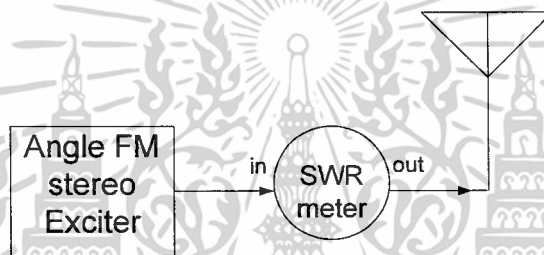
$$= 0.76 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาวทางฟิสิกส์} = 0.76 \times 0.94 \quad (3.31)$$

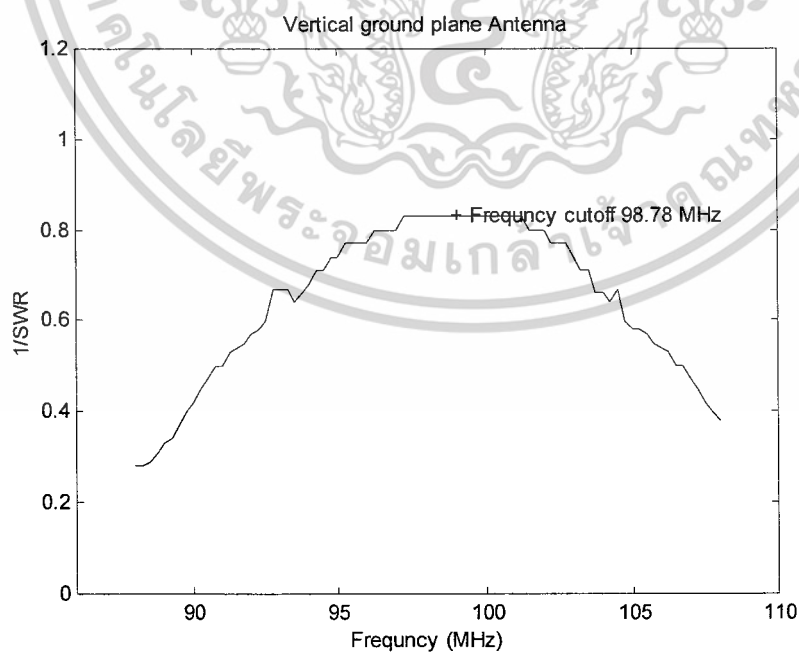
$$= 0.714 \text{ เมตร}$$

การสร้าง

ประกอบวงจรดังรูปข้างล่างนี้

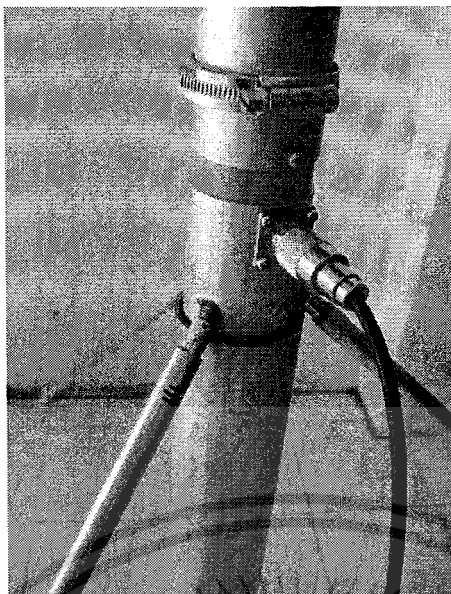


รูปที่ 3.16 การสร้างสายอากาศสายอากาศเวอร์ติคอลลกราวด์เพลน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 3.17 (ก) ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

(ข) รูปร่างของสายอากาศที่สร้างได้

ป้อนความถี่ที่ 98.75 MHz ที่มีค่ากำลังไฟฟ้า 3 วัตต์ จาก Angle FM Stereo Exciter ให้กับสายอากาศ Vertical ground plane ที่ได้สร้างไว้เรียบร้อยแล้ว โดยใช้ เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR meter) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศให้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด เพื่อที่จะทำให้สายอากาศเกิดการแมตซ์กับอุปกรณ์อื่นในระบบ ทั้งนี้เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

หมายเหตุ : ในทางทฤษฎี ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะเป็นดังนี้คือ $1 < SWR < \infty$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สามารถยอมรับได้จะไม่เกิน 1.5 กล่าวคือ $1 < SWR < 1.5$ จึงจะทำให้สายอากาศแมตซ์กับอุปกรณ์อื่นๆ และทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter)



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter)

เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ในย่านความถี่ 86-110 MHz โดยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกเอาต์พุตเท่ากันหมดทุกความถี่

2. เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR meter) และ เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter)

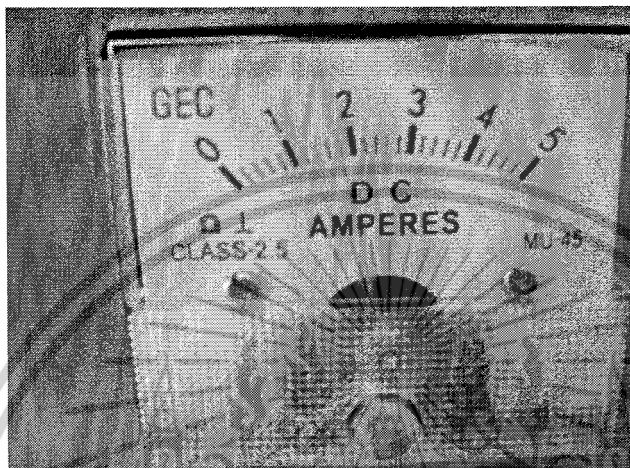


รูปที่ 4.2 เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR meter) และ เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR meter) และ เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) โดยเครื่องมือวัดทั้ง สองนี้ จะใช้ในการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio) และวัดค่ากำลังไฟฟ้า (Power) ตามลำดับ

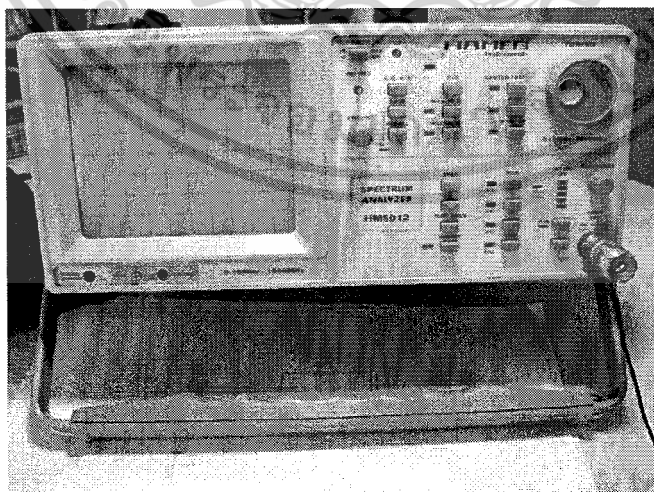
3. แอมแปร์มิเตอร์ (Ampere meter)



รูปที่ 4.3 แอมแปร์มิเตอร์ (Ampere meter)

แอมแปร์มิเตอร์ (Ampere meter) หรือเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า ใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในวงจร

4. เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer)

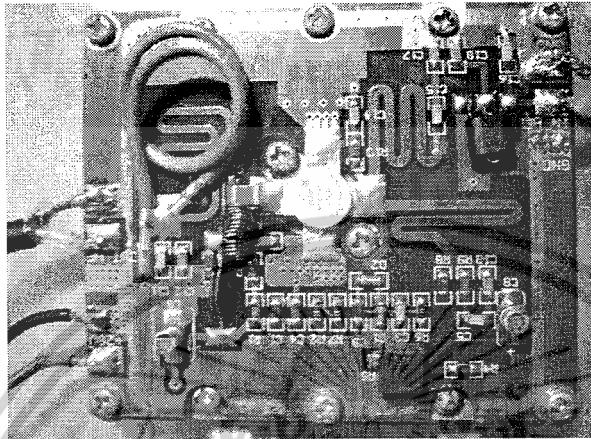


รูปที่ 4.4 เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) เป็นเครื่องที่ใช้ในการวัดค่าสเปกตรัมความถี่ เพื่อที่จะดูองค์ประกอบต่างๆทางด้านความถี่

5. วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)



รูปที่ 4.5 วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)

วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ จะใช้ในการนำไปขยายคลื่นวิทยุก่อนแพร่คลื่นออกสู่อากาศเพื่อให้ได้กำลังส่งตามต้องการ

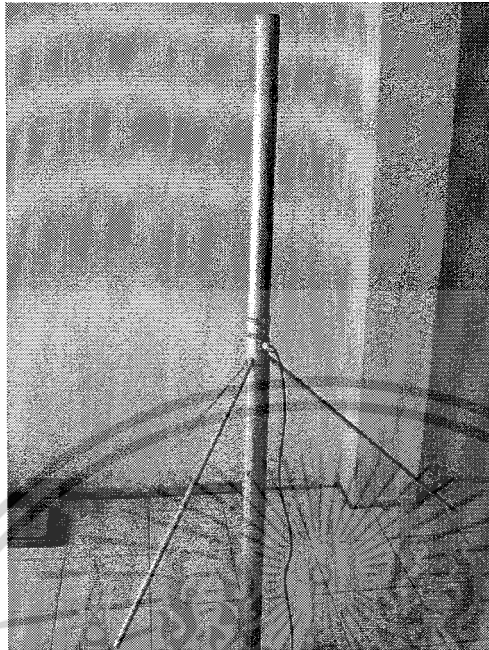
6. ดัมมี่โหลด (Dummy Load)



รูปที่ 4.6 ดัมมี่โหลด(Dummy Load)

ดัมมี่โหลด (Dummy Load) เป็นตัวต้านทานที่ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงจะใช้แทนสายอากาศ ทำงานโดยการแปลงกำลังไฟที่ได้รับมาให้กลายเป็นความร้อนระบายลงสู่แผ่นระบายความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สายอากาศแบบเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน (Vertical ground plane Antenna)



รูปที่ 4.7 สายอากาศแบบเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน (Vertical ground plane Antenna)

สายอากาศแบบเวอร์ติคอลล กราวด์ เพลน (Vertical ground plane Antenna) ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นออกสู่อากาศ โดยจะมีโพลาไรซ์แนวตั้ง

8. สายนำสัญญาณ (Transmission line)

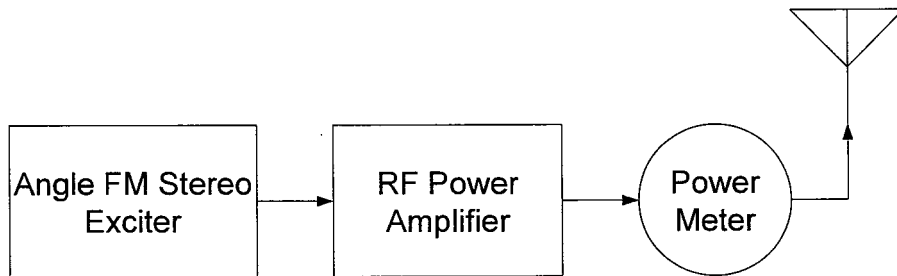


รูปที่ 4.8 สายนำสัญญาณ RG-58

สายนำสัญญาณ RG-58 เป็นสายนำสัญญาณที่มีค่าความต้านทาน 50 โอห์ม ใช้นำสัญญาณไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดสัญญาณวงจรรขยายกำลังคลื่นวิทยุ (RF Power Amplifier)

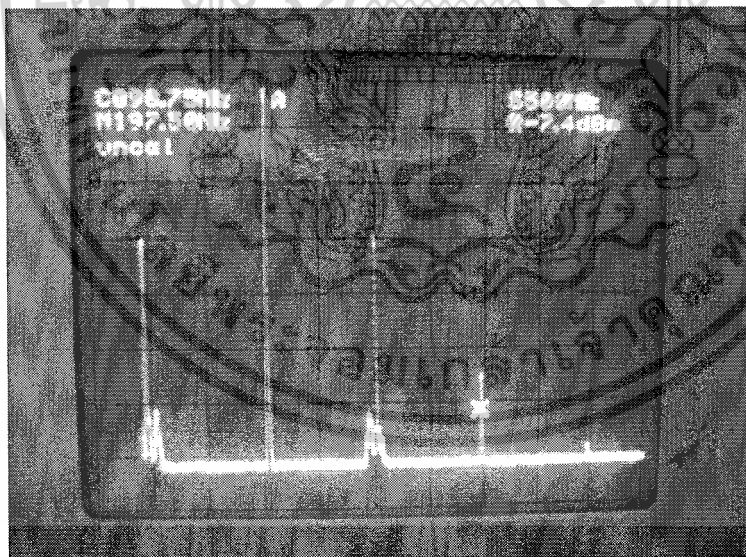
1. ประกอบวงจรการทดลองดังรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 4.9 แสดงการต่อวัดสัญญาณ RF Power Amplifier

เมื่อประกอบวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.9 เรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองโดยการป้อนความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ให้กับวงจรรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ (RF Power Amplifier 30Watts) แล้วใช้เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรรขยายกำลังคลื่นวิทยุ ก่อนแพร่กระจายออกสู่อากาศโดยสายอากาศ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้คือ 30 วัตต์ นั่นคือการบ่งบอกว่า วงจรรขยายกำลังคลื่นวิทยุทำงานตามต้องการ และเต็มประสิทธิภาพ

2. ใช้เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) วัดระดับความแรงของสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10



ฮาร์โมนิกที่ 1 ที่ความถี่ 98.78 MHz [dB] -28.6 dBm

ฮาร์โมนิกที่ 2 ที่ความถี่ 197.50 MHz [dB] -45.8 dBm

ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความถี่ 296.25MHz [dB] -61.1 dBm

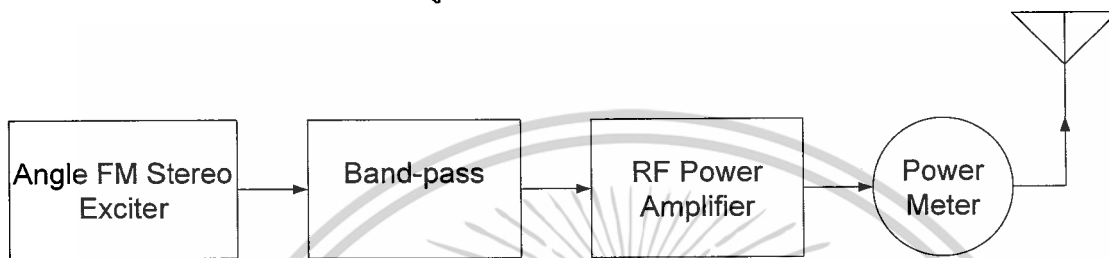
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่วัดได้จาก Spectrum Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

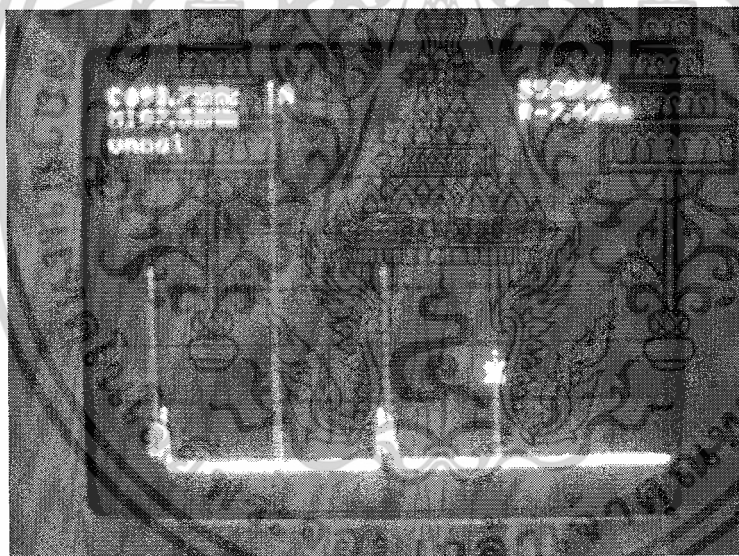
จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) สามารถสังเกตเห็นได้ว่า เกิด คลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 และคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้น ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ของระบบ และจะต้องทำการกำจัดหรือลดทอนความถี่ฮาร์โมนิกดังกล่าว ให้ลดลงให้มากที่สุด หรือหมดไป

4.3 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

1. ประกอบวงจรการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1 ที่ความถี่ 98.78 MHz	[dB]	-34.2 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 ที่ความถี่ 197.50 MHz	[dB]	-48.7 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความถี่ 296.25 MHz	[dB]	-75.4 dBm

รูปที่ 4.12 สัญญาณที่วัดได้จาก Spectrum Analyzer

เมื่อประกอบวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.11 เรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองโดยการป้อนความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ให้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(Band-pass) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

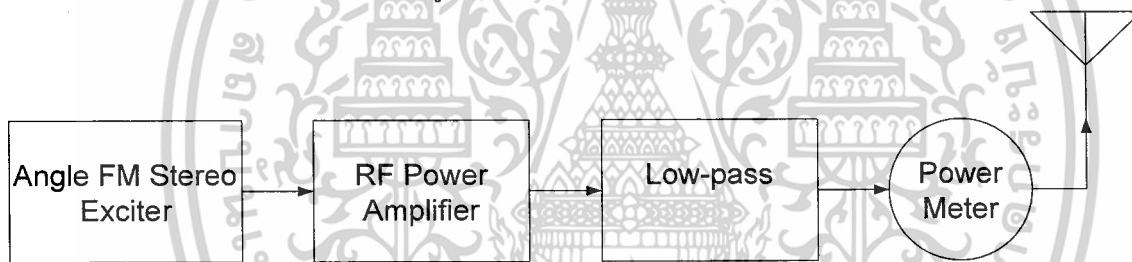
Filter) ที่เพิ่มเข้ามา ต่อแบบอนุกรมกับ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ (RF Power Amplifier 30Watts) แล้วใช้เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ ก่อนแพร่กระจายออกสู่อากาศโดยสายอากาศ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้คือ 28 วัตต์ นั่นคือการบ่งบอกว่า วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุทำงานได้ยังไม่เต็มประสิทธิภาพสาเหตุเนื่องมาจากการลดทอน ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟทั้งหมด ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงมาประมาณ 2 วัตต์

2. ใช้เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) วัดระดับความแรงของสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ แสดงไว้ในรูปที่ 4.12

จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) สามารถสังเกตเห็นได้ว่า เกิด คลื่นความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 และคลื่นความถี่ฮาร์มอนิกที่ 3 ขึ้น เหมือนเดิม เพราะวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ต่อเพิ่มเข้ามาทางด้านอินพุตของ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ ไม่ได้ช่วยในการลดทอนความถี่ฮาร์มอนิก เพราะต่ออยู่ก่อนการขยายของวงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ แต่จะช่วยในการป้องกันความถี่ที่อาจจะเบี่ยงเบนไปรบกวนคลื่นความถี่ข้างเคียงได้

4.4 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

1. ประกอบวงจรทดลองดังรูปด้านล่างนี้

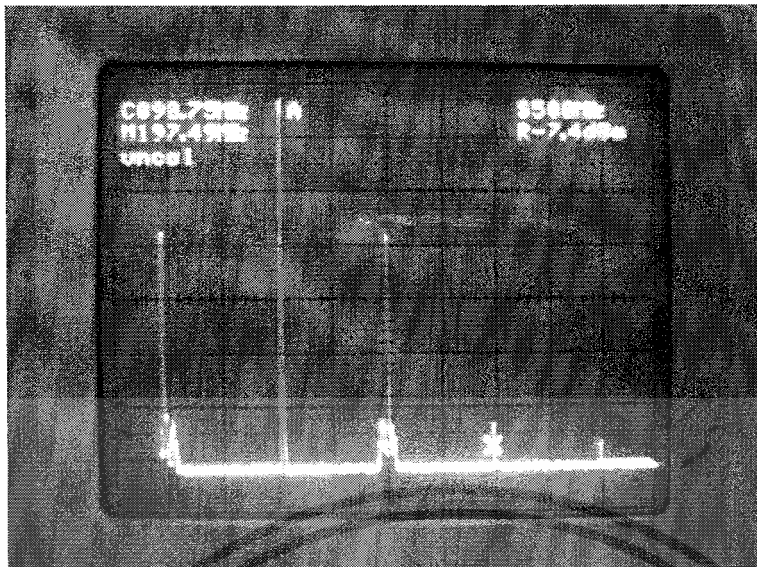


รูปที่ 4.13 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อประกอบวงจรทดลองตามรูปที่ 4.13 เรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองโดยการป้อนความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ให้กับ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ (RF Power Amplifier 30Watts) แล้วนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) เพิ่มเข้ามาต่อแบบอนุกรมไว้ทางด้านเอาต์พุตของ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ ใช้เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนแพร่กระจายออกสู่อากาศโดยสายอากาศ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้คือ 27 วัตต์ นั่นคือการบ่งบอกว่า วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุทำงานได้ยังไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควรสาเหตุเนื่องมาจากการลดทอน ของวงจรกรองวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟทั้งหมด ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงมาประมาณ 3 วัตต์

2. ใช้เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) วัดระดับความแรงของสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ แสดงไว้ในรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



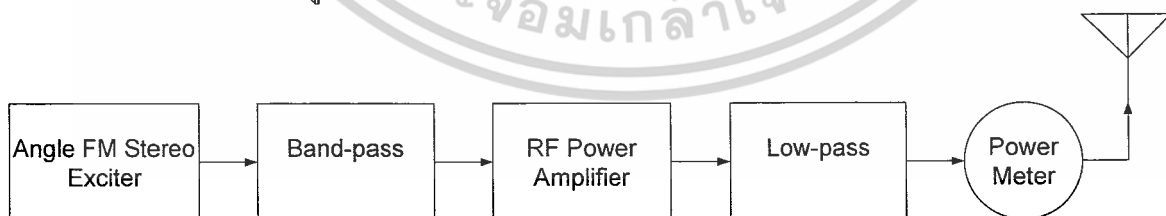
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1 ที่ความถี่ 98.78 MHz	[dB]	-28.6 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 ที่ความถี่ 197.50 MHz	[dB]	-68.6 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความถี่ 296.25 MHz	[dB]	-75.1 dBm

รูปที่ 4.14 สัญญาณ Spectrum Analyzer

จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) สามารถสังเกตเห็นได้ว่า คลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 มีแอมพลิจูดลดน้อยลง เนื่องด้วยเกิดจากผลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งมีไว้เพื่อลดทอนคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ไม่ใช่คลื่นมูลฐาน โดยเฉพาะ เพราะฉะนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะต่อไว้หลังของวงจรขยายคลื่นความถี่วิทยุ เสมอ

4.5 วัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

1. ประกอบวงจรดังรูปที่ 4.15



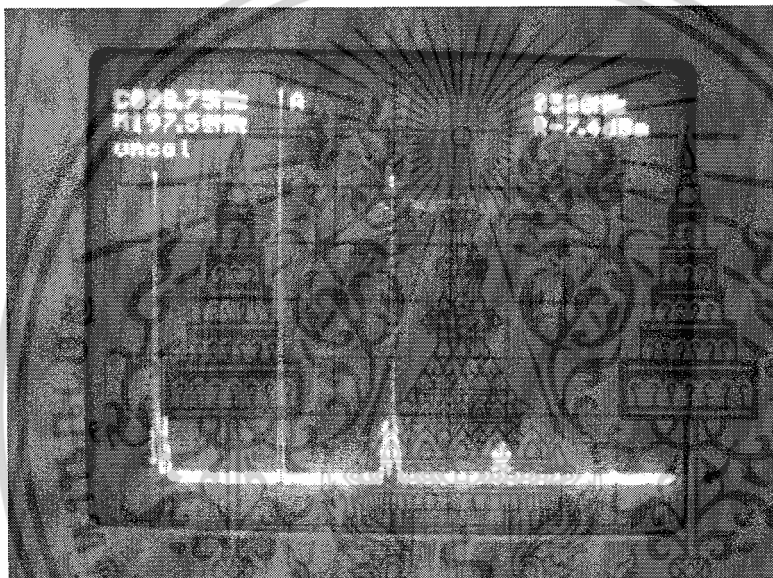
รูปที่ 4.15 แสดงการต่อวัดสัญญาณเมื่อต่อวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อประกอบวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.13 เรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองโดยการป้อนความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ให้กับให้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Band-pass Filter) ที่เพิ่มเข้ามา ต่อแบบอนุกรมไว้ทางด้านอินพุตของ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ (RF Power Amplifier 30Watts) แล้วนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) เพิ่มเข้ามาต่อแบบอนุกรมไว้ทางด้านเอาต์พุตของ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ 30 วัตต์ ใช้เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนแพร่กระจายออกสู่อากาศโดยสายอากาศ ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัด ได้คือ 24 วัตต์ นั่นคือการบ่งบอกว่า วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุทำงานได้ยังไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควรสาเหตุเนื่องมาจากการลดทอน ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟทั้งหมด ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงมาประมาณ 6 วัตต์

2. ใช้เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) วัดระดับความแรงของสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ แสดงไว้ในรูปที่ 4.16



ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1	ที่ความถี่ 98.78 MHz	[dB]	-27.2 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2	ที่ความถี่ 197.50 MHz	[dB]	-68.7 dBm
ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3	ที่ความถี่ 296.25 MHz	[dB]	-77.5 dBm

รูปที่ 4.16 สัญญาณ Spectrum Analyzer

จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) สามารถสังเกตเห็นได้ว่า คลื่นความถี่ฮาร์โมนิก ที่ไม่ใช่คลื่นความถี่มูลฐาน (Fundamental wave) ที่เกิดขึ้นจากระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ของวงจขยายกำลังคลื่นวิทยุ มีแอมพลิจูดลดลงเล็กน้อยมาก ซึ่งเป็นผลมาจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ช่วยลดทอนคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกดังกล่าวลงนั่นเอง ซึ่งจะคล้ายกับรูปสัญญาณที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4 มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้วงจรกรองความถี่ที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้กับเครื่องส่งวิทยุชุมชน จะเห็นว่าวงจรกรองแถบความถี่ที่ต้องการออกแบบให้แคบมากๆ โดยมีข้อกำหนดว่าต้องมีช่วงให้ผ่านของความถี่มีค่าประมาณ 200 kHz ซึ่งในโครงการนี้ได้สร้างวงจรกรองแถบความถี่ให้แคบมากที่สุดซึ่งในตอนนี้ได้เพียงประมาณ 5 MHz เท่านั้น แต่ในปัจจุบัน ได้มีเครื่องกำเนิดความถี่ย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ที่มีแบนด์วิธที่แคบมากอยู่แล้ว ดังนั้นวงจรกรองแถบความถี่ ที่ได้ออกแบบและทดลองมานั้นก็มีผลช่วยลดความถี่เบี่ยงเบนที่จะไปแทรกสอดคลื่นความถี่วิทยุข้างเคียงได้ ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำที่ทำการออกแบบให้ใช้ในการช่วยลดทอนกำลังของคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ไม่ใช่ฮาร์โมนิกที่ 1 หรือ คลื่นมูลฐาน (fundamental wave) จะสามารถลดทอนกำลังของคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 และฮาร์โมนิกถัดไปได้โดยมีประสิทธิภาพ

จากบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า เครื่องวัดสเปกตรัมความถี่ สามารถวัดสเปกตรัมความถี่ที่ออกมาทางเอาต์พุตของวงจรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม เมื่อใส่เฉพาะวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งมีแบนด์วิธอยู่ที่ 5 MHz ต่อแบบอนุกรมไว้ทางด้านอินพุตของ วงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ ซึ่งเมื่อสัญญาณความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Angle FM Stereo Exciter) ซึ่งมีแบนด์วิธที่แคบมากอยู่แล้วป้อนเข้าไป ผลที่ออกมาทางด้านเอาต์พุตของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเลย

เมื่อใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่ออนุกรมไว้ที่ด้านหลังของวงจรขยายกำลังคลื่นวิทยุ เข้าไปอีก ผลที่ได้จากการสังเกตคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถเข้าไปช่วยในเรื่องของการลดทอนกำลังของคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกที่ไม่ใช่คลื่นมูลฐาน ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดขึ้นที่เห็นได้ชัดเจนคือค่าความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 ซึ่งสามารถลดลงได้อย่างชัดเจน

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใส่วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และหรือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเข้าไปในวงจรอาจจะทำให้เกิดการสูญเสีย ทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าลดลงไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลหลายปัจจัย เช่นการออกแบบวงจร การใส่ค่าของอุปกรณ์ในวงจร การปรับแต่งวงจร ตลอดจนการเคลื่อนย้ายที่ไม่ระมัดระวังอาจจะทำให้ค่าต่างๆ ในวงจรกรองเปลี่ยนได้

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ปัญหา

ปัญหาที่เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการทำโครงการนี้คือขาดความคล่องตัวในการใช้สถานที่ทำการทดลองและเครื่องมือเครื่องใช้ที่ไม่ค่อยพร้อม ซึ่งได้แก้ปัญหาโดยการหาที่ทดลองเอง

ปัญหาในการคำนวณและออกแบบวงจรที่มีความยุ่งยาก ซึ่งได้แก้ปัญหาโดยการออกแบบวงจรกรองด้วยวิธีการคำนวณด้วยตารางซึ่งมีผู้คำนวณค่าต่างๆไว้ให้เรียบร้อยแล้ว จึงนำค่าในตารางมาคำนวณตามวิธีที่กำหนดมาให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหา การสังเคราะห์สร้างและตั้งค่าอุปกรณ์ในวงจรกรองซึ่งยุ่งยากมากทำให้ใช้เวลาในการสังเคราะห์สร้างและวิจัยเป็นเวลานาน แก้ไข โดยการกำหนดค่าอุปกรณ์ในวงจรกรองให้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบมากที่สุด เพื่อที่จะได้ผลออกมามีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี

ปัญหาในการทดลองในวงจรขยายกำลังส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม ซึ่งถ้าปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามคู่มือโดยไม่ระมัดระวังแล้วอาจทำให้เกิดการเสียหายกับวงจรได้ซึ่ง ตัวอุปกรณ์ที่เป็น มอสเฟต มีราคาแพงมาก การแก้ไขปัญหาคือต้องระมัดระวังและศึกษาคู่มือการทำงานให้เข้าใจก่อน

5.3 แนวทางในการพัฒนา

ในการพัฒนานำวงจรกรองความถี่แบบบนาล็อกที่ได้ไปใช้กับงานในสาขาอื่นที่ไม่ใช่เครื่องส่งวิทยุชุมชน แล้วทำการพัฒนาให้วงจรกรองมีคุณภาพมากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ช่องความถี่วิทยุกระจายเสียงระบบ เอฟเอ็ม.

เลขลำดับของความถี่	ความถี่(เมกกะเฮิรตซ์)	เลขลำดับของความถี่	ความถี่(เมกกะเฮิรตซ์)
201	88.00	227	94.50
202	88.25	228	94.75
203	88.50	229	95.00
204	88.75	230	95.25
205	89.00	231	95.50
206	89.25	232	95.75
207	89.50	233	96.00
208	89.75	234	96.25
209	90.00	235	96.50
210	90.25	236	96.75
211	90.50	237	97.00
212	90.75	238	97.25
213	91.00	239	97.50
214	91.25	240	97.75
215	91.50	241	98.00
216	91.75	242	98.25
217	92.00	243	98.50
218	92.25	244	98.75
219	92.50	245	99.00
220	92.75	246	99.25
221	93.00	247	99.50
222	93.25	248	99.75
223	93.50	249	100.00
224	93.75	250	100.25
225	94.00	251	100.50
226	94.25	252	100.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขลำดับของความถี่	ความถี่(เมกกะเฮิรตซ์)	เลขลำดับของความถี่	ความถี่(เมกกะเฮิรตซ์)
253	101.00	267	104.50
254	101.25	268	104.75
255	101.50	269	105.00
256	101.75	270	105.25
257	102.00	271	105.50
258	102.25	272	105.75
259	102.50	273	106.00
260	102.75	274	106.25
261	103.00	275	106.50
262	103.25	276	106.75
263	103.50	277	107.00
264	103.75	278	107.25
265	104.00	279	107.50
266	104.25	280	107.75
		281	108.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟแสดงคุณลักษณะการลดทอน สำหรับวงจรกรองแบบปัสเตอร์เวิร์ธ

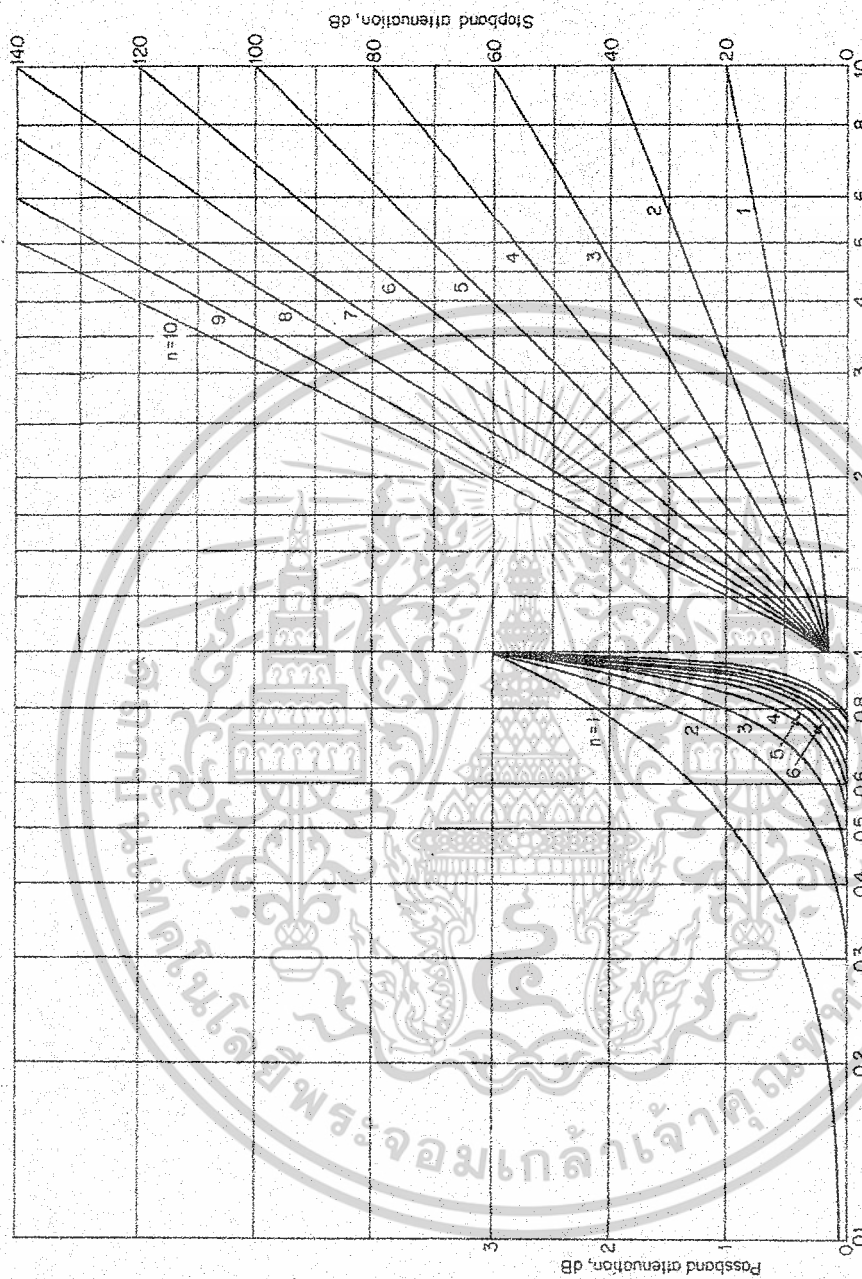


Fig. 2-34 Attenuation characteristics for Butterworth filters. (From Anatol I. Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967. By permission of the publishers.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กราฟแสดงคุณลักษณะการลดทอน สำหรับวงจรกรองแบบ 0.01dB เชฟบีเชฟ

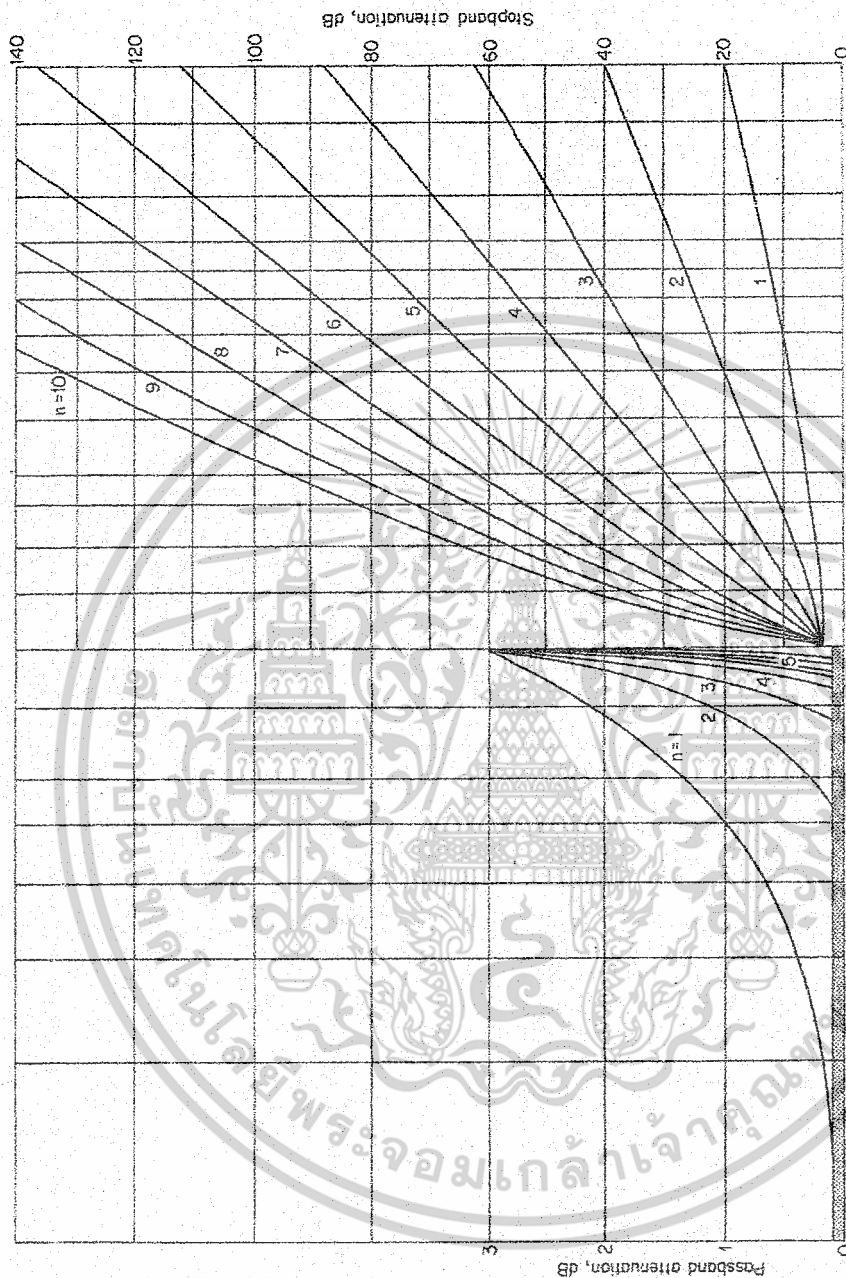


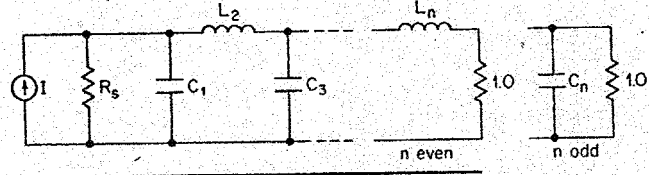
Fig. 2-41 Attenuation characteristics for Chebyshev filters with 0.01-dB ripple. (From Anatol I. Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967. By permission of the publishers.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

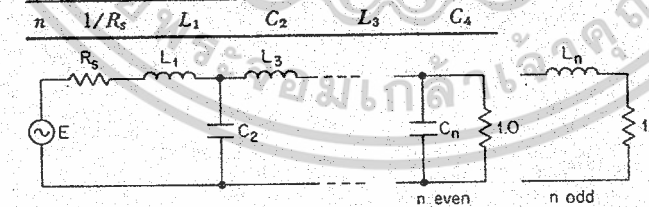
ภาคผนวก ง

ตารางออกการแบบนอร์มาไลซ์วงจรกรองแบบปัดเตอร์เวิร์ธ

TABLE 12-2 Butterworth LC Element Values*



n	R_s	C_1	L_2	C_3	L_4
2	1.0000	1.4142	1.4142		
	1.1111	1.0353	1.8352		
	1.2500	0.8485	2.1213		
	1.4286	0.6971	2.4387		
	1.6667	0.5657	2.8284		
	2.0000	0.4483	3.3461		
	2.5000	0.3419	4.0951		
	3.3333	0.2447	5.3126		
	5.0000	0.1557	7.7067		
	10.0000	0.0743	14.8138		
	Inf.	1.4142	0.7071		
3	1.0000	1.0000	2.0000	1.0000	
	0.9000	0.8082	1.6332	1.5994	
	0.8000	0.8442	1.3840	1.9259	
	0.7000	0.9152	1.1652	2.2774	
	0.6000	1.0225	0.9650	2.7024	
	0.5000	1.1811	0.7789	3.2612	
	0.4000	1.4254	0.6042	4.0642	
	0.3000	1.8380	0.4396	5.3634	
	0.2000	2.6687	0.2842	7.9102	
	0.1000	5.1672	0.1377	15.4554	
	Inf.	1.5000	1.3333	0.5000	
4	1.0000	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654
	1.1111	0.4657	1.5924	1.7439	1.4690
	1.2500	0.3882	1.6946	1.5110	1.8109
	1.4286	0.3251	1.8618	1.2913	2.1752
	1.6667	0.2690	2.1029	1.0824	2.6131
	2.0000	0.2175	2.4524	0.8826	3.1868
	2.5000	0.1692	2.9858	0.6911	4.0094
	3.3333	0.1237	3.8826	0.5072	5.3381
	5.0000	0.0804	5.6835	0.3307	7.9397
	10.0000	0.0392	11.0942	0.1616	15.6421
	Inf.	1.5307	1.5772	1.0824	0.3827



* Reprinted from A. I. Zverev, "Handbook of Filter Synthesis," John Wiley and Sons, New York, 1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 12-2 (Continued)

n	R_2	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7	
5	1.0000	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180			
	0.9000	0.4416	1.0265	1.9095	1.7562	1.3887			
	0.8000	0.4698	0.8660	2.0605	1.5443	1.7380			
	0.7000	0.5173	0.7313	2.2849	1.3326	2.1083			
	0.6000	0.5860	0.6094	2.5998	1.1255	2.5524			
	0.5000	0.6857	0.4955	3.0510	0.9237	3.1331			
	0.4000	0.8378	0.3877	3.7357	0.7274	3.9648			
	0.3000	1.0937	0.2848	4.8835	0.5367	5.3073			
	0.2000	1.6077	0.1861	7.1849	0.3518	7.9345			
	0.1000	3.1522	0.0912	14.0945	0.1727	15.7103			
	Inf.	1.5451	1.6944	1.3820	0.8944	0.3090			
	6	1.0000	0.5176	1.4142	1.9319	1.9319	1.4142	0.5176	
		1.1111	0.2890	1.0403	1.3217	2.0539	1.7443	1.3347	
1.2500		0.2445	1.1163	1.1257	2.2389	1.5498	1.6881		
1.4286		0.2072	1.2363	0.9567	2.4991	1.3464	2.0618		
1.6667		0.1732	1.4071	0.8011	2.8580	1.1431	2.5092		
2.0000		0.1412	1.6531	0.6542	3.3687	0.9423	3.0938		
2.5000		0.1108	2.0275	0.5139	4.1408	0.7450	3.9305		
3.3333		0.0816	2.6559	0.3788	5.4325	0.5517	5.2804		
5.0000		0.0535	3.9170	0.2484	8.0201	0.3628	7.9216		
10.0000		0.0263	7.7053	0.1222	15.7855	0.1788	15.7375		
Inf.		1.5529	1.7593	1.5529	1.2016	0.7579	0.2588		
7		1.0000	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450
		0.9000	0.2985	0.7111	1.4043	1.4891	2.1249	1.7268	1.2961
	0.8000	0.3215	0.6057	1.5174	1.2777	2.3338	1.5461	1.6520	
	0.7000	0.3571	0.5154	1.6883	1.0910	2.6177	1.3498	2.0277	
	0.6000	0.4075	0.4322	1.9284	0.9170	3.0050	1.1503	2.4771	
	0.5000	0.4799	0.3536	2.2726	0.7512	3.5532	0.9513	3.0640	
	0.4000	0.5899	0.2782	2.7950	0.5917	4.3799	0.7542	3.9037	
	0.3000	0.7745	0.2055	3.6706	0.4373	5.7612	0.5600	5.2583	
	0.2000	1.1448	0.1350	5.4267	0.2874	8.5263	0.3692	7.9079	
	0.1000	2.2571	0.0665	10.7004	0.1417	16.8222	0.1823	15.7480	
	Inf.	1.5576	1.7988	1.6588	1.3972	1.0550	0.6560	0.2225	
	n	$1/R_2$	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 12-2 (Continued)

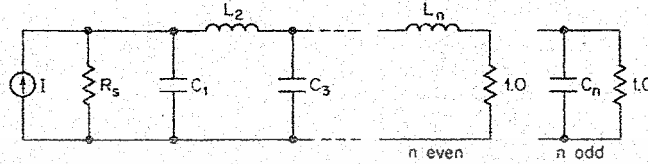
n	R_1	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7	L_8	C_9	L_{10}
8	1.0000	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902		
	1.1111	0.2075	0.7575	0.9925	1.6362	1.5900	2.1612	1.7092	1.2671		
	1.2500	0.1774	0.8199	0.8499	1.7779	1.3721	2.3874	1.5393	1.6246		
	1.4286	0.1513	0.9138	0.7257	1.9852	1.1760	2.6879	1.3490	2.0017		
	1.6667	0.1272	1.0455	0.6102	2.2740	0.9912	3.0945	1.1530	2.4524		
	2.0000	0.1042	1.2341	0.5003	2.6863	0.8139	3.6678	0.9558	3.0408		
	2.5000	0.0822	1.5201	0.3945	3.3106	0.6424	4.5308	0.7594	3.8825		
	3.3333	0.0608	1.9995	0.2919	4.3563	0.4757	5.9714	0.5650	5.2400		
	5.0000	0.0400	2.9608	0.1921	6.4523	0.3133	8.8538	0.3732	7.8952		
	10.0000	0.0198	5.8479	0.0949	12.7455	0.1547	17.4999	0.1846	15.7510		
	Inf.	1.5607	1.8246	1.7287	1.5283	1.2588	0.9371	0.5776	0.1951		
9	1.0000	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	
	0.9000	0.2242	0.5388	1.0835	1.1859	1.7905	1.6538	2.1796	1.6930	1.2447	
	0.8000	0.2434	0.4623	1.1777	1.0200	1.9542	1.4336	2.4189	1.5318	1.6033	
	0.7000	0.2719	0.3954	1.3162	0.8734	2.1885	1.2323	2.7314	1.3464	1.9812	
	0.6000	0.3117	0.3330	1.5092	0.7361	2.5124	1.0410	3.1516	1.1533	2.4328	
	0.5000	0.3685	0.2735	1.7846	0.6046	2.9734	0.8565	3.7426	0.9579	3.0223	
	0.4000	0.4545	0.2159	2.2019	0.4775	3.6706	0.6771	4.6310	0.7624	3.8654	
	0.3000	0.5987	0.1600	2.9006	0.3539	4.8373	0.5022	6.1128	0.5680	5.2249	
	0.2000	0.8878	0.1054	4.3014	0.2333	7.1750	0.3312	9.0766	0.3757	7.8838	
	0.1000	1.7558	0.0521	8.5074	0.1153	14.1930	0.1638	17.9654	0.1862	15.7504	
	Inf.	1.5628	1.8424	1.7772	1.6202	1.4037	1.1408	0.8414	0.5155	0.1736	
10	1.0000	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129
	1.1111	0.1614	0.5924	0.7853	1.3202	1.3230	1.8968	1.6956	2.1883	1.6785	1.2267
	1.2500	0.1388	0.6452	0.6762	1.4400	1.1420	2.0779	1.4754	2.4377	1.5245	1.5861
	1.4286	0.1190	0.7222	0.5797	1.6130	0.9802	2.3324	1.2712	2.7592	1.3431	1.9646
	1.6667	0.1004	0.8292	0.4891	1.8528	0.8275	2.6825	1.0758	3.1895	1.1526	2.4169
	2.0000	0.0825	0.9818	0.4021	2.1943	0.6808	3.1795	0.8864	3.7934	0.9588	3.0072
	2.5000	0.0652	1.2127	0.3179	2.7108	0.5384	3.9302	0.7018	4.7002	0.7641	3.8512
	3.3333	0.0484	1.5992	0.2358	3.5754	0.3995	5.1858	0.5211	6.2118	0.5700	5.2122
	5.0000	0.0319	2.3740	0.1556	5.3082	0.2636	7.7010	0.3440	9.2343	0.3775	7.8738
	10.0000	0.0158	4.7005	0.0770	10.5104	0.1305	15.2505	0.1704	18.2981	0.1872	15.7481
	Inf.	1.5643	1.8552	1.8121	1.6869	1.5100	1.2921	1.0406	0.7626	0.4654	0.1564
n	$1/R_1$	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7	C_8	L_9	C_{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

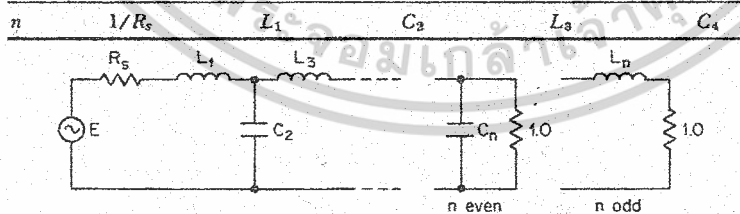
ภาคผนวก จ

ตารางออกการแบบ นอร์มาไลซ์วงจรกรองแบบ 0.01dB เชบีเชฟ

TABLE 12-27 0.01-dB Chebyshev LC Element Values*



n	R _s	C ₁	L ₂	C ₃	L ₄
2	1.1007	1.3472	1.4829		
	1.1111	1.2472	1.5947		
	1.2500	0.9434	1.9974		
	1.4286	0.7591	2.3442		
	1.6667	0.6091	2.7496		
	2.0000	0.4791	3.2772		
	2.5000	0.3634	4.0328		
	3.3333	0.2590	5.2546		
	5.0000	0.1642	7.6498		
	10.0000	0.0781	14.7492		
Inf.	1.4118	0.7415			
3	1.0000	1.1811	1.8214	1.1811	
	0.9000	1.0917	1.6597	1.4802	
	0.8000	1.0969	1.4431	1.8057	
	0.7000	1.1600	1.2283	2.1653	
	0.6000	1.2737	1.0236	2.5984	
	0.5000	1.4521	0.8294	3.1644	
	0.4000	1.7340	0.6452	3.9742	
	0.3000	2.2164	0.4704	5.2800	
	0.2000	3.1934	0.3047	7.8338	
	0.1000	6.1411	0.1479	15.3899	
Inf.	1.5012	1.4330	0.5905		
4	1.1000	0.9500	1.9382	1.7608	1.0457
	1.1111	0.8539	1.9460	1.7439	1.1647
	1.2500	0.6182	2.0749	1.5417	1.6170
	1.4286	0.4948	2.2787	1.3336	2.0083
	1.6667	0.3983	2.5709	1.1277	2.4611
	2.0000	0.3156	2.9943	0.9260	3.0448
	2.5000	0.2418	3.6406	0.7293	3.8746
	3.3333	0.1744	4.7274	0.5379	5.2085
	5.0000	0.1121	6.9102	0.3523	7.8126
	10.0000	0.0541	13.4690	0.1729	15.5100
Inf.	1.5287	1.6939	1.3122	0.5229	



* Reprinted from A. I. Zverev, "Handbook of Filter Synthesis," John Wiley and Sons, New York, 1967.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

TABLE 12-27 (Continued)

n	R_3	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7
5	1.0000	0.9766	1.6849	2.0366	1.6849	0.9766		
	0.9000	0.8798	1.4558	2.1738	1.6412	1.2739		
	0.8000	0.8769	1.2350	2.3785	1.4991	1.6066		
	0.7000	0.9263	1.0398	2.6582	1.3228	1.9772		
	0.6000	1.0191	0.8626	3.0408	1.1345	2.4244		
	0.5000	1.1658	0.6985	3.5835	0.9421	3.0092		
	0.4000	1.3983	0.5442	4.4027	0.7491	3.8453		
	0.3000	1.7966	0.3982	5.7721	0.5573	5.1925		
	0.2000	2.6039	0.2592	8.5140	0.3679	7.8257		
	0.1000	5.0406	0.1266	16.7406	0.1819	15.6126		
	Inf.	1.5466	1.7950	1.6449	1.2365	0.4883		
	6	1.1007	0.8514	1.7956	1.8411	2.0266	1.6312	0.9372
1.1111		0.7597	1.7817	1.7752	2.0941	1.6380	1.0533	
1.2500		0.5445	1.8637	1.4886	2.4025	1.5067	1.5041	
1.4286		0.4355	2.0383	1.2655	2.7346	1.3318	1.8987	
1.6667		0.3509	2.2978	1.0607	3.1671	1.1451	2.3568	
2.0000		0.2786	2.6781	0.8671	3.7683	0.9536	2.9483	
2.5000		0.2139	3.2614	0.6816	4.6673	0.7606	3.7899	
3.3333		0.1547	4.2448	0.5028	6.1631	0.5676	5.1430	
5.0000		0.0997	6.2227	0.3299	9.1507	0.3760	7.7852	
10.0000		0.0483	12.1707	0.1623	18.1048	0.1865	15.5950	
Inf.		1.5510	1.8471	1.7897	1.5976	1.1904	0.4686	
7		1.0000	0.9127	1.5947	2.0021	1.8704	2.0021	1.5947
	0.9000	0.8157	1.3619	2.0886	1.7217	2.2017	1.5805	1.2060
	0.8000	0.8111	1.1504	2.2618	1.5252	2.4647	1.4644	1.5380
	0.7000	0.8567	0.9673	2.5158	1.3234	2.8018	1.3066	1.9096
	0.6000	0.9430	0.8025	2.8720	1.1237	3.2496	1.1310	2.3592
	0.5000	1.0799	0.6502	3.3822	0.9276	3.8750	0.9468	2.9478
	0.4000	1.2971	0.5072	4.1563	0.7350	4.8115	0.7584	3.7900
	0.3000	1.6692	0.3716	5.4540	0.5459	6.3703	0.5682	5.1476
	0.2000	2.4235	0.2423	8.0565	0.3604	9.4844	0.3776	7.8019
	0.1000	4.7006	0.1186	15.8718	0.1784	18.8179	0.1879	15.6523
	Inf.	1.5593	1.8671	1.8657	1.7651	1.5633	1.1610	0.4564
	n	$1/R_3$	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 12-27 (Continued)

n	R_s	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7	L_8	C_9	L_{10}
8	1.1007	0.8145	1.7275	1.7984	2.0579	1.8695	1.9796	1.5694	0.8966		
	1.1111	0.7248	1.7081	1.7239	2.1019	1.8259	2.0595	1.5827	1.0111		
	1.2500	0.5176	1.7772	1.4315	2.3601	1.5855	2.4101	1.4754	1.4597		
	1.4286	0.4138	1.9422	1.2141	2.6686	1.3723	2.7734	1.3142	1.8544		
	1.6667	0.3336	2.1896	1.0169	3.0808	1.1660	3.2393	1.1369	2.3136		
	2.0000	0.2650	2.5533	0.8313	3.6598	0.9639	3.8820	0.9518	2.9073		
	2.5000	0.2036	3.1118	0.6537	4.5303	0.7653	4.8393	0.7627	3.7524		
	3.3333	0.1474	4.0539	0.4826	5.9828	0.5697	6.4287	0.5718	5.1118		
	5.0000	0.0951	5.9495	0.3170	8.8889	0.3770	9.6002	0.3804	7.7668		
	10.0000	0.0462	11.6509	0.1562	17.6067	0.1870	19.1009	0.1895	15.6158		
	Inf.	1.5588	1.8848	1.8988	1.8556	1.7433	1.5391	1.1412	0.4483		
	9	1.0000	0.8854	1.5513	1.9614	1.8616	2.0717	1.8616	1.9614	1.5513	0.8854
0.9000		0.7886	1.3192	2.0330	1.6941	2.2249	1.7402	2.1774	1.5478	1.1764	
0.8000		0.7894	1.1127	2.1959	1.4930	2.4614	1.5603	2.4565	1.4423	1.5076	
0.7000		0.8273	0.9353	2.4404	1.2924	2.7808	1.3662	2.8093	1.2927	1.8793	
0.6000		0.9109	0.7761	2.7852	1.0962	3.2140	1.1688	3.2747	1.1233	2.3295	
0.5000		1.0436	0.6290	3.2805	0.9045	3.8249	0.9710	3.9223	0.9436	2.9193	
0.4000		1.2542	0.4910	4.0329	0.7167	4.7444	0.7739	4.8900	0.7582	3.7637	
0.3000		1.6151	0.3599	5.2951	0.5325	6.2792	0.5780	6.4989	0.5697	5.1254	
0.2000		2.3468	0.2349	7.8274	0.3518	9.3504	0.3835	9.7114	0.3797	7.7882	
0.1000		4.5556	0.1150	15.4334	0.1743	18.5641	0.1908	19.3382	0.1895	15.6645	
Inf.		1.5646	1.8884	1.9242	1.8977	1.8425	1.7261	1.5217	1.1273	0.4427	
10		1.1007	0.7970	1.6930	1.7690	2.0395	1.8827	2.0724	1.8529	1.9472	1.5380
	1.1111	0.7083	1.6714	1.6921	2.0763	1.8281	2.1308	1.8167	2.0310	1.5541	0.9910
	1.2500	0.5049	1.7353	1.4005	2.3184	1.5706	2.4371	1.5953	2.3952	1.4574	1.4381
	1.4286	0.4037	1.8958	1.1871	2.6178	1.3552	2.7830	1.3895	2.7685	1.3027	1.8327
	1.6667	0.3255	2.1375	0.9942	3.0205	1.1497	3.2370	1.1863	3.2448	1.1300	2.2923
	2.0000	0.2586	2.4932	0.8128	3.5878	0.9497	3.8698	0.9849	3.9004	0.9484	2.8867
	2.5000	0.1988	3.0398	0.6394	4.4418	0.7538	4.8173	0.7849	4.8757	0.7617	3.7333
	3.3333	0.1440	3.9619	0.4723	5.8678	0.5612	6.3951	0.5863	6.4939	0.5722	5.0955
	5.0000	0.0930	5.8175	0.3103	8.7220	0.3715	9.5486	0.3893	9.7217	0.3814	7.7563
	10.0000	0.0451	11.3993	0.1530	17.2866	0.1844	19.0046	0.1938	19.3905	0.1904	15.6234
	Inf.	1.5625	1.8978	1.9323	1.9288	1.8907	1.8309	1.7128	1.5088	1.1173	0.4386
	n	$1/R_s$	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7	C_8	L_9

ภาคผนวก ก

Data sheet BLF 245

FEATURES

- High power gain
- Low noise figure
- Easy power control
- Good thermal stability
- Withstands full load mismatch.

DESCRIPTION

Silicon N-channel enhancement mode vertical D-MOS transistor designed for large signal amplifier applications in the VHF frequency range.

The transistor is encapsulated in a 4-lead SOT123 flange envelope, with a ceramic cap. All leads are isolated from the flange.

Matched gate-source voltage (V_{GS}) groups are available on request.

PIN CONFIGURATION

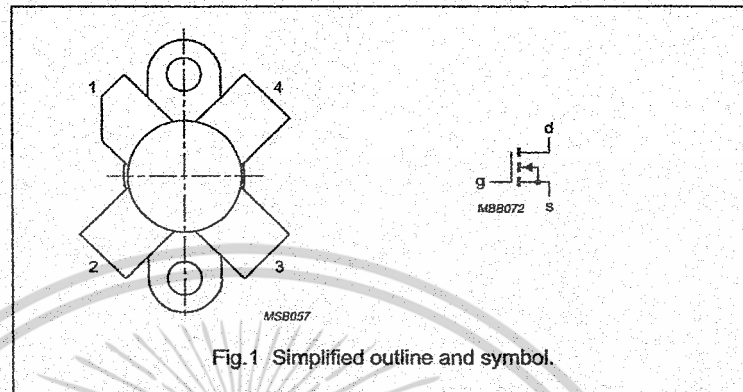


Fig.1 Simplified outline and symbol.

CAUTION

The device is supplied in an antistatic package. The gate-source input must be protected against static charge during transport and handling.

WARNING

Product and environmental safety - toxic materials

This product contains beryllium oxide. The product is entirely safe provided that the BeO disc is not damaged. All persons who handle, use or dispose of this product should be aware of its nature and of the necessary safety precautions. After use, dispose of as chemical or special waste according to the regulations applying at the location of the user. It must never be thrown out with the general or domestic waste.

PINNING - SOT123

PIN	DESCRIPTION
1	drain
2	source
3	gate
4	source

QUICK REFERENCE DATA

RF performance at $T_H = 25^\circ\text{C}$ in a class-B test circuit.

MODE OF OPERATION	f (MHz)	V_{DS} (V)	P_L (W)	G_p (dB)	η_D (%)
CW, class-B	175	28	30	> 13	> 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DS}	drain-source voltage	$V_{GS} = 0$	–	65	V
$\pm V_{GS}$	gate-source voltage	$V_{DS} = 0$	–	20	V
I_D	DC drain current		–	6	A
P_{tot}	total power dissipation	up to $T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	–	68	W
T_{stg}	storage temperature		–65	150	$^\circ\text{C}$
T_J	junction temperature		–	200	$^\circ\text{C}$

THERMAL RESISTANCE

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	THERMAL RESISTANCE
$R_{th\ j-mb}$	thermal resistance from junction to mounting base	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $P_{tot} = 68\text{ W}$	2.6 K/W
$R_{th\ mb-h}$	thermal resistance from mounting base to heatsink	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $P_{tot} = 68\text{ W}$	0.3 K/W

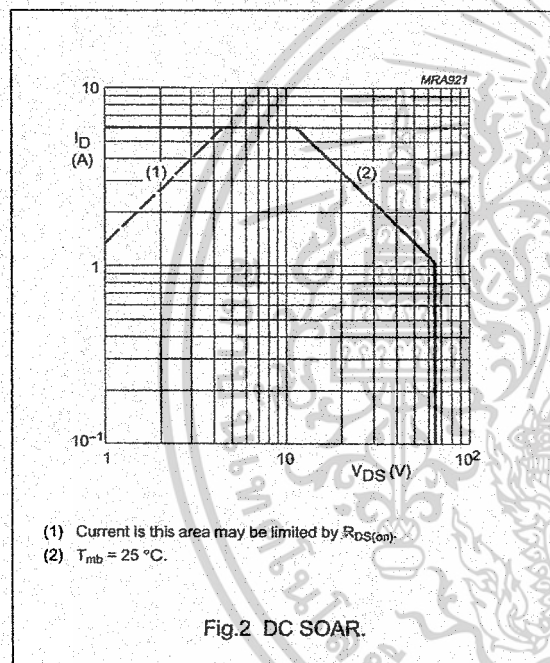


Fig.2 DC SOAR.

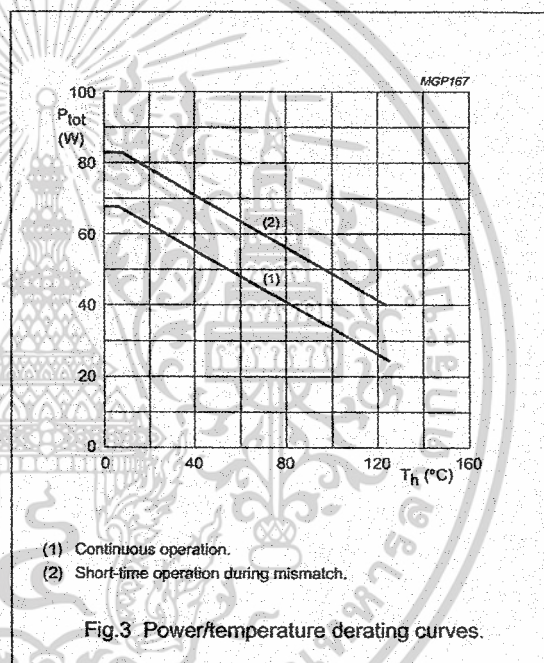


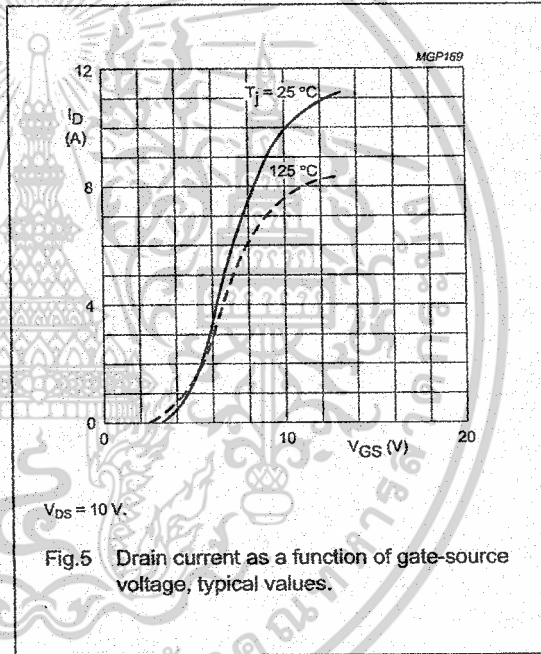
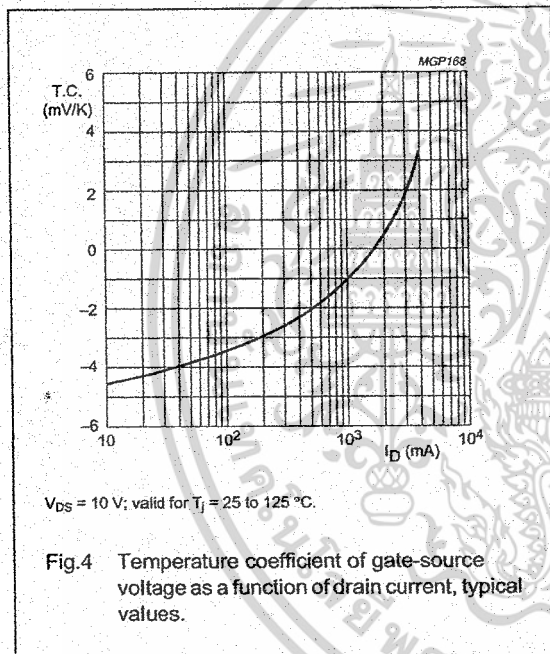
Fig.3 Power/temperature derating curves.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERISTICS

$T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	drain-source breakdown voltage	$V_{GS} = 0; I_D = 10\text{ mA}$	65	-	-	V
I_{DSS}	drain-source leakage current	$V_{GS} = 0; V_{DS} = 28\text{ V}$	-	-	2	mA
I_{GSS}	gate-source leakage current	$\pm V_{GS} = 20\text{ V}; V_{DS} = 0$	-	-	1	μA
$V_{GS(th)}$	gate-source threshold voltage	$I_D = 10\text{ mA}; V_{DS} = 10\text{ V}$	2	-	4.5	V
ΔV_{GS}	gate-source voltage difference of matched devices	$I_D = 10\text{ mA}; V_{DS} = 10\text{ V}$	-	-	100	mV
g_{fs}	forward transconductance	$I_D = 1.5\text{ A}; V_{DS} = 10\text{ V}$	1.2	1.9	-	S
$R_{DS(on)}$	drain-source on-state resistance	$I_D = 1.5\text{ A}; V_{GS} = 10\text{ V}$	-	0.4	0.75	Ω
I_{DSX}	on-state drain current	$V_{GS} = 10\text{ V}; V_{DS} = 10\text{ V}$	-	10	-	A
C_{is}	input capacitance	$V_{GS} = 0; V_{DS} = 28\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	125	-	pF
C_{os}	output capacitance	$V_{GS} = 0; V_{DS} = 28\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	75	-	pF
C_{rs}	feedback capacitance	$V_{GS} = 0; V_{DS} = 28\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	7	-	pF
F	noise figure (see Fig.14)	input and output power matched for: $I_D = 1\text{ A}; V_{DS} = 28\text{ V}; P_L = 30\text{ W};$ $R_1 = 1\text{ k}\Omega; T_H = 25^\circ\text{C}; f = 175\text{ MHz}$	-	2	-	dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

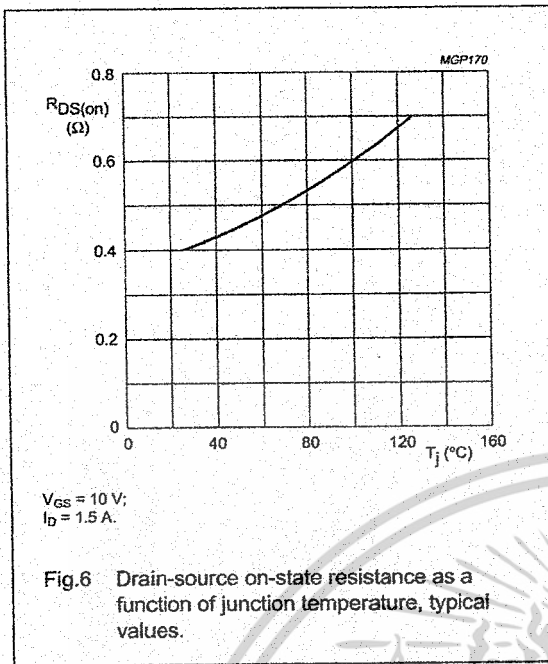


Fig.6 Drain-source on-state resistance as a function of junction temperature, typical values.

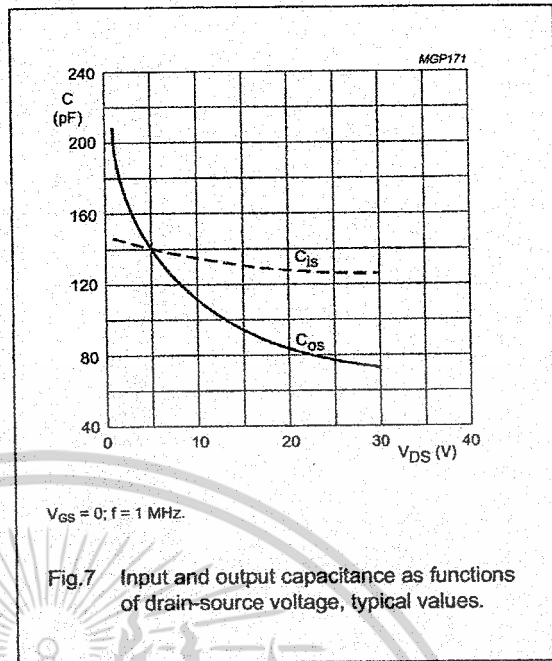


Fig.7 Input and output capacitance as functions of drain-source voltage, typical values.

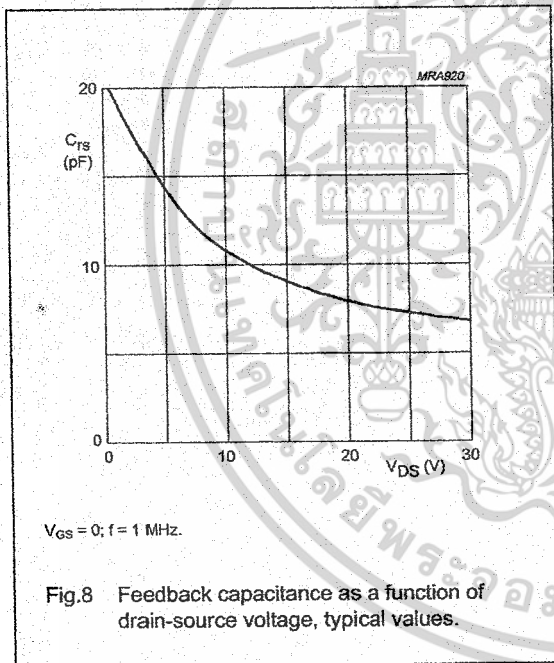


Fig.8 Feedback capacitance as a function of drain-source voltage, typical values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION INFORMATION FOR CLASS-B OPERATION

$T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $R_{th\text{ mb-h}} = 0.3\text{ K/W}$; $R1 = 1\text{ k}\Omega$.

RF performance in CW operation in a common source class-B test circuit.

MODE OF OPERATION	f (MHz)	V _{DS} (V)	I _{DQ} (mA)	P _L (W)	G _p (dB)	η_D (%)	Z _i (Ω) (note 1)	Z _L (Ω)
CW, class-B	175	28	50	30	> 13 typ. 15.5	< 50 typ. 67	2.0 - j2.7	3.9 + j4.4
	175	12.5	50	12	typ. 12	typ. 66	2.4 - j2.5	3.8 + j1.3

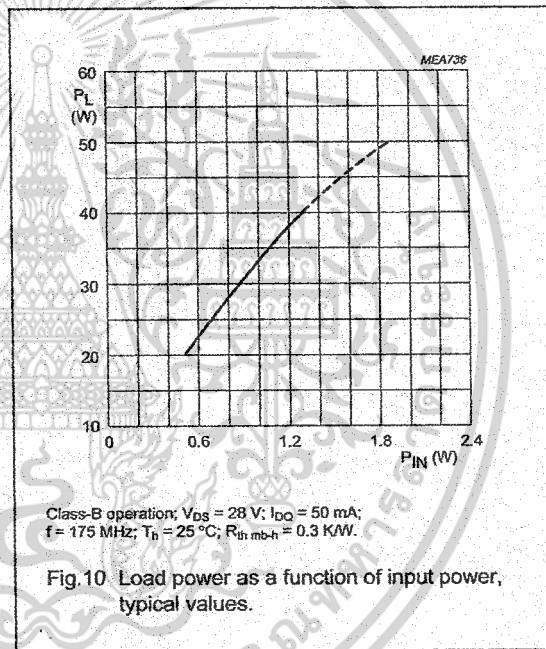
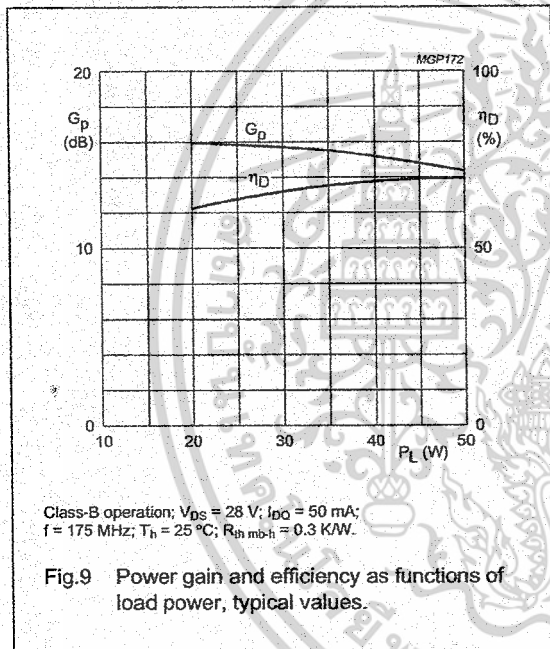
Note

1. R1 included.

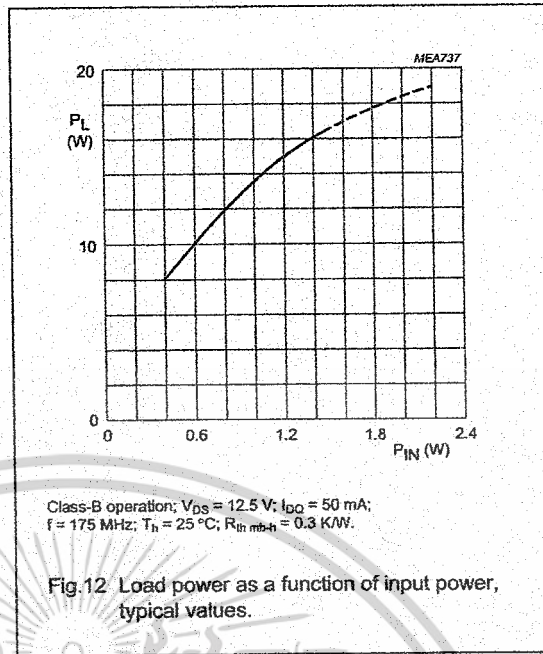
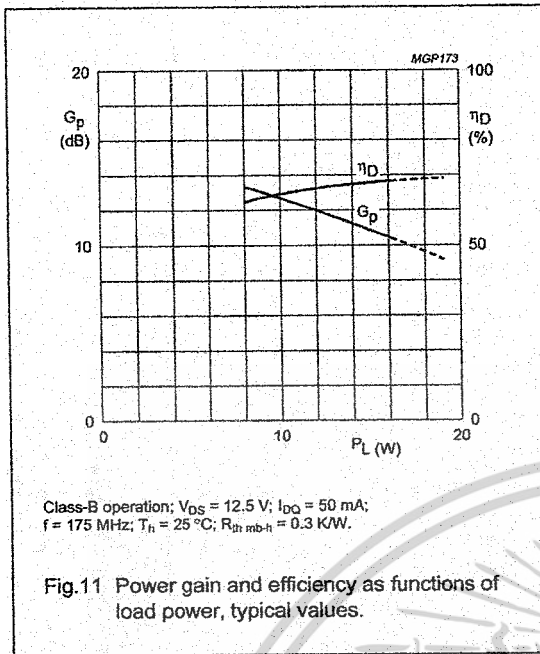
Ruggedness in class-B operation

The BLF245 is capable of withstanding a load mismatch corresponding to VSWR = 50 through all phases under the following conditions:

$T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $R_{th\text{ mb-h}} = 0.3\text{ K/W}$; at rated load power.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Philips
Semiconductors



PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. จิรยุทธ์ มหัทธนนุกูล, การออกแบบวงจรกรองแอนะลီอิก, กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล, 2544
2. วิโรจน์ แก้วจันทร์, ทฤษฎีเครื่องส่งวิทยุ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สกายบุ๊กส์, 2544
3. วิวัฒน์ กิรานนท์, วิศวกรรมการสื่อสาร, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์, 2546
4. พันธุ์ศักดิ์ พุฒิมานิตพงษ์, ทฤษฎีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจร 1, กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ
5. ดวงใจ กาญจนปัญญา, ทฤษฎีสายส่งและสายอากาศ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: พิมพ์เอ็มพันธ์, 2541
6. Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Harper & Row Publishers, New York, 1981
7. ไมโนย ไกรฤกษ์, ทฤษฎีสายอากาศ, ฟิสิกเซนเตอร์, 2535
8. John Wiley and Sons, Handbook of filter Synthesis, New York, 1967



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้