

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมด  
แรงดันหนึ่งอินพุต สี่เอาต์พุตที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้

VDDDA

SYNTHESIS AND DESIGN OF ELECTRONICALLY CONTROLLED SINGLE-  
INPUT FOUR-OUTPUTS VOLTAGE MODE SECOND ORDER  
MULTIFUNCTION FILTER USING VDDDA<sub>s</sub>



กท.  
๘๘๘๓  
๒๕๕๙

เลขหมู่..... 146637  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี 29 มี.ค. ๒๕๖๐

b. ๗๒๘๔๖๓๘๖  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาครุศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร  
คณะครุศาสตรบัณฑิต  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกท. KMITL-2016-ED-M-231-105 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND DESIGN OF ELECTRONICALLY CONTROLLED  
SINGLE-INPUT FOUR-OUTPUTS VOLTAGE MODE SECOND ORDER  
MULTIFUNCTION FILTER USING VDDDA<sub>s</sub>



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN INDUSTRIAL EDUCATION  
IN ELECTRICAL COMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMUTL-2016-ED-M-123-105  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF INDUSTRIAL EDUCATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่  
อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่ควบคุมได้ด้วย  
วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ VDDDA

Synthesis and Design of Electronically Controlled  
Single-Input Four Outputs Voltage Mode

Second Order Multifunction Filter Using VDDDA's

นักศึกษา

นางสาวสุวิมล ชัยมงคล

รหัสประจำตัว

55630702

ปริญญา

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	สนทรกนกพงศ์
ผศ.ดร.วินัย	ใจกล้า
รศ.ดร.พีระวุฒิ	สุวรรณจันทร์
รศ.ปิยะ	ศุภรสาสุวัฒน์
ผศ.ดร.ศุภวัฒน์	สาวัฒน์วิสุทธิ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ

11 กรกฎาคม 2559 เวลา 11.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ

ณ ห้องเรียนปริญญาเอก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิติพงศ์ มะโน)

คณบดี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

วันที่ 29 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่ อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่ควบคุมได้ด้วย วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ VDDDA
นักศึกษา	นางสาวสุวิมล ชัยมงคล
รหัสประจำตัว	55630702
ปริญญา	ครุศาสตรบัณฑิต สาขาบริหารการศึกษาระดับปริญญาตรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต (Voltage Differencing Differential Difference Amplifier : VDDDA) จำนวนสองวงจรและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์สองตัว โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอก วงจรที่นำเสนอจึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวม อีกทั้งวงจรมีค่าความความต้านทานอินพุตสูงวงจรสามารถให้การตอบสนองการทำงานได้สี่ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านแถบความถี่ และกรองหยุดแถบความถี่โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร สามารถควบคุมความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการปรับกระแสไบอัสจากภายนอก สมรรถนะของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอถูกทดสอบผ่านการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรจริง โดยใช้ไอซี LT1228 และ AD830 เป็นโครงสร้างวงจรภายในของ VDDDA ผลการทดสอบวงจรมีความสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Synthesis and Design of Electronically Controlled Single-Input Four-Outputs Voltage Mode Second Order Multifunction Filter Using VDDDA
<b>Student</b>	Miss Suvimol Chaimongkol
<b>Student ID.</b>	55630702
<b>Degree</b>	Master of Science in Industrial Education
<b>Program</b>	Electrical Communications Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Winai Jaikla
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Peerawut Suwanjan

## ABSTRACT

In this thesis, a single-input four-outputs voltage-mode universal biquadratic filter employing Voltage Differencing Differential Difference Amplifier (VDDDA) is presented. The proposed filter uses two VDDDA and two grounded capacitors without any external resistors, which is well suited for integrated circuit implementation. The circuit provides four standard transfer functions, namely, low pass, high pass, band pass, and band-reject filters. The natural frequency and quality factor can be electronically adjusted by tuning the input bias current. Moreover, the circuit possesses high input impedance and thus it enables simple voltage-mode cascading. The PSPICE simulation and experimental results using VDDDA constructing from CMOS transistors and the commercially available ICs LT1228 and AD830 are included, verifying the workability of the proposed filter. The given results agree well with the theoretical anticipation.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุนทรกนกพงศ์ รศ.ปิยะ ศุภวาราสุวัฒน์ และคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำชี้แนะต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ทุกขั้นตอน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งในอดีตถึงปัจจุบันทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนแง่คิดต่าง ๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการวิจัยในครั้งนี้จนกระทั่งประสบผลสำเร็จขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษาและบุคลากรในคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการติดต่อสอบถามสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้องๆ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ตลอดจนคอยให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันให้แก่ผู้วิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ผู้เป็นที่รักคอยเป็นกำลังใจ ทั้งให้การสนับสนุน และช่วยเหลือในทุกด้านมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีอุปการคุณทุกท่านด้วยความเคารพยิ่ง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

สุวิมล ชัยมงคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 กรอบแนวคิดของการวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย .....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการทั่วไปวงจรรองความถี่ .....	6
2.2 ความไวของตัวอุปกรณ์ในวงจรรองความถี่ .....	18
2.3 หลักการทำงานวงจรขยายกันชนผลต่างแรงดันอินพุต .....	19
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 การสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้า ที่อันดับสองหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตโหมดแรงดัน.....	27
3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรรองความถี่กรณีอุดมคติ .....	35
3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรรองความถี่กรณีไม่เป็นอุดมคติ.....	39
3.4 การวิเคราะห์หาค่าความไว.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง	
โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต.....	56
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	61
4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรรองความถี่	
ด้วยโปรแกรม PSPICE .....	61
4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอ	
ด้วยการต่อวงจรจริง.....	65
4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างวงจรรองความถี่หลายหน้าที่	
โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปแบบต่างๆ .....	73
บทที่ 5 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก .....	81
ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ที่ใช้จำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอ.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขนาดของมอสทรานซิสเตอร์.....	61
4.2 ค่าความจุและค่าความต้านทานแฝงแต่ละขั้วของอุปกรณ์ VDDDA .....	63
4.3 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่นำเสนอกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้ .....	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมกรอบแนวคิดในการสังเคราะห์วงจรองความถี่หลายหน้าที่ อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุต-สี่เอาต์พุต.....	3
2.1 วงจรกรองความถี่แบบ 2 พอร์ต.....	8
2.2 ผลตอบสนองความถี่วงจกรองผ่านความถี่ต่ำ.....	9
2.3 ผลตอบสนองความถี่วงจกรองผ่านความถี่สูง.....	10
2.4 ผลตอบสนองความถี่วงจกรองผ่านแถบความถี่.....	11
2.5 ผลตอบสนองความถี่วงจกรองหยุดแถบความถี่.....	11
2.7 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ $s$ ฟังก์ชันกรองความถี่สูงอันดับสอง.....	13
2.8 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูงอันดับสอง.....	13
2.9 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ $s$ ฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำอันดับสอง.....	14
2.10 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสอง.....	14
2.11 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ $s$ ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง.....	15
2.12 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง.....	15
2.13 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ $s$ ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่อันดับสอง.....	16
2.14 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่อันดับสอง.....	16
2.15 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ $s$ ของฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง.....	17
2.16 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง.....	17
2.17 ผลตอบสนองทางเฟสเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง.....	18
2.18 สัญลักษณ์ของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต.....	20
2.19 วงจรสมมูลย์ของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต.....	20
2.20 โครงสร้างวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุตใช้วงจรรวมเบอร์ LT1228 และ AD830.....	20
2.21 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCC และ CCCII.....	21
2.22 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DVCC.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.23	วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCs.....	23
2.24	วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCTA.....	24
2.25	วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCTAs.....	25
3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2	บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียชนิดไม่กลับเฟส.....	30
3.3	วงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียโดยใช้ VDDDA.....	31
3.4	บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 1.....	31
3.5	วงจรรองความถี่เทียบกับบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย.....	32
3.6	บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียชนิดกลับเฟส.....	32
3.7	วงจรรวมอินทิเกรเตอร์เทียบกับบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย.....	33
3.8	บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 2.....	33
3.9	วงจรรองความถี่เทียบกับบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย.....	34
3.10	วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันโดยใช้ VDDDA.....	34
3.11	VDDDA กรณีพิจารณาความต้านทานและค่าความจุแฝง.....	45
3.12	วงจรรองความถี่ที่นำเสนอกรณีพิจารณาผลกระทบ จากตัวเก็บประจุและตัวต้านทานแฝง.....	46
4.1	วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต โดยใช้โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์.....	62
4.2	ผลตอบสนองการทำงานของฟังก์ชัน กรองผ่านความถี่สูงกรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำและ กรองหยุดแถบความถี่.....	63
4.3	ผลการตอบสนองของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่เมื่อเปลี่ยนค่า IB.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ของวงจร เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ขนาด 50mVp ความถี่ 3 MHz.....	64
4.5 ความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ เทียบกับขนาดของแรงดันอินพุต.....	65
4.6 วงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่ใช้ในการทดลองจริง.....	66
4.7 ผลตอบสนองความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่าน ความถี่ต่ำและกรองหยุดแถบความถี่ที่ $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$ .....	67
4.8 ผลตอบสนองความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่เมื่อปรับ $I_{B1} = I_{B2} = 50\mu A, 100\mu A, 200\mu A$ .....	67
4.9 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง (ก) $f = 50\text{kHz}$ , (ข) $f = 160\text{kHz}$ และ (ค) $f = 400\text{kHz}$ .....	68
4.10 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ (ก) $f = 50\text{kHz}$ , (ข) $f = 160\text{kHz}$ และ (ค) $f = 400\text{kHz}$ .....	70
4.11 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ (ก) $f = 50\text{kHz}$ , (ข) $f = 160\text{kHz}$ และ (ค) $f = 400\text{kHz}$ .....	70
4.12 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ (ก) $f = 50\text{kHz}$ , (ข) $f = 160\text{kHz}$ และ (ค) $f = 400\text{kHz}$ .....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรรองความถี่เป็นวงจรที่มีความสำคัญในระบบการประมวลผลสัญญาณอะนาล็อก และเป็นที่ยอมรับในการนำมาออกแบบวงจรเพื่อประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องเสียง ระบบสื่อสาร การวัดเครื่องมือวัดและระบบควบคุม (Sedra and Smith, 1991; Jiang & Wang, 2006 : 84-90) ซึ่งการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ให้หลายฟังก์ชันเอาต์พุต ในโครงสร้างของวงจรเดียวกัน หรือที่เรียกว่าวงจรรองความถี่แบบหลายหน้าที่ (Multifunction Filter) ได้รับความนิยมเมื่อพิจารณาจากจำนวนอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรองความถี่แบบหลายหน้าที่จะสามารถแบ่งได้เป็น 4 แบบดังนี้ แบบหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาต์พุต (Single Input Single Output : SISO) แบบหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต (Single Input Multiple Output SIMO) แบบหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (Multiple Input Single Output : MISO) และแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multiple Input Multiple Output : MIMO) (Kumngern, Knobnob and Dejhan. 2010 : 934-939) แม้วงจรรองความถี่จะถูกออกแบบให้ทำงานในสองโหมด คือ โหมดแรงดันและโหมดกระแสแต่จะพบว่าโดยทั่วไปวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจะทำงานในโหมดแรงดัน วงจรรองแบบ SIMO เป็นตัวกรองแบบอะนาล็อกที่ยอมรับนำมาใช้งาน จุดเด่นที่สำคัญคือสามารถให้เอาต์พุตพร้อมๆกันซึ่งมีการนำไปใช้งานในระบบต่างๆ เช่น การถอดรหัสสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์ การควบคุมความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลูปในระบบวิทยุ FM สเตอริโอ ในวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแยกเป็น 3 ทางในระบบเครื่องเสียง (Ibrahim, Minaei and Kuntaman. 2005 : 311-318)

ในการสังเคราะห์และออกแบบวงจรมีรูปแบบโดยใช้อุปกรณ์แอ็คทีฟสำเร็จรูป (Active Building Block : ABB) ซึ่งข้อดีของ ABB คือ สะดวกในการนำมาสังเคราะห์และออกแบบ สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส มีความคล่องตัว สะดวกและให้ความยืดหยุ่นเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์และออกแบบในระดับทรานซิสเตอร์ ด้วยคุณสมบัติของวงจรรวมสำเร็จรูปที่สามารถควบคุมการทำงานด้วยกระแสจากภายนอกเมื่อนำอุปกรณ์เหล่านั้นไปออกแบบวงจรแล้ว จึงส่งผลให้วงจรรองความถี่ที่สังเคราะห์และออกแบบด้วยวงจรรวมสำเร็จรูปเหล่านี้สามารถควบคุมได้ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (Herencsar, et. al. 2013 : 17-20) ได้นำเสนอแนวความคิดของวงจรรวมสำเร็จรูปซึ่งทำงานในโหมดแรงดันและโหมดกระแส วงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต (Voltage Differencing Differential Difference Amplifier : VDDDA) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์นี้มีคุณลักษณะการทำงานที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถควบคุมการทำงานด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Control) โดยการควบคุมกระแสไบอัสจากภายนอก

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าการออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต บางวงจรยังมีข้อจำกัดดังนี้ (ก) ใช้อุปกรณ์แพสซีฟแบบลอยตัว (Horng, 2012 : 153-162), (Chiu and Horng, 2011 : 97-101), (Chiu and Horng, 2012 : 297-303), (Budboonchu et. al. 2015 : 335-340), (ข) ใช้อุปกรณ์แพสซีฟมากกว่า 2 ตัว (Ibrahim and Kuntman, 2004 : 429-433), (Pandey et al. 2012 : 46-51), (Tangsrirat and Channumsin, 2011 : 905-910), (Channumsin and Tangsrirat, March 13–15, 2013), (Ismail and Arif, 2014 : 201-206), (Chiu and Horng. 2011 : 97-101), (Chiu and Horng, 2011 : 297-303), (ค) ต้องการการแมตซ์ค่าของตัวอุปกรณ์ (Maneeewan et. al. 2011 : 322-326), (Chiu and Horng, 2001 : 97-101), (Channumsin, et. al. 2012), (ง) ผลตอบสนองฟังก์ชันทางเอาต์พุตน้อยกว่า 4 เอาต์พุต (Ibrahim and Kuntman, 2004 : 429-433), (Jaikla et. al. 2014 : 914-921), (Tangsrirat and Channumsin, 2011 : 905-910), (จ) ใช้อุปกรณ์แอ็คทีฟมากกว่า 2 ตัว (Usama and Bilal, 2014 : 201-206), (Channumsin and Tangsrirat, March 13–15, 2013), (Channumsin and Tangsrirat, 2011 : 905-910), (Ismail and Arif, 2014 : 201-206),

จากหลักการและเหตุผลในข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต เพื่อออกแบบและพัฒนาวงจรรองความถี่ด้วยวงจรรวมสำเร็จรูป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองในโหมดแรงดันหนึ่งอินพุต สี่เอาต์พุตควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ VDDDA

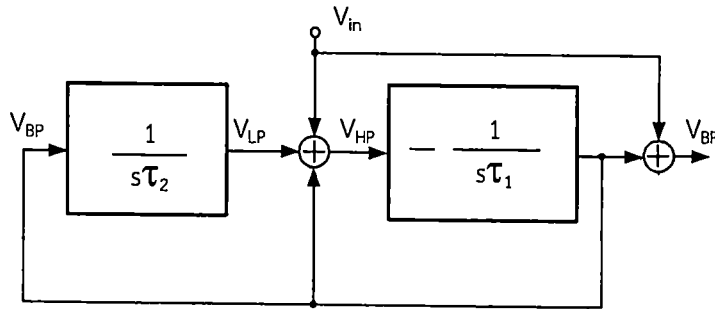
1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรที่ได้สังเคราะห์เมื่อทำงานในกรณีอุดมคติและกรณีไม่เป็นอุดมคติ

1.2.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะวงจรที่ได้สังเคราะห์และออกแบบด้วยโปรแกรม PSPICE และทดสอบต่อวงจรจริง

## 1.3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

แนวความคิดในการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตประกอบด้วยฟังก์ชันทางเอาต์พุตดังนี้ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง (High Pass Filter: HPF) ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF) ฟังก์ชันกรองผ่านแถบจำกัดความถี่ (Band Pass Filter: BPF) ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่แคบ (Narrow Band Pass Filter: NBPF) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (Band Pass Filter : BPF) และฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ (Band Stop Filter : BSF) แสดงดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมกรอบแนวคิดในการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต

จากรูปที่ 1.1 เมื่อพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมซึ่งประกอบไปด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Integrator) 2 วงจรเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสียชนิดกลับเฟสและชนิดไม่กลับเฟสซึ่งทำงานร่วมกับวงจรรวมสัญญาณ 2 วงจรทำให้ได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านจะมีรูปแบบสมการถ่ายโอนฟังก์ชัน

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{-s^2}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \tag{1.1}$$

กรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านจะมีรูปแบบสมการถ่ายโอนฟังก์ชัน

$$\frac{V_{BP}}{V_{in}} = \frac{\tau_1}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \tag{1.2}$$

กรองความถี่แบบแถบความถี่ต่ำผ่านจะมีรูปแบบสมการถ่ายโอนฟังก์ชัน

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \frac{1}{\tau_1\tau_2} \frac{1}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \tag{1.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองหยุดแถบความถี่จะมีรูปแบบสมการถ่ายโอนฟังก์ชัน

$$\frac{V_{BR}}{V_{in}} = - \frac{s^2 + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (1.4)$$

จากสมการที่ (1.1) – (1.4) จะได้ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_0$ ) และควอลิตี้แฟคเตอร์ (Q) ดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_2 \tau_1}} \quad (1.5)$$

และ

$$Q = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (1.6)$$

จากสมการที่ (1.5) – (1.6) พบว่าสามารถปรับค่า  $\omega_0$  และ Q ด้วย  $\tau_2$  และ  $\tau_1$

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.4.1 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตสามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์
- 1.4.2 ใช้วงจรขยายผลต่างแรงดันอินพุตเป็นอุปกรณ์แอคทิฟสองวงจร
- 1.4.3 วงจรที่สร้างขึ้นไม่ใช่ตัวต้านทาน
- 1.4.4 มีความต้านทานทางด้านอินพุตสูง
- 1.4.5 สามารถให้ผลตอบสนองการทำงานได้สี่เอาต์พุต คือ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านแถบความถี่ และกรองหยุดแถบความถี่
- 1.4.6 ทดสอบสมรรถนะของวงจรผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และต่อวงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

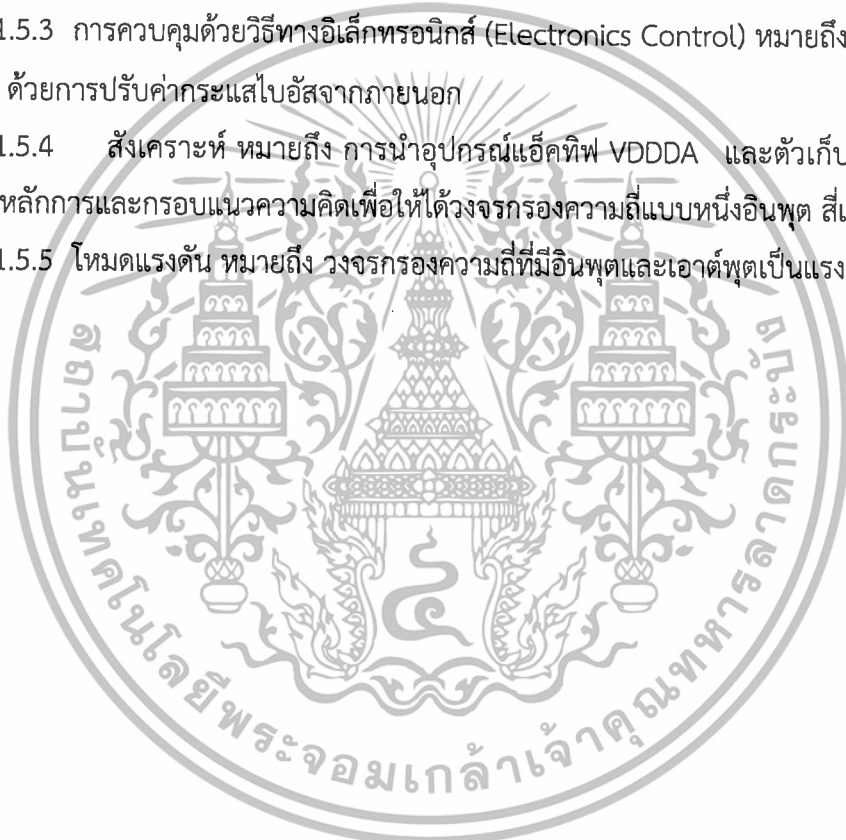
1.5.1 วงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต (Voltage Differential Differencing Different Amplifier : VDDDA) หมายถึง เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มี 6 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วแรงดันขาเข้า 4 ขั้วคือ  $V_+$ ,  $V_-$ ,  $V_n$ , และ  $V_p$  มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ขั้วกระแสขาออก คือ  $I_z$  มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และขั้วแรงดันขาออก  $W$  มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

1.5.2 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ หมายถึง วงจรกรองที่สามารถให้การตอบสนองฟังก์ชันการทำงานได้หลายรูปแบบได้แก่ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำ และกรองหยุดแถบความถี่โดยใช้โครงสร้างวงจรเดียวกัน

1.5.3 การควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Control) หมายถึง วิธีการปรับ  $\omega_0$  และ  $Q$  ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสจากภายนอก

1.5.4 สิ่งเคราะห์ หมายถึง การนำอุปกรณ์แอ็คทีฟ VDDDA และตัวเก็บประจุมาต่อร่วมกันตามหลักการและกรอบแนวความคิดเพื่อให้ได้วงจรกรองความถี่แบบหนึ่งอินพุต สี่เอาต์พุต

1.5.5 โหมดแรงดัน หมายถึง วงจรกรองความถี่ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นแรงดัน



## บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองความถี่ตั้งหัวข้อต่อไปนี

- 2.1 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่
- 2.2 ความไวของตัวอุปกรณ์ในวงจรกรองความถี่
- 2.3 หลักการทำงานของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต
- 2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่ (จีสูดา โกษียาภรณ์. 2551 : 161)

การออกแบบทางความถี่วิทยุและสัญญาณผสมนั้นมีหลักการที่สำคัญคือ การออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณให้ความถี่เฉพาะที่ต้องการใช้ให้ผ่านออกมาได้เท่านั้น ส่วนความถี่อื่นที่ไม่ต้องการจะไม่สามารถผ่านออกมาได้โดยจะถูกลดทอน (Attenuation) จนหมดไปหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การกรองสัญญาณความถี่เพื่อเลือกสัญญาณความถี่ที่ต้องการหรือตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออก ซึ่งในการทำงานของวงจรลักษณะนี้จะเรียกว่าวงจรกรองความถี่ ดังนั้นวงจรกรองความถี่หมายถึง วงจรวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่กรองแยกส่วนประกอบของสัญญาณความถี่เฉพาะที่ต้องการให้ผ่านออกมาได้เท่านั้น ส่วนความถี่อื่นที่อยู่นอกเงื่อนไขการต่อการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองจะถูกกำจัดหรือลดทอนให้เบาบางลงจนหมดไป ตัวอย่างการใช้งานวงจรกรองความถี่ เช่น สามารถใช้กรองสัญญาณรบกวน กรองเอาสัญญาณข่าวสารออกจากคลื่นพาหะในระบบวิทยุและวิทยุโทรทัศน์ วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่ตามหลักการทำงานของวงจรและการเลือกใช้อุปกรณ์ในการสังเคราะห์และออกแบบได้สองประเภทคือ แบบแพสซีฟ (Passive Filter) และแบบแอคทีฟ (Active Filter) (จีสูดา โกษียาภรณ์. 2551 : 161)

#### 2.1.1 วงจรกรองความถี่แบบแพสซีฟ

เป็นวงจรกรองความถี่ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายนอก เพื่อเป็นพลังงานให้แก่วงจรและเป็นวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ ตัวต้านทาน (Resistor : R) ขดลวดตัวเหนี่ยวนำ (Inductor : L) และตัวเก็บประจุ (Capacitor : C) ทำงานร่วมกัน โดยออกแบบในลักษณะของวงจรเครือข่ายมีพอร์ตขั้วอินพุตทำหน้าที่รับสัญญาณและพอร์ตขั้วเอาต์พุตทำหน้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายสัญญาณออกโดยให้มีชนิดฟังก์ชันการกรองสัญญาณความถี่ทำงานตามวิธีการสังเคราะห์และการออกแบบวงจร

### 2.1.2 วงจรกรองความถี่แบบแอกทิฟ (มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2544)

เป็นวงจรกรองความถี่ที่อาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกเพื่อใช้ในการทำงาน โดยการใช้สังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อุปกรณ์แพสซีฟ R , L และ C ซึ่งทำงานร่วมกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆที่สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรขยายได้ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ต่างๆ วงจรขยายเชิงดำเนินการ หรือ ออปแอมป์ (Operation Amplifier : Op-Amp) วงจรขยายความนำ หรือ โอทีเอ (Operational Transconductance Amplifier : OTA) ทำให้วงจรกรองความถี่แบบแอกทิฟมีจุดเด่นกว่าวงจรกรองความถี่แบบแพสซีฟดังนี้ (มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2544)

2.1.2.1 สามารถขยายสัญญาณเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณที่สูญเสียได้

2.1.2.2 มีราคาถูกกว่าแบบแพสซีฟเนื่องจากการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำให้ได้ตามต้องการใช้งานจะมีต้นทุนสูงและสร้างได้ยากกว่า

2.1.2.3 สามารถสังเคราะห์ออกแบบให้ปรับค่าการตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ง่ายด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์

2.1.2.4 สามารถสังเคราะห์และออกแบบให้ตอบสนองฟังก์ชันกรองความถี่ได้หลายหน้าที่ในโครงสร้างเดียวกัน

2.1.2.5 สามารถพัฒนาสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่ายและประหยัดพื้นที่ภายในชิป

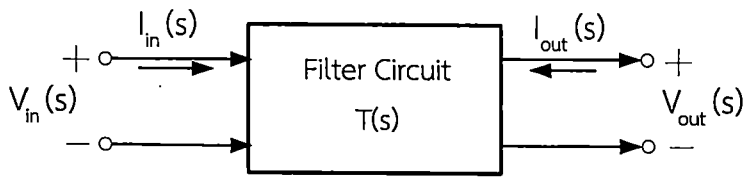
2.1.2.6 สามารถนำมาต่อคาสเคดใช้งานในลำดับสูงขึ้นได้ง่ายกว่า

อย่างไรก็ตามการกรองความถี่แบบแอกทิฟก็ยังมีข้อจำกัดเมื่อเทียบกับแบบแพสซีฟ คือ วงจรกรองความถี่แบบแอกทิฟมีความสามารถในการตอบสนองย่านความถี่ได้แคบกว่าแบบแพสซีฟ เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์แอกทิฟ

### 2.1.3 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรกรองความถี่ (ศุภชัย คลังทอง. 2554 : 43-51)

วงจรกรองความถี่ หรือ วงจรเลือกความถี่จัดเป็นวงจรแบบสองพอร์ตที่ให้ลักษณะสเปคตรัมของสัญญาณอินพุตก่อรูปเป็นสเปคตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่ตามที่ต้องการ กล่าวคือ วงจรกรองความถี่จะทำหน้าที่กรองแยกสัญญาณที่ต้องการออกมาจากสัญญาณที่ไม่ต้องการ คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่นั้นจะพิจารณาในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณซึ่งมีทั้งอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเป็นหลัก การวิเคราะห์วงจรจะพิจารณาการทำงานตลอดทั้งย่านความถี่มากกว่าพิจารณาเพียงความถี่เดียว ซึ่งในการพิจารณานี้เรียกว่าการพิจารณาในรูปแบบของโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และเรียกผลตอบสนองจากการพิจารณาโดเมนความถี่นี้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) แทนสัญลักษณ์ด้วย  $T(s)$  โดยทั่วไปแสดงในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาณระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุตซึ่งปริมาณนี้เป็นได้ทั้งกระแสหรือแรงดัน (ศุภชัย คลังทอง. 2554 : 43-51)



รูปที่ 2.1 วงจรกรองความถี่แบบ 2 พอร์ต

จากรูปที่ 2.1 สมการถ่ายโอน (Transfer Function) หรือ  $T(s)$  เป็นอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุตของโดเมนความถี่ หรือ  $V_{out}(s)/V_{in}(s)$  โดยลักษณะของเครือข่ายฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ เป็นอัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุต สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (2.1)$$

ดังนั้น

$$V_{out}(s) = T(s)V_{in}(s) \quad (2.2)$$

เนื่องจาก  $s$  มีค่าเท่ากับ  $\sigma + j\omega$  เมื่อวิเคราะห์วงจรภายใต้สถานะคงตัวที่อินพุตเป็นคลื่นไซน์  $\sigma$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้น  $s = j\omega$  จะสามารถเขียนสมการในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้

$$|V_{out}(j\omega)| = |T(j\omega)| |V_{in}(j\omega)| \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\phi_{out(j\omega)}$ ,  $\phi_{T(j\omega)}$  และ  $\phi_{in(j\omega)}$  คือค่าเฟสของ  $V_{out}(j\omega)$ ,  $T(j\omega)$  และ  $V_{in}(j\omega)$  ตามลำดับเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกันแล้วจะได้

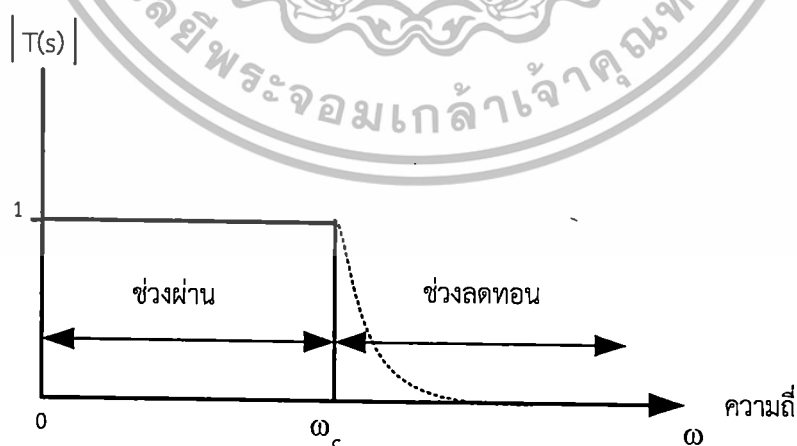
$$\phi_{out(j\omega)} = \phi_{T(j\omega)} + \phi_{in(j\omega)} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.3) พิจารณาขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะได้เท่ากับผลคูณขนาดของสัญญาณอินพุตกับขนาดของผลตอบสนองความถี่ของวงจร ดังนั้นถ้ากำหนดให้ฟังก์ชันขนาดของผลตอบสนองเชิงความถี่  $|T(j\omega)|$  เท่ากับศูนย์ (ในทางอุดมคติ) ดังนั้นในช่วงความถี่ตั้งแต่  $\omega_1$  ถึง  $\omega_2$  ขนาดของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต  $|V_{out}(j\omega)|$  จะเท่ากับศูนย์ เรียกว่าช่วงแถบหยุด (Stop Band) ของวงจรกรองความถี่ ในลักษณะเดียวกันถ้ากำหนดให้ฟังก์ชันขนาดของผลตอบสนองเชิงความถี่  $|T(j\omega)|$  เท่ากับหนึ่ง (ในทางอุดมคติ) ในช่วงความถี่ตั้งแต่  $\omega_1$  ถึง  $\omega_2$  ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต  $|V_{out}(j\omega)|$  ก็จะมีค่าเท่ากับหนึ่งเป็นไปตามสมการ (2.3) ซึ่งเรียกว่าช่วงแถบผ่าน (Pass Band) วงจรกรองเลือกความถี่ สามารถแบ่งประเภทตามหน้าที่โดยอาศัยคุณลักษณะของช่วงแถบผ่านความถี่หรือช่วงแถบหยุดความถี่ ซึ่งจะเกิดจากผลตอบสนองของฟังก์ชันหรือขนาดของ  $|T(j\omega)|$  ที่แตกต่างกันกันของวงจรดังต่อไปนี้คือ

### 2.1.3.1 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณไฟตรงไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย  $\omega_c$  ความถี่คัตออฟคือ อัตราการตอบสนองความถี่หรืออัตราขยายซึ่งเป็นอัตราส่วนของเอาต์พุตต่ออินพุตของวงจรมีค่าเป็น 0.707 เท่า หรือ  $20\text{Log}(0.707) = -3$  เดซิเบล ของการตอบสนองหรืออัตราขยายปกติ คือ หนึ่งเท่า  $20\text{Log}(1) = 0$  เดซิเบล บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน  $\omega_c$  ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมากแสดงในรูปที่ 2.2 เส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติส่วนเส้นประแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริงในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่าช่วงผ่านความถี่และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่าช่วงลดทอนความถี่

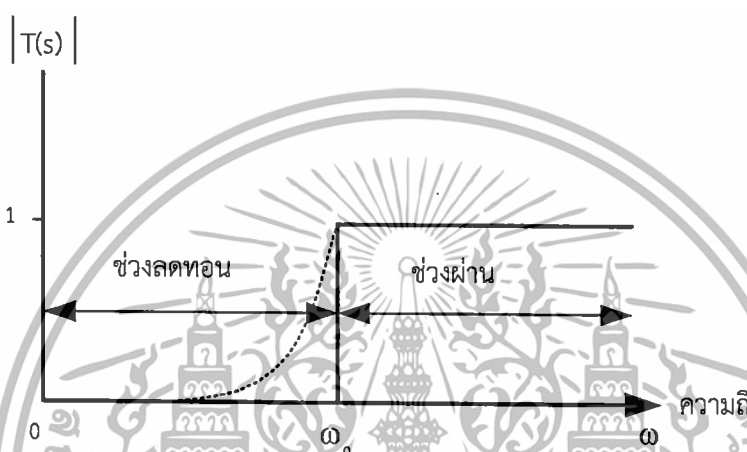


รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองความถี่วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.2 วงจรกรองผ่านความถี่สูง

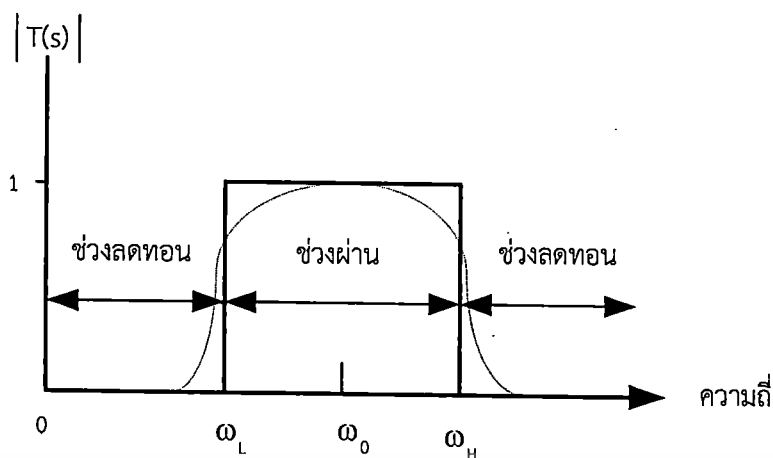
วงจรกรองผ่านความถี่สูงจะทำการลดทอนสัญญาณในช่วงที่มีความถี่ต่ำและยอมให้ผ่านได้ เฉพาะสัญญาณในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัตออฟ  $\omega_c$  โดยในช่วงความถี่สูงนั้นจะมีอัตราการตอบสนองความถี่คงที่ถ้ามีความถี่ที่ต่ำกว่า  $\omega_0$  ผ่านวงจรจะถูกลดทอนขนาดของสัญญาณความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมากแสดงในรูปที่ 2.3 เส้นที่บจะแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้นประจะแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริงในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้และช่วงที่ลดทอนความถี่



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองความถี่วงจรกรองผ่านความถี่สูง

### 2.1.3.3 วงจรกรองผ่านแถบความถี่

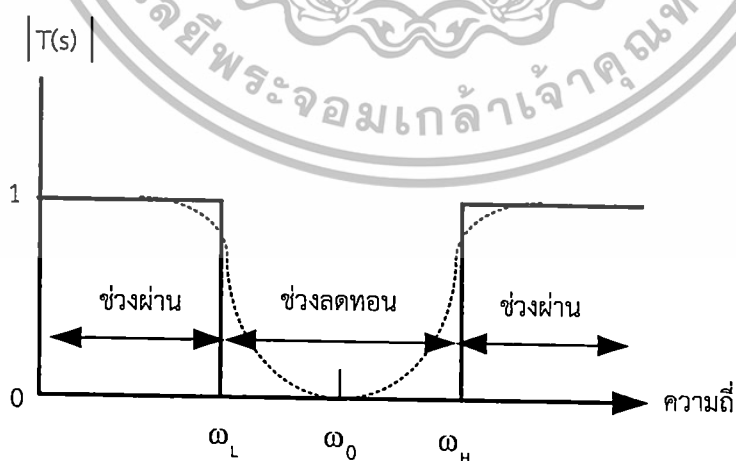
วงจรกรองผ่านแถบความถี่ เป็นวงจรที่ยอมให้แถบความถี่ผ่านได้ในบางช่วงส่วนความถี่ที่นอกเหนือจากนั้นจะถูกลดทอนไปวงจรแบบนี้จะเป็นการรวมเอาคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำ ผ่านกับวงจรกรองความถี่สูงผ่านทำงานร่วมกัน โดยในช่วงลดทอนแรกจะเป็นการกำหนดความถี่ช่วงเริ่มต้นผ่าน  $\omega_L$  และในช่วงลดทอนหลังจะเป็นการให้ความถี่ช่วงปลายที่กำหนดให้ไม่สามารถผ่านไปได้  $\omega_H$  โดยสัญญาณความถี่ทางด้านเอาต์พุตช่วง  $\omega_L$  และ  $\omega_H$  ถูกกำหนดฟังก์ชันขนาดของผลตอบสนองเชิงความถี่  $|T(j\omega)|$  ให้เท่ากับหนึ่ง (ตามอุดมคติ) ซึ่งขนาดของสัญญาณเอาต์พุต  $|V_{out}(j\omega)|$  ก็จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง (ตามอุดมคติ) เรียกว่าช่วงแถบความถี่ผ่านแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองความถี่วงจรรองผ่านแถบความถี่

#### 2.1.3.4 วงจรรองหยุดแถบความถี่

วงจรรองหยุดแถบความถี่ เป็นวงจรแบบที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเฉพาะช่วง  $\omega_L$  และ  $\omega_H$  เท่านั้นวงจรแบบนี้จะมีทำงานในทิศทางตรงข้ามกับวงจรรองผ่านแถบความถี่ คือจำกัดไม่ให้อัตราสัญญาณผ่านในช่วงของของความถี่ โดยสัญญาณความถี่ทางด้านเอาต์พุตช่วง  $\omega_L$  และ  $\omega_H$  เป็นผลคูณของขนาดสัญญาณทางด้านอินพุตกับขนาดของผลตอบสนองความถี่ของวงจร ดังนั้นถ้ากำหนดให้ฟังก์ชันขนาดของผลตอบสนองเชิงความถี่  $|T(j\omega)|$  เท่ากับศูนย์ (ตามอุดมคติ) ขนาดของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต  $|V_{out}(j\omega)|$  ก็จะเท่ากับศูนย์เรียกว่าช่วงลัดทอนหรือแถบหยุดความถี่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองความถี่วงจรรองหยุดแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ (อัจฉราวรรณ เนิ่งนิตย์. 2546 : 19-29)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้าและวิจัยวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สามารถให้ฟังก์ชันการทำงานหลายรูปแบบในโครงสร้างวงจรเดียวกันเช่น ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ และ ฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่ ซึ่งจะมีค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ (Quality Factor) แทนสัญลักษณ์ด้วย Q เป็นดัชนีชี้ให้เห็นขีดความสามารถในการเลือกความถี่ยิ่งค่า Q มีค่าสูงจะส่งผลให้วงจรมีขีดความสามารถในการเลือกความถี่ได้คมมากขึ้นตามไปด้วย วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ซึ่งทำงานในวงจรที่มีโครงสร้างเดียวกันเราเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรกรองความถี่แบบไบควอดตราติก (Biquadratic Filter) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบ ไบควอดตราติก (Biquadratic Function) เรียกสั้นๆว่า“ไบควอด”จะมีรูปแบบมาตรฐานเป็นดังต่อไปนี้ (อัจฉราวรรณ เนิ่งนิตย์. 2546 : 19-29)

$$T(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\omega_0$  คือ ค่าความถี่ของโพล (Pole Frequency)

$a_0, a_1, a_2$  คือ สัมประสิทธิ์ของจำนวนเศษ

Q คือ ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของโพล (Pole Quality Factor)

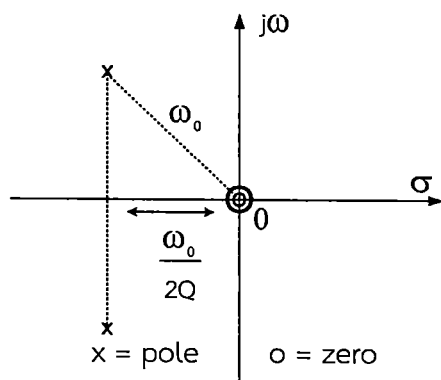
พิจารณาสมการ (2.5) สามารถหาค่าซีโร (Zero) ของฟังก์ชันการถ่ายโอนอันดับสองได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของจำนวนเศษ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงชนิดของวงจรกรองความถี่ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.4.1 กรณีค่าซีโรของทั้งสองของสมการมีตำแหน่งบนระนาบ s (s-plane) ที่  $s=0$  ดังรูปที่ 2.7 จากสมการ (2.5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองผ่านความถี่สูงอันดับสองโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

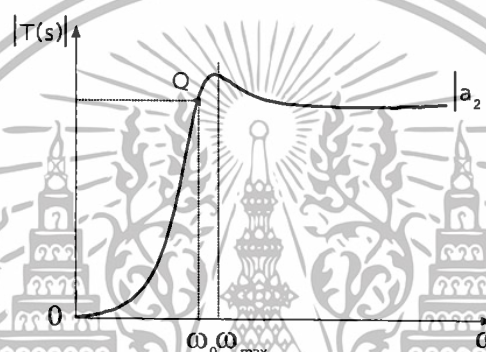
$$T(s) = \frac{a_2 s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้  $a_2$  คือ อัตราขยายความถี่สูง (High-frequency Gain) และ  $\omega_0$  คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) จะได้กราฟตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ  $s$  ฟังก์ชันกรองความถี่สูงอันดับสอง



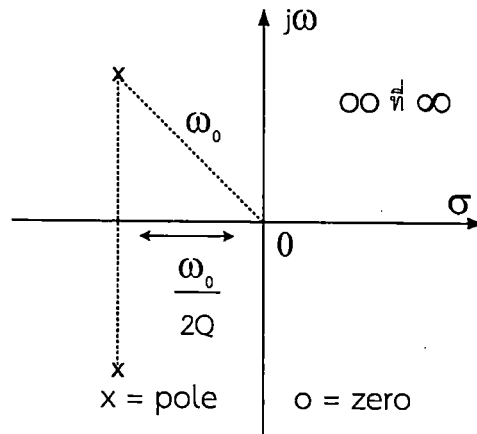
รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูงอันดับสอง

2.1.4.2 กรณีที่ค่าซีโรทั้งสองของสมการมีตำแหน่งบนระนาบ  $s$  ที่  $s = \infty$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากสมการ (2.5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสองโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

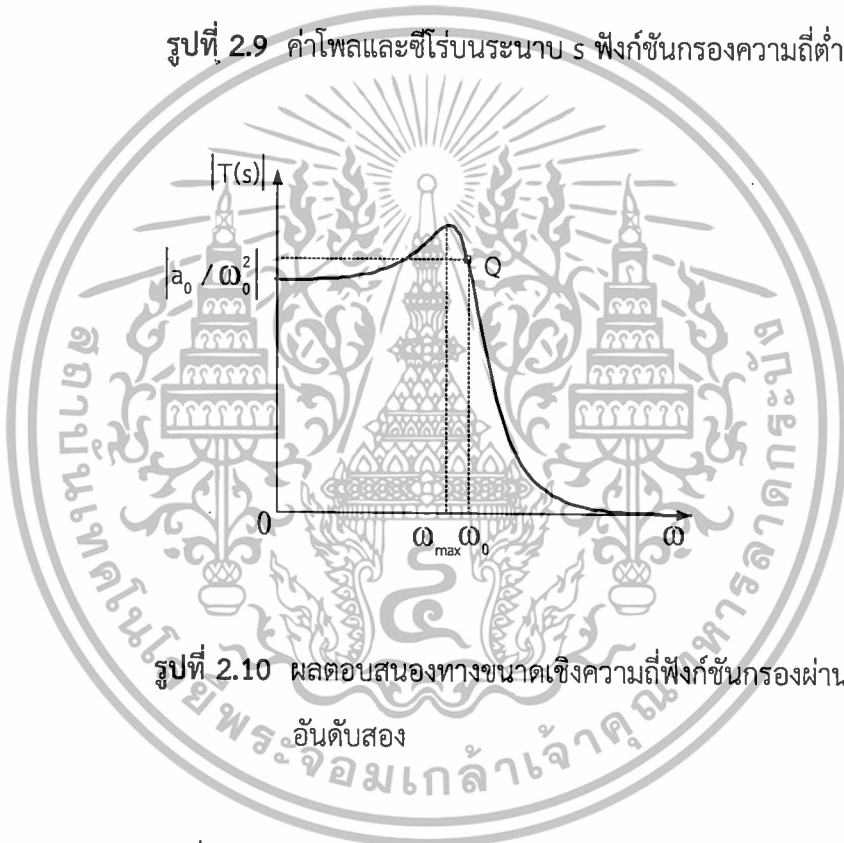
$$T(s) = \frac{a_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.7)$$

ให้  $a_0 / \omega_0^2$  คือ ค่าอัตราขยายไฟตรง (DC Gain) จะได้กราฟตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ s ฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำอันดับสอง



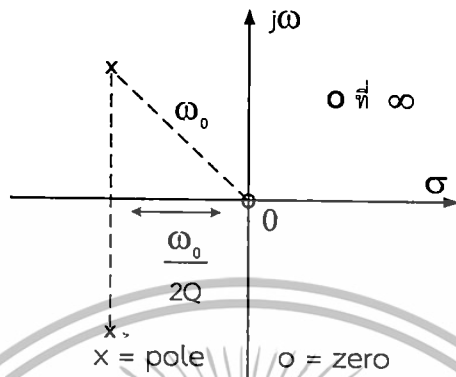
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสอง

2.1.4.3 ในกรณีที่ค่าซีโรของสมการมีตำแหน่งบนระนาบ s ที่  $s=0$  หนึ่งตำแหน่งและอีกทางหนึ่งตำแหน่งที่  $s = \infty$  ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จากสมการ (2.5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองผ่านแถบความถี่อันดับสองโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

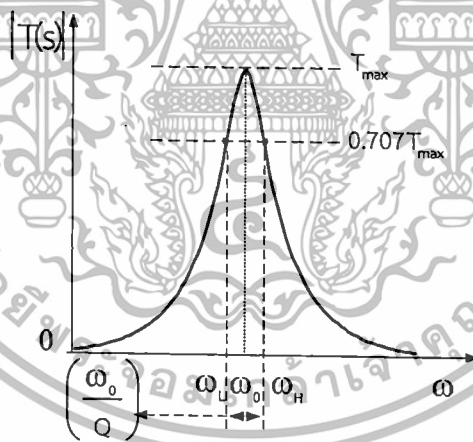
$$T(s) = \frac{a_1 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $a_1Q / \omega_0$  เป็นอัตราขยายที่ความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency Gain) และให้ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่มีค่าสูงสุด (Peak) ที่  $\omega = \omega_0$  หรือค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรมีค่าเท่ากับค่าความถี่โพลของสมการกราฟตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ค่าโพลและซีโรว์บนระนาบ s ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง

2.1.4.4 กรณีที่ค่าซีโรว์ของสมการมีตำแหน่งอยู่บนแกน  $j\omega$  ของระนาบ  $s$  รูปที่ 2.13 จากสมการ (2.5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองหยุดแถบความถี่อันดับสองโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

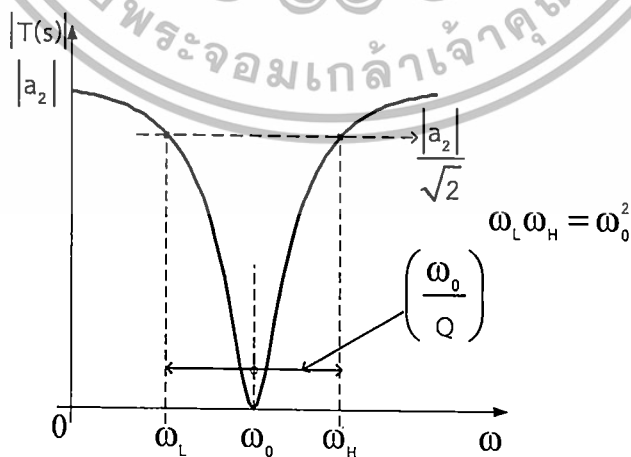
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(s) = a_2 \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \tag{2.9}$$

ค่าอัตราขยายความถี่สูงของวงจรมีค่าเท่ากับ  $a_2$  กราฟตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ของวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.14 และค่า  $\omega_0$  นี้เป็นที่รู้จักกันอีกชื่อหนึ่งว่าความถี่นอตช์ (Notch Frequency)



รูปที่ 2.13 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ  $s$  ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่อันดับสอง



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

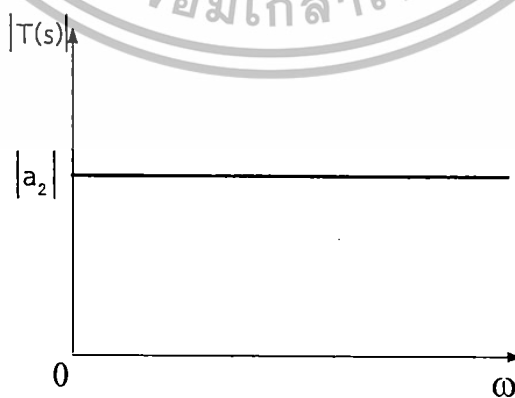
2.1.4.5 กรณีที่ค่าซีโรของสมการทั้งสองค่ามีตำแหน่งอยู่ทางด้านขวาของระนาบ  $s$  โดยมีความสมมาตรกับโพลดังแสดงในรูปที่ 2.15 จากสมการ (2.5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองผ่านทุกความถี่อันดับสองโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$T(s) = a_2 \frac{s^2 - \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (2.10)$$

และ  $|a_2|$  คือ ค่าอัตราขยายแบนราบ (Flat Gain) ของวงจรจะมีกราฟการตอบสนองทางขนาดและเฟสเชิงความถี่ของวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 ตามลำดับ

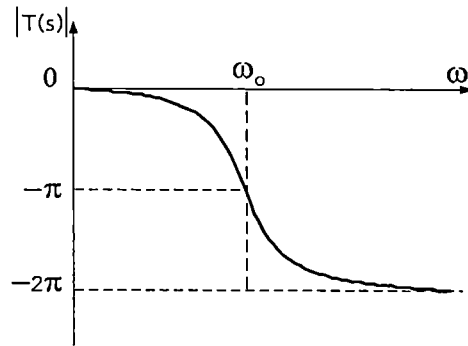


รูปที่ 2.15 ค่าโพลและซีโรบนระนาบ  $s$  ของฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองทางขนาดเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆของเอกสารนี้โดยไม่แจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองทางเฟสเชิงความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านทุกความถี่อันดับสอง

## 2.2 ความไวของตัวอุปกรณ์ในวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่ที่มีคุณภาพจะต้องมีความไวของตัวอุปกรณ์ต่ำมีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดน้อยดังนั้นในการวิเคราะห์หาค่าความไวของอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นของการออกแบบวงจรกรองความถี่ เมื่อ  $T(s)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนหลักของวงจรและ  $X_i$  คือ ตัวอุปกรณ์ในวงจร เช่น  $R$ ,  $C$ ,  $K$ , และอื่นๆ สามารถหาความไวของตัวอุปกรณ์ได้ดังนี้ (ศุภชัย คลังทอง, 2554 : 56-57)

$$S_{X_i}^T = \frac{\Delta T / T}{\Delta X / X} = \frac{X \Delta T}{T \Delta X} \quad (2.11)$$

ซึ่ง  $\Delta T = T(s, X + \Delta X) - T(s, X)$  และ  $S_{X_i}^T$  คือค่าความไวของการเปลี่ยนแปลง  $T$  สาเหตุจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $X$  โดยปกติ ถ้าขยายค่า  $\Delta T$  แบบอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) ด้วยค่า  $\Delta X$  ที่ต่ำจะได้สมการใหม่เป็น

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial X} \Delta X = X \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\Delta X}{X} \quad (2.12)$$

เมื่อทำการ Normalize สมการ (2.12) ด้วยการหาร  $T$  ทั้งสองข้างจะได้

$$S_{X_i}^T = \frac{\partial T / T}{\partial X / T} = \frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln X)} \cong \frac{X \Delta T}{T \Delta X} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสมการ (2.13) มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการหาค่าความไวของตัวอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆในบางกรณีก็สามารถเขียนฟังก์ชันการถ่ายโอนได้เป็น

$$T(S, X) = \frac{N(S, X)}{D(S, X)} \quad (2.14)$$

แทนสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.13) จะได้

$$S_{X_i}^T = \left( \frac{X}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{DN' - DN}{D} \left( X \frac{D}{N} \right) = X \left( \frac{N'}{N} - \frac{D'}{D} \right) \quad (2.15)$$

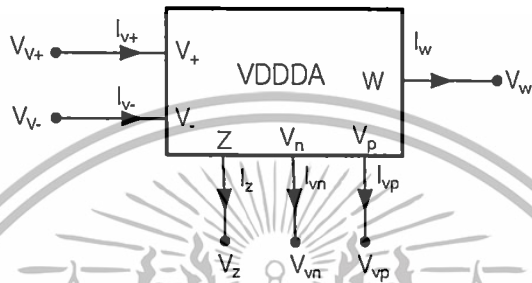
โดยที่  $N' = \frac{\partial N}{\partial X}$  และ  $D' = \frac{\partial D}{\partial X}$  นำมาเขียนสมการรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$S_{X_i}^T = S_{X_i}^N - S_{X_i}^D \quad (2.16)$$

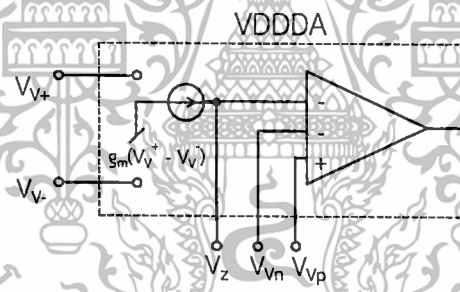
## 2.3 หลักการทำงานของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต

วงจรรวมสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์และออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณในวิทยานิพนธ์นี้ คือ VDDDA เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มี 6 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วแรงดันขาเข้า 4 ขั้วคือ  $V_+$ ,  $V_-$ ,  $V_n$  และ  $V_p$  มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ขั้วกระแสขาออก คือ  $I_z$  มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และขั้วแรงดันขาออก  $W$  มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และเขียนอธิบายเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และมีโครงสร้างภายในของ VDDDA แสดงในรูปที่ 2.20 คุณสมบัติเด่น คือ เป็นวงจรที่ทำงานได้ในโหมดแรงดันและกระแส อีกทั้งยังสามารถปรับค่าอัตราขยายแรงดันโดยการปรับอัตราขยายความนำถ่ายโอน (Transconductance :  $g_m$ ) ด้วยการแปรค่ากระแสไบอัสจากภายนอก ( $I_b$ ) จึงสามารถนำมาสังเคราะห์และออกแบบวงจรให้ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยโครงสร้างภายในของ VDDDA จะมีวงจรขยายความนำและวงจรผลต่างแรงดันทำงานร่วมกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ VDDDA อธิบายในสมการ (2.17)

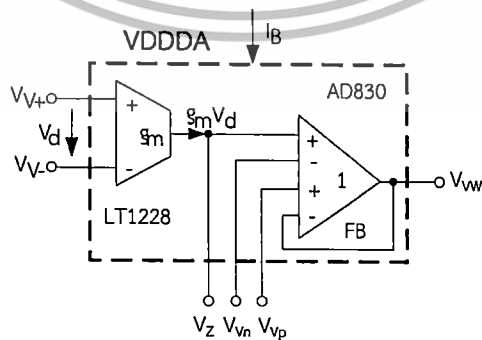
$$\begin{pmatrix} I_{V+} \\ I_{V-} \\ I_Z \\ I_n \\ I_p \\ V_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m & -g_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_+ \\ V_- \\ V_Z \\ V_n \\ V_p \\ I_W \end{pmatrix} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลย์ของวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 2.20 โครงสร้างวงจรขยายผลต่างแรงดันเอาต์พุตใช้วงจรรวมเบอร์

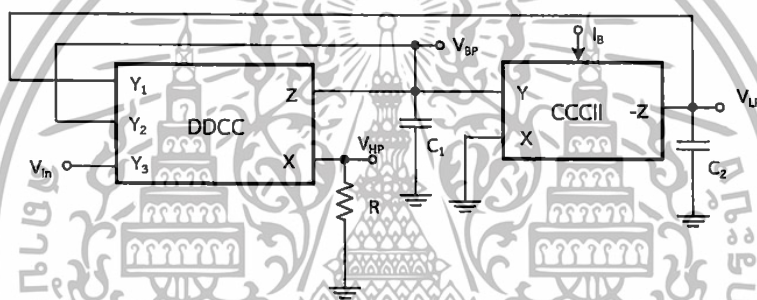
LT1228 และ AD830

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่มีผู้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุตโดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปในการออกแบบวงจรมีดังนี้

Maneewan, Sreewirote and Jaikla (2011 : 322-326) ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูป DDCC จำนวน 1 วงจรและ CCCII จำนวน 1 วงจร เป็นอุปกรณ์แอ็กทิฟทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ 2 ตัว และ ตัวต้านทาน 1 ตัว สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ดังนี้ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ มีจุดเด่นของวงจร คือ อุปกรณ์แพสซีฟต่อลงกราวด์ อินพุตอิมพีแดนซ์สูง ค่าพารามิเตอร์  $\omega_0$  และ  $Q$  สามารถปรับได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุตโดยใช้ DDCC และ CCCII

จากวงจรรูปที่ 2.21 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุตโดยใช้ DDCC และ CCCII สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติแสดงดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R R_x}} \quad (2.18)$$

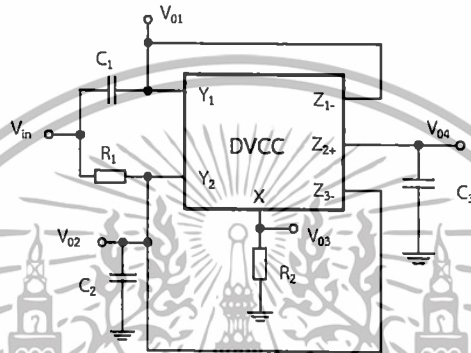
และสมการควอลิตี้แฟกเตอร์จะได้

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R}{C_2 R_x}} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปที่ 2.21 มีข้อจำกัดของวงจรดังนี้ ใช้อุปกรณ์แพสซีฟโดยเฉพาะตัวต้านทานซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

Hong (2012 : 153-162) ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ยกระดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูป DVCC จำนวน 1 วงจร ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ 2 ตัวและตัวต้านทาน 3 ตัว สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ดังนี้คือ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ และกรองหยุดแถบความถี่ มีจุดเด่นของวงจรคือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียง 1 ตัว มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ยกระดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุตโดยใช้ DVCC

จากรูปที่ 2.22 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ยกระดับสองโหมดแรงดันหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้ DVCC โดย  $G_1 = \frac{1}{R_1}$ ,  $G_2 = \frac{1}{R_2}$  สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติแสดงดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad (2.20)$$

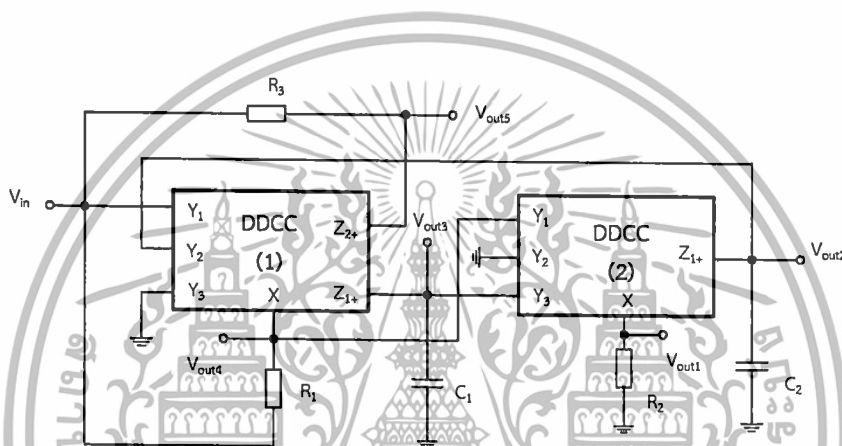
จะได้สมการควอลิตี้แฟกเตอร์

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 G_1 G_2}}{C_2 G_2 + C_1 (G_1 - G_2)} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปที่ 2.22 มีข้อจำกัดของวงจรดังนี้ ใช้อุปกรณ์แพสซีฟจำนวนมากและอุปกรณ์แพสซีฟที่ใช้ไม่ได้ต่อลงกราวด์จึงไม่เหมาะที่จะนำมาสร้างวงจรรวม อินพุตอิมพีแดนซ์ไม่สูงและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่ต่ำจึงไม่สะดวกที่จะนำไปต่อคาสเคด ไม่สามารถควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

Chiu and Horng (2011 : 97-101) ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปชนิด DDCC จำนวน 2 วงจร ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ 2 ตัวและตัวต้านทาน 3 ตัว สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ดังนี้ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองหยุดแถบความถี่ และกรองผ่านทุกความถี่ มีจุดเด่นของวงจรคือ สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ทุกฟังก์ชัน มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCs

จากรูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต โดยใช้ DDCC สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติแสดงดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.22)$$

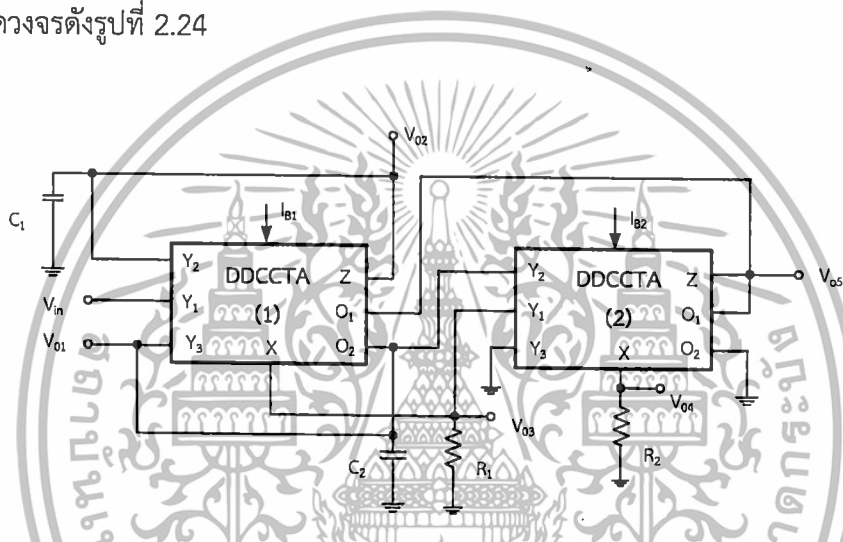
และสมการควอลิตี้แฟกเตอร์จะได้

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 R_2}{C_1 R_1}} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปที่ 2.23 มีข้อจำกัดของวงจรดังนี้ ใช้อุปกรณ์แพสซีฟรวมเป็นจำนวนมากและ อุปกรณ์แพสซีฟไม่ต่อลงกราวด์ไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม อินพุตอิมพีแดนซ์ไม่สูง เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่ต่ำจึงไม่สะดวกที่จะนำไปต่อคาสเคด

Channumsin, Pukkalanun and Tangsrirat. (2012) ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมตแรงดันหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปชนิด DDCCTA จำนวน 2 วงจร ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ 2 ตัว และ ตัวต้านทาน 2 ตัว สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ดังนี้ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองหยุดแถบความถี่และกรองผ่านทุกความถี่ มีจุดเด่นของวงจรคือสามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ทุกความถี่ อินพุตอิมพีแดนซ์สูง ค่าพารามิเตอร์  $\omega_0$  และ Q สามารถปรับได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมตแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCTA

จากวงจรรูปที่ 2.24 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมตแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุตโดยใช้ DDCCTA สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติแสดงดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}}{R_1 C_1 C_2}} \quad (2.24)$$

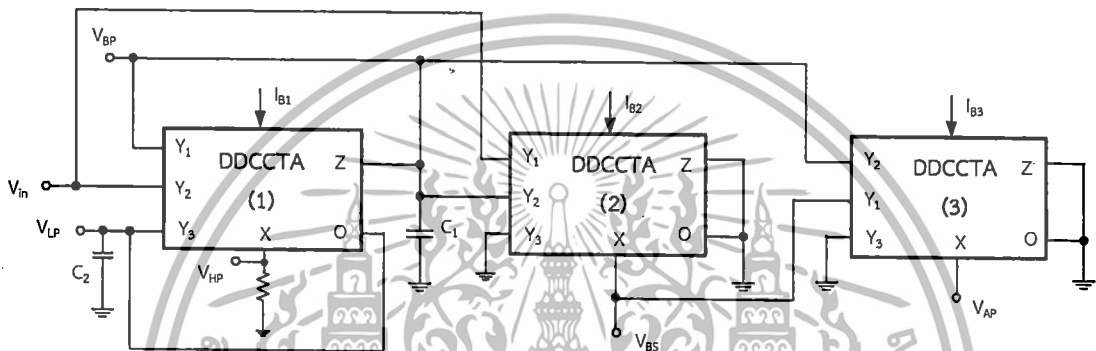
และสมการควอลิตี้แฟกเตอร์จะได้

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m1} R_1 C_1}{C_2}} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปที่ 2.24 มีข้อจำกัดของวงจรดังนี้ ใช้อุปกรณ์แพสซีฟรวมเป็นจำนวนมาก ไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

Channumsin, and Tangsirat (2013) ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปชนิด DDCCTAs จำนวน 3 วงจร ร่วมกับตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวต้านทาน 1 ตัว สามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ดังนี้ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองหยุดแถบความถี่และกรองผ่านทุกความถี่ มีจุดเด่นของวงจรคือสามารถสังเคราะห์ฟังก์ชันกรองความถี่ได้ทุกความถี่ อินพุตอิมพีแดนซ์สูง ค่าพารามิเตอร์  $\omega_0$  และ  $Q$  สามารถปรับได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.25 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCTAs

จากวงจรรูปที่ 2.25 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้ DDCCTAs สามารถเขียนสมการความถี่ธรรมชาติแสดงดังนี้

$$\omega_0 = \frac{g_{m1}}{\sqrt{R_1 C_1 C_2}} \quad (2.26)$$

และสมการควอลิตี้แฟกเตอร์จะได้

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m1} R_1 C_1}{C_2}} \quad (2.27)$$

จากวงจรรูปที่ 2.25 มีข้อจำกัดของวงจรดังนี้ ใช้อุปกรณ์แอ็กทีฟรวมเป็นจำนวนมาก ใช้  
อุปกรณ์แพสซีฟรวมเป็นจำนวนมาก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไปแล้ว ในบทนี้กล่าวถึงการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่หลายหน้าที่ โดยใช้ VDDDA มีแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 แสดงวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งเริ่มต้นที่ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะสังเคราะห์วิเคราะห์และออกแบบว่ามีจุดเด่นและข้อจำกัดอย่างไรบ้าง ซึ่งในส่วนนี้ได้ดำเนินการมาแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะดำเนินการสังเคราะห์ วิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต โดยเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตสมรรถนะของวงจรที่จะออกแบบให้ได้ตามที่ต้องการแล้วจึงทำการสังเคราะห์ วิเคราะห์และออกแบบวงจร จากนั้นจึงใช้โปรแกรม PSPICE จำลองการทำงานของวงจรที่ได้ และต่อวงจรจริงวัดผลตอบสนองต่าง ๆ ของวงจร เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรที่ได้สังเคราะห์และออกแบบ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์แก้ไขปรับแต่งโครงสร้างวงจรเพื่อให้ได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้รวมทั้งอภิปรายผลการจำลองของวงจร จากนั้นจึงนำวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับวงจรอื่นที่มีผู้วิจัยได้นำเสนอไว้ ในส่วนของผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรทั้งหมดและผลการต่อวงจรจริงนั้นจะแสดงในบทที่ 4 และบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 3.1 การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต

กรอบแนวความคิดและวิธีการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียสองตัวต่อร่วมกับวงจรรวมสัญญาณอีกสองตัว โดยวางบล็อกไดอะแกรมต่อกันเพื่อให้ได้สมการลักษณะคุณสมบัติกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองและผลตอบสนองทางเอาต์พุตประกอบด้วยฟังก์ชันการกรองดังนี้ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ และฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ ซึ่งงานวิจัยนี้้นำพื้นฐานมาจากกรอบแนวคิดที่แสดงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1.1 มาประยุกต์สร้างเป็นวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง และสามารถควบคุมความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์โดยมีรายละเอียดการหาสมการเอาต์พุตดังนี้

จากรูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่ สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการลักษณะคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาที่จุด  $V_{HP}$  จะได้สมการลักษณะคุณสมบัติดังนี้

$$V_{HP} = V_{LP} - V_{in} + V_{BP} \quad (3.1)$$

พิจารณาที่จุด  $V_{BP}$  จะได้สมการลักษณะคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = -\frac{V_{HP}}{s\tau_1} \quad (3.2)$$

พิจารณาที่จุด  $V_{LP}$  จะได้สมการลักษณะคุณสมบัติดังนี้

$$V_{LP} = \frac{V_{BP}}{s\tau_2} \quad (3.3)$$

พิจารณาที่จุด  $V_{BR}$  จะได้สมการลักษณะคุณสมบัติดังนี้

$$V_{BR} = V_{BP} - V_{in} \quad (3.4)$$

นำสมการที่ (3.2) และ (3.3) มาแทนในสมการที่ (3.1) จะได้

$$V_{HP} = \frac{V_{BP}}{s\tau_2} - \frac{V_{HP}}{s\tau_1} - V_{in} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{HP} = \frac{-s^2\tau_1\tau_2}{s^2\tau_1\tau_2 + s\tau_2 + 1} V_{in} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันดังนี้

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{-s^2}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \quad (3.7)$$

วิเคราะห์หาสมการ  $V_{BP}$  โดยนำสมการที่ (3.5) มาแทนในสมการที่ (3.2) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = \frac{s\tau_2}{s^2\tau_1\tau_2 + s\tau_2 + 1} V_{in} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{V_{BP}}{V_{in}} = \frac{\frac{s}{\tau_1}}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \quad (3.9)$$

วิเคราะห์หาสมการ  $V_{LP}$  โดยนำสมการที่ (3.6) มาแทนในสมการที่ (3.3) จะได้

$$V_{LP} = \frac{1}{s^2\tau_1\tau_2 + s\tau_2 + 1} V_{in} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{\tau_1\tau_2}}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}} \quad (3.11)$$

วิเคราะห์หาสมการ  $V_{BR}$  โดยนำสมการที่ (3.8) มาแทนในสมการที่ (3.4) จะได้

$$V_{BR} = \frac{s\tau_2 V_{in}}{s^2\tau_1\tau_2 + s\tau_2 + 1} - V_{in} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) จัดรูปสมการใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{BR}}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}}{s^2 + \frac{s}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (3.13)$$

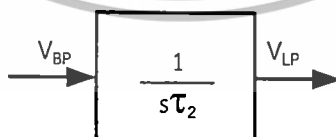
จากสมการที่ (3.7), (3.9), (3.11), (3.13) จะได้ความถี่ธรรมชาติหรือความถี่โพล (Nature Frequency :  $\omega_0$ ) และปัจจัยคุณภาพหรือควอลิตี้เฟคเตอร์ (Quality Factor : Q) ดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (3.14)$$

และ

$$Q = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (3.15)$$

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1.1 ผู้วิจัยจะมาแสดงการสังเคราะห์วงจรโดยใช้อุปกรณ์ VDDDA เป็นอุปกรณ์หลักในการสังเคราะห์วงจร เมื่อพิจารณาจากบล็อกไดอะแกรมที่ 1.1 จะพบว่า วงจรพื้นฐานในบล็อกไดอะแกรมจะมีวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ชุด อินทิเกรเตอร์ชุดแรกเป็นอินทิเกรเตอร์แบบไม่กลับเฟส อินทิเกรเตอร์ชุดที่ 2 เป็นอินทิเกรเตอร์แบบกลับเฟส และมีวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 1 และวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 2 เราจะมาสังเคราะห์วงจรโดยใช้ VDDDA เพื่อให้เห็นว่าแต่ละบล็อกสามารถที่จะสังเคราะห์โดยใช้ VDDDA ได้



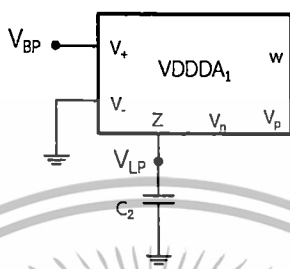
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียขดไม่กลับเฟส

จากรูปที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์สมการเอาต์พุตได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{LP} = \frac{V_{BP}}{s\tau_2} \tag{3.16}$$

จากกรอบแนวคิดตามรูปที่ 3.2 สามารถสังเคราะห์วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียโดยใช้อุปกรณ์ VDDDA เป็นอุปกรณ์แอ็กทิฟได้ดังรูปที่ 3.3



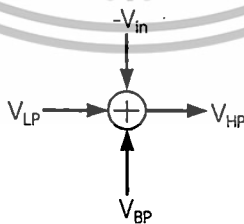
รูปที่ 3.3 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียโดยใช้ VDDDA

จากรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาที่จุด  $V_{LP}$  สามารถวิเคราะห์สมการดังนี้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1} V_{BP}}{sC_2} \tag{3.17}$$

จากสมการที่ (3.17) จะได้  $\tau_2 = \frac{C_2}{g_{m1}}$

จากรูปที่ 1.1 สามารถพิจารณาสีบบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 1 ได้ดังนี้

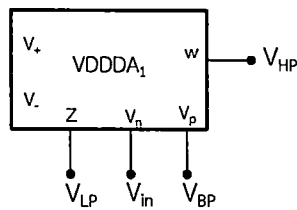


รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 1

จากรูปที่ 3.4 สามารถวิเคราะห์สมการเอาต์พุตได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ  $V_{HP} = V_{LP} - V_{in} + V_{BP}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.18) การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรอบแนวคิดรูปที่ 3.4 สามารถสังเคราะห์วงจรรวมสัญญาณชุดที่ 1 โดยใช้ VDDDA ได้ดังรูปที่ 3.5

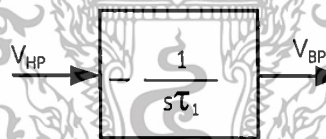


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมวงจรมงจอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย

จากรูปที่ 3.5 พิจารณาที่จุด  $V_{HP}$  สามารถวิเคราะห์สมการดังนี้

$$V_{HP} = \frac{g_{m1} V_{BP}}{sC_2} - V_{in} + V_{BP} \quad (3.19)$$

จากรูปที่ 1.1 สามารถพิจารณาบล็อกไดอะแกรมวงจรมงจอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียชนิดกลับเฟสดังนี้



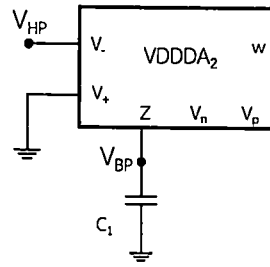
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมวงจรมงจอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียชนิดกลับเฟส

จากรูปที่ 3.6 สามารถวิเคราะห์สมการเอาต์พุต ดังนี้

$$V_{BP} = -\frac{V_{HP}}{sT_1} \quad (3.20)$$

จากกรอบแนวคิดตามรูปที่ 1.1 สามารถสังเคราะห์วงจรมงจอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสียโดยใช้อุปกรณ์ VDDDA เป็นอุปกรณ์แอ็กทิฟได้ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรอินติเกรเตอร์เทียบกับบล็อกไดอะแกรมวงจรอินติเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย

จากสมการที่ (3.20) จะได้  $\tau_1 = \frac{C_1}{g_{m2}}$

จากรูปที่ 3.7 พิจารณาที่จุด  $V_{BP}$  สามารถวิเคราะห์สมการดังนี้

$$V_{BP} = -\frac{g_{m2} V_{HP}}{sC_1} \quad (3.21)$$

จากรูปที่ 1.1 สามารถพิจารณาที่บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 2 ดังนี้



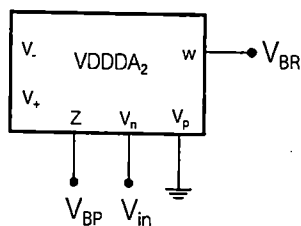
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณชุดที่ 2

จากรูปที่ 3.8 สามารถวิเคราะห์สมการเอาต์พุตได้ดังนี้

$$V_{BR} = V_{BP} - V_{in} \quad (3.22)$$

จากกรอบแนวคิดตามรูปที่ 3.8 สามารถสังเคราะห์วงจรรวมสัญญาณชุดที่ 2 โดยใช้ VDDDA ได้ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

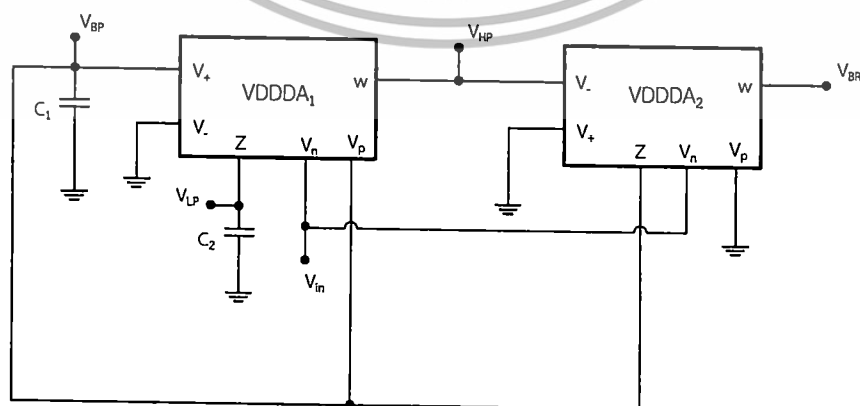


รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่เทียบกับบล็อกไดอะแกรมวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ไม่มีการสูญเสีย

จากรูปที่ 3.9 พิจารณาที่จุด  $V_{BR}$  จะได้สมการดังนี้

$$V_{BR} = \frac{g_{m2} V_{HP}}{sC_1} V_{in} \quad (3.23)$$

จากการสังเคราะห์บล็อกไดอะแกรมวงจรอินทิเกรเตอร์ประกอบไปด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิดกลับเฟสและชนิดไม่กลับเฟสอย่างละ 1 วงจรต่อรวมกับวงจรรวมสัญญาณ 2 ชุด จะได้วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันซึ่งเป็นแนวคิดในงานวิจัยในครั้งนี้นั้น การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอโดยพิจารณาเลือกใช่วงจรรวมสำเร็จรูป VDDDA จำนวน 2 วงจรและตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว ต่อลงกราวด์ โดย VDDDA ทั้งสองตัวต่อรวมกันและทำงานในโหมดแรงดัน จึงทำให้ได้การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่หนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3.10 จากวงจรในรูปที่ 3.10 จะพบว่าวงจรสามารถให้ฟังก์ชันพร้อมกันทั้งสี่ฟังก์ชันคือ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ และฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ โดยจุดที่ป้อนสัญญาณอินพุตจะมีอิมพีแดนซ์สูง



รูปที่ 3.10 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันโดยใช้ VDDDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณาวงจรขยายความนำถ่ายโอนผลแรงดัน ซึ่งประกอบไปด้วย VDDDA จำนวน 2 ตัว ทำงานในโหมดแรงดันมี 6 ขั้ว สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ได้แก่ กลุ่มที่หนึ่งขั้วแรงดันขาเข้า (ขั้ว  $V_+$  และขั้ว  $V_-$ ) กลุ่มที่สองขั้วแรงดันขาออก (ขั้ว  $W$  และขั้ว  $Z$ ) และกลุ่มสุดท้ายขั้วแรงดันควบคุม (ขั้ว  $V_n$  และ  $V_p$ ) ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุทั้งสองตัวต่อลงกราวด์

### 3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรรองความถี่กรณียุคตมคติ

การวิเคราะห์วงจรรองความถี่จากรูปที่ 3.10 วงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตโดยใช้ VDDDA จากคุณสมบัติข้างต้น สามารถแสดงด้วยสมการเมตริกซ์ตามสมการที่ (2.17) วิเคราะห์หาสมรรถนะของวงจรกรณียุคตมคติได้ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (2.17) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ VDDDA สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมรรถนะการทำงานของวงจรในทางยุคตมคติได้ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 3.10 และสมการที่ (2.17) วิเคราะห์ที่  $V_{HP}$  หรือแรงดันเอาต์พุตวงจรที่ขั้ว  $W$  ของ VDDDA<sub>1</sub> เมื่อพิจารณาแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรจะได้

$$V_{HP} = V_{Z1} - V_{n1} + V_{Z2} \quad (3.24)$$

พิจารณาแรงดันตกคร่อมที่  $C_1$  ที่ขั้ว  $V_{Z2}$  โดยใช้กฎของโอห์มซึ่งสามารถหากระแสที่ไหลผ่าน  $C_1$  ที่ขั้ว  $V_{Z2}$  คูณด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของ  $C_1$  โดย  $I_{Z2} = g_{m2} (V_{V2+} - V_{V2-})$  เมื่อ  $V_{V2+} = 0$  และ  $V_{V2-} = V_{HP}$  จะได้สมการดังนี้

$$V_{Z2} = V_{BP} = \frac{I_{Z2}}{sC_1} = \frac{-g_{m2} V_{HP}}{sC_1} \quad (3.25)$$

พิจารณาแรงดันตกคร่อมที่  $C_2$  ที่ขั้ว  $V_{Z1}$  โดยใช้กฎของโอห์มซึ่งสามารถหากระแสที่ไหลผ่านขั้ว  $C_2$  ที่ขั้ว  $V_{Z1}$  คูณด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของ  $C_2$  โดย  $I_{Z1} = g_{m1} (V_{V1+} - V_{V1-})$  เมื่อ  $V_{V1-} = 0$  และ  $V_{V1+} = V_{BP}$  จะได้สมการดังนี้

$$V_{Z1} = V_{LP} = \frac{I_{Z1}}{sC_2} = -\frac{g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_1 C_2} V_{HP} \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. จากสมการที่ (3.24) นำมาวิเคราะห์หา  $V_{HP}$  โดยนำสมการที่ (3.25) และ (3.26) เข้าไปแทนในสมการที่ (3.24) เมื่อ  $V_{n1} = V_{in}$  จะได้สมการ  $V_{HP}$  ดังสมการที่ (3.27)

$$V_{HP} = \left( -\frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2 C_1 C_2} V_{HP} \right) + \left( -\frac{g_{m2}}{s C_1} V_{HP} \right) - V_{in} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.27) สมการใหม่จะได้

$$V_{HP} \left( 1 + \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2 C_1 C_2} + \frac{g_{m2}}{s C_1} \right) = -V_{in} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{HP} = \frac{-s^2 C_1 C_2}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m2} + g_{m1} g_{m2}} V_{in} \quad (3.29)$$

นำ  $C_1 C_2$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนพร้อมทั้งจัดรูปแบบสมการใหม่จะได้สมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูงดังนี้

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{-s^2}{s^2 + \frac{s g_{m2}}{C_1} + \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (3.30)$$

ข. วิเคราะห์หา  $V_{Z2}$  หรือ  $V_{BP}$  จากสมการที่ (3.25) นำสมการที่ (3.30) เข้าไปแทนใน  $V_{HP}$  จะได้สมการ  $V_{BP}$  ดังสมการที่ (3.31)

$$V_{BP} = \frac{-g_{m2}}{s C_1} \left( \frac{-s^2 C_1 C_2 V_{in}}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m2} + g_{m1} g_{m2}} \right) \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.31) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = \frac{sC_2g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_2g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} V_{in} \quad (3.32)$$

นำ  $C_1C_2$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนพร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการถ่ายโอนของ ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ดังนี้

$$\frac{V_{BP}}{V_{in}} = \frac{\frac{sg_{m2}}{C_1}}{s^2 + \frac{sg_{m2}}{C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (3.33)$$

ค. วิเคราะห์หา  $V_{Z1}$  หรือ  $V_{LP}$  จากสมการที่ (3.26) จะได้สมการดังสมการที่ (3.34)

$$V_{LP} = \frac{g_{m1} \left( \frac{sC_2g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_2g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} V_{in} \right)}{sC_2} \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.34) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} V_{in} \quad (3.35)$$

นำ  $C_1C_2$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนพร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการถ่ายโอนของ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำดังนี้

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + \frac{sg_{m2}}{C_1} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (3.36)$$

ง. จากรูปที่ 3.11 พิจารณา  $V_{BR}$  จะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.37)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่านำ  $V_{BP}$  จากสมการที่ (3.31) มาแทนในสมการที่ (3.37) จะได้ตั้งสมการที่ (3.38)

$$V_{BR} = \frac{sC_2g_{m2}V_{in}}{s^2C_1C_2 + sC_2g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} - V_{in} \quad (3.38)$$

จากสมการที่ (3.38) จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{BR} = -V_{in} \left( \frac{s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_2g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} \right) \quad (3.39)$$

นำ  $C_1C_2$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนพร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการถ่ายโอนของ ฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ดังนี้

$$\frac{V_{BR}}{V_{in}} = - \frac{s^2 + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + \frac{sC_2g_{m2}}{C_1C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (3.40)$$

จากสมการ (3.30), (3.33), (3.36), (3.40) สามารถหาความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟคเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (3.41)$$

และ

$$Q = \sqrt{\frac{C_1g_{m2}}{C_2g_{m1}}} \quad (3.42)$$

พิจารณาสมการที่ (3.41) และ สมการที่ (3.42) ด้วยโครงสร้างภายในของ VDDDA จะได้ วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่หนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตที่สามารถปรับ  $\omega_0$  หรือ  $Q$  ได้ด้วยวิธี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับกระแสไปอัสควบคุมการทำงานที่  $g_{m1}$  และ  $g_{m2}$  เมื่อกำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2}$  จะได้สมการดังนี้

$$\omega_0 = \frac{g_m}{\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.43)$$

และ

$$Q = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (3.44)$$

จากสมการที่ (3.43) และ (3.44) จะสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟคเตอร์ (Q) ได้โดยการปรับค่ากระแส  $I_B$  โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_0$ ) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าควอลิตี้แฟคเตอร์ของวงจรสามารถปรับค่าได้อย่างอิสระต่อค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

### 3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อวงจรกรองความถี่ VDDDA กรณีไม่เป็นอุดมคติ

การวิเคราะห์ผลกระทบต่อวงจรกรองความถี่ในกรณีที่ VDDDA ทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติ มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรเป็นไปได้ 2 กรณี คือ ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุต และผลกระทบอันเนื่องมาจากอุปกรณ์แฝงในตัว VDDDA สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อวงจร เนื่องจากความผิดพลาดของอัตราการส่งผ่านแรงดันอินพุตไปยังเอาต์พุต

จากโครงสร้างภายใน VDDDA ที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างขั้วต่างๆ ในกรณีทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติ ซึ่งมีผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันสามารถวิเคราะห์หาสมการคุณลักษณะสมบัติระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของ VDDDA ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} I_{V+} \\ I_{V-} \\ I_Z \\ I_n \\ I_p \\ I_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m & -g_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_z & -\beta_n & \beta_p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_+ \\ V_- \\ V_Z \\ V_n \\ V_p \\ I_W \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

จากสมการที่ (3.45) กำหนดให้  $\beta_z$ ,  $\beta_n$  และ  $\beta_p$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่าน จากขั้ว  $V_z$ ,  $V_n$  และ  $V_p$  ไปยังขั้ว  $V_w$  ที่เป็ยงเบนไปจากหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการทำงานภายในโครงสร้างวงจรของ VDDDA ที่ใช้ในการออกแบบวงจรของความถี่หลายหน้าที่สามารถวิเคราะห์หาสมรรถนะของวงจรในกรณีทำงานไม่เป็นอุดมคติซึ่งเป็นผลมาจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันภายในวงจรของ VDDDA ดังต่อไปนี้

จากวงจรรูปที่ 3.1 จะพิจารณาร่วมกับสมการ (3.45) เพื่อหาแรงดันเอาต์พุตวงจรคือขั้ว W ของ VDDDA<sub>1</sub> ดังนั้นจึงพิจารณาแรงดันเอาต์พุตวงจรจะได้

$$V_W = \beta_{z1} V_{z1} - \beta_{n1} V_{n1} + \beta_{p2} V_{p2} \quad (3.46)$$

จากรูปวงจรที่ 3.11 พิจารณาที่จุด  $V_{p2} = V_{z2} = V_{BP}$  เมื่อแรงดันตกคร่อมที่  $C_1$  ที่ขั้ว  $V_{z2}$  โดยใช้กฎของโอห์มซึ่งสามารถหากระแสที่ไหลผ่าน  $C_1$  ที่ขั้ว  $V_{z2}$  คูณด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของ  $C_1$  จะได้สมการดังนี้

$$V_{BP} = \frac{-g_{m2} V_{HP}}{sC_1} \quad (3.47)$$

จากรูปวงจรที่ 3.11 พิจารณาที่จุด  $V_{z1} = V_{LP}$  เมื่อแรงดันตกคร่อมที่  $C_2$  ที่ขั้ว  $V_{z1}$  โดยใช้กฎของโอห์มซึ่งสามารถหากระแสที่ไหลผ่านขั้ว  $C_2$  ที่ขั้ว  $V_{z1}$  คูณด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของ  $C_2$  จะได้สมการดังนี้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1} V_{BP}}{sC_2} \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่จุด  $V_{HP}$  เมื่อ  $V_{HP} = V_{W1}$  แทน  $V_{p1} = V_{Z1} = V_{BP}$  ในสมการที่ (3.46) จะได้

$$V_{HP} = \beta_{Z1} \frac{g_{m1} V_{BP}}{sC_2} - \beta_{n1} V_{in} + \beta_{p1} V_{BP} \quad (3.49)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{HP} = V_{BP} \left( \beta_{Z1} \frac{g_{m1}}{sC_2} + \beta_{p1} \right) - \beta_{n1} V_{in} \quad (3.50)$$

นำสมการที่ (3.47) แทนสมการที่ (3.50) เพื่อหา  $V_{HP}$  จะได้

$$V_{HP} = \frac{-g_{m2} V_{HP}}{sC_1} \left( \beta_{Z1} \frac{g_{m1}}{sC_2} + \beta_{p1} \right) - \beta_{n1} V_{in} \quad (3.51)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{HP} \left( 1 + \frac{\beta_{Z1} g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_1 C_2} + \frac{\beta_{p1} g_{m2}}{sC_1} \right) = -\beta_{n1} V_{in} \quad (3.52)$$

นำ  $s^2 C_1 C_2$  เข้าไปคูณในสมการที่ (3.52) จะได้

$$V_{HP} \left( s^2 C_1 C_2 + \frac{\beta_{p1} s^2 C_1 C_2 g_{m2}}{sC_1} + \beta_{Z1} g_{m1} g_{m2} \right) = -\beta_{n1} s^2 C_1 C_2 V_{in} \quad (3.53)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (3.53) ใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{HP} = \frac{-\beta_{n1} s^2 C_1 C_2 V_{in}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \quad (3.54)$$

นำ  $C_1 C_2$  เข้าไปหารในสมการที่ (3.54) ทั้งเศษและส่วนจะได้

$$V_{HP} = \frac{-s^2 \beta_{n1} V_{in}}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (3.55)$$

ดังนั้นจะได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่สูงกรณีทำงานไม่เป็นไปตามอุดม

คติดังนี้

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{-\beta_{n1} s^2}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (3.56)$$

จากสมการที่ (3.47) แทน  $V_{HP}$  ด้วยสมการที่ (3.54) จะได้

$$V_{BP} = \frac{-g_{m2}}{s C_1} \left( \frac{-\beta_{n1} s^2 C_1 C_2 V_{in}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \right) \quad (3.57)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{BP} = \left( \frac{\beta_{n1} s C_2 g_{m2}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \right) V_{in} \quad (3.58)$$

ดังนั้นจะได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่กรณทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติ

ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{BP}}{V_{in}} = \frac{\beta_{n1} s C_2 g_{m2}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \quad (3.59)$$

จากสมการที่ (3.48) แทน  $V_{BP}$  ด้วยสมการที่ (3.58) จะได้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1}}{s C_2} \left( \frac{\beta_{n1} s C_2 g_{m2} V_{in}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \right) \quad (3.60)$$

นำ  $C_1 C_2$  เข้าไปหาร จะได้สมการพร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{LP} = \left( \frac{\frac{\beta_{n1} g_{m1} g_{m2} V_{in}}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \right) \quad (3.61)$$

ดังนั้นจะได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองแถบความถี่ที่การันทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติ

ดังนั้น

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \left( \frac{\frac{\beta_{n1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \right) \quad (3.62)$$

จากรูปที่ 3.11 เมื่อพิจารณาที่  $V_{BR}$  จะได้สมการ

$$V_{BR} = \beta_{z2} V_{BP} - \beta_{n2} V_{in} \quad (3.63)$$

เมื่อ  $V_{z2} = V_{BP}$  นำสมการที่ (3.58) มาแทนในสมการที่ (3.63) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BR} = \beta_{z2} \left( \frac{\beta_{n1} s C_2 g_{m2} V_{in}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \right) - \beta_{n2} V_{in} \quad (3.64)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่จะได้

$$V_{BR} = V_{in} \left( \frac{-\beta_{n2} s^2 C_1 C_2 + \beta_{z2} \beta_{n1} s C_2 g_{m2} - \beta_{p1} \beta_{n2} s C_2 g_{m2} - \beta_{z1} \beta_{n2} g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_1 C_2 + \beta_{p1} s C_2 g_{m2} + \beta_{z1} g_{m1} g_{m2}} \right) \quad (3.65)$$

นำ  $C_1 C_2$  เข้าไปหารในสมการที่ (3.65) ทั้งเศษและส่วน

$$V_{BR} = V_{in} \left( \frac{-s^2 \beta_{n2} + \frac{\beta_{z2} \beta_{n1} s g_{m2}}{C_1} - \frac{\beta_{p1} \beta_{n2} s g_{m2}}{C_1} - \frac{\beta_{z1} \beta_{n2} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \right) \quad (3.66)$$

ดังนั้น

ดังนั้นจะได้สมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่การทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติ

$$\frac{V_{BR}}{V_{in}} = \frac{-s^2 \beta_{n2} + \frac{\beta_{z2} \beta_{n1} s g_{m2}}{C_1} - \frac{\beta_{p1} \beta_{n2} s g_{m2}}{C_1} - \frac{\beta_{z1} \beta_{n2} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{\beta_{p1} s g_{m2}}{C_1} + \frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (3.67)$$

จากสมการ (3.56), (3.59), (3.62), (3.67) สามารถพิจารณาหาความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์การทำงานไม่เป็นอุดมคติดังนี้

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta_{z1} g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (3.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

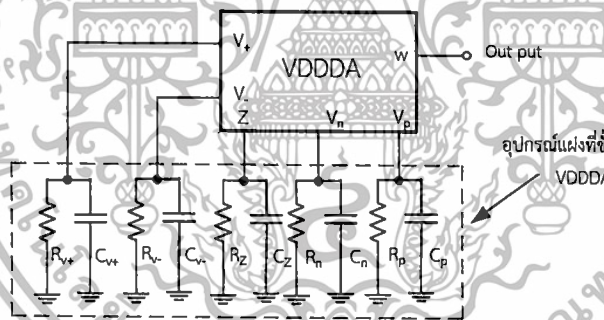
และ

$$Q = \frac{1}{\beta_{p1}} \sqrt{\frac{\beta_{z1} C_1 g_{m1}}{C_2 g_{m2}}} \quad (3.69)$$

เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรของความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่ทั้ง 4 แบบที่ได้ทำการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรความผิดพลาดที่  $\beta_z$ ,  $\beta_n$  และ  $\beta_p$  ที่เพิ่มในสมการการส่งผ่านแรงดันของ VDDDA ซึ่งตัวแปรนี้เป็นอัตราค่าความผิดพลาดในการทำงานของวงจรในทางปฏิบัติจริง ซึ่งจะส่งผลต่อค่าของวงจรขณะทำงานให้เบี่ยงเบนไปจากอุดมคติ

### 3.3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากอุปกรณ์แฝงภายในตัวของ VDDDA

ผลกระทบอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อวงจรที่ออกแบบคือ ค่าของอุปกรณ์แฝงของ VDDDA จะมีค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงเกิดขึ้นที่ขั้วต่างๆ ของ VDDDA ซึ่งเป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของวงจร เป็นผลให้การทำงานคลาดเคลื่อนไปจากอุดมคติ ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงที่เกิดขึ้นที่ขั้วต่างๆ ดังได้แสดงดังรูปที่ 3.12

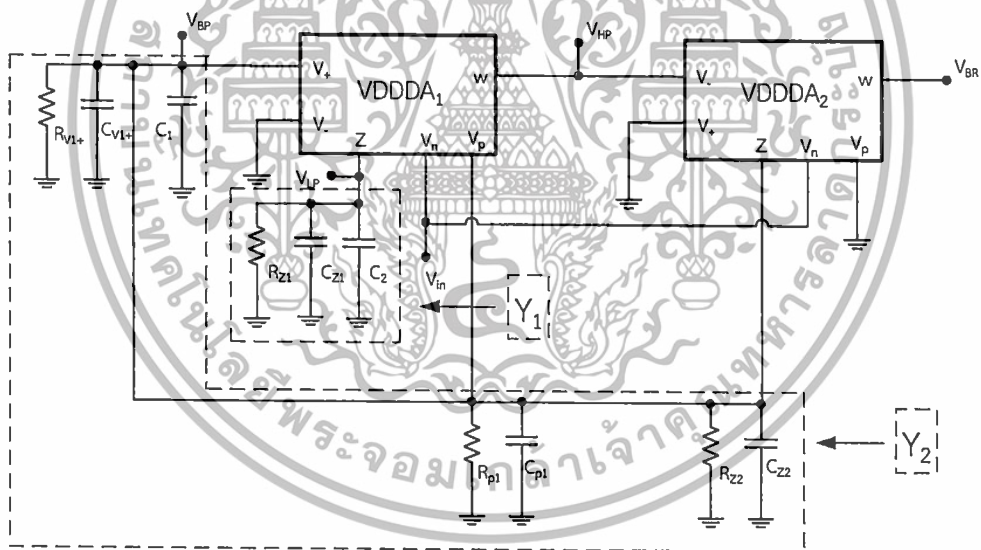


รูปที่ 3.11 ค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของอุปกรณ์ VDDDA

จากรูปที่ 3.11 พิจารณาลักษณะอุปกรณ์แฝงที่ขั้วของอุปกรณ์วงจรรวมสำเร็จรูป ในสภาวะปกติที่ขั้วอินพุตแดนซ์สูงของอุปกรณ์จะมีค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงอยู่ ซึ่งเกิดจากปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยการผลิตของอุปกรณ์เองจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร ในการพิจารณาจะพิจารณาในขั้วที่มีอินพุตแดนซ์สูงและต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นส่วนในขั้วที่มีอินพุตแดนซ์ต่ำจะไม่นำมาพิจารณาเพราะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรมิน VDDDA ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีค่าความต้านทานแฝงและความจุแฝงซึ่งส่งผลกระทบต่อกรณีวงจรทำงานที่ความถี่สูงแต่ละขั้ว ดังนี้ ที่ขั้ว  $V_+$  และขั้ว  $V_-$  เป็นอินพุตของวงจรรายผลต่างแรงดันที่สามารถควบคุมเกณฑ์ขยายด้วยการปรับค่าความนำถ่ายโอน  $g_m$  เป็นขั้วที่มีอินพุตแดนซ์สูงจะมีค่าความต้านทานและความจุแฝงเกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น  $C_{V_+}$  และ  $R_{V_+}$  เกิดขึ้นที่ขั้ว  $V_+$  และ  $C_{V_-}$  และ  $R_{V_-}$  เกิดขึ้นที่ขั้ว  $V_-$  พิจารณาที่ขั้ว  $Z$  และขั้ว  $V$  เป็นอินพุตของวงจรผลต่างแรงดันและมีอิมพีแดนซ์สูงจะเกิดค่าความต้านทานและความจุแฝงเกิดขึ้นดังนี้  $R_Z$  และ  $C_Z$  เกิดขึ้นที่ขั้ว  $Z$  และ  $R_{V_n}$  และ  $C_{V_n}$  เกิดขึ้นที่ขั้ว  $V_n$  และ  $R_{V_p}$  และ  $C_{V_p}$  เกิดขึ้นที่ขั้ว  $V_p$  ส่วนที่ขั้ว  $W$  ซึ่งเป็นขั้วเอาต์พุตของวงจรรวมสำเร็จรูป VDDDA นั้นเนื่องจากมีอิมพีแดนซ์ของวงจรต่ำมากเป็นผลให้ปัจจัยค่าอุปกรณ์แฝงภายในวงจรในนั้นส่งผลกระทบต่อวงจรน้อยจึงไม่นำมาพิจารณา ค่าความต้านทานและความจุแฝงดังรูปที่ 3.11

การทำงานของวงจรรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตอินพุตสี่เอาต์พุตที่นำเสนอ ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ VDDDA ที่ใช้มีค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงที่ขั้วอินพุตของ VDDDA ซึ่งมีอิมพีแดนซ์สูงดังนั้น เมื่อวงจรรองความถี่ทำงานค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงที่อินพุตของ VDDDA จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอ ส่วนขั้วเอาต์พุตซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำจะไม่นำมาพิจารณาค่าอุปกรณ์แฝงจากรูปที่ 3.11 จะพิจารณาผลกระทบค่าอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 วงจรรองความถี่ที่นำเสนอกรณีพิจารณาผลกระทบจากตัวเก็บประจุและตัวต้านทานแฝง

จากวงจรรูปที่ 3.12 พิจารณาความต้านทานและความจุแฝงของวงจร เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณากำหนดให้  $Y_1$  และ  $Y_2$  เป็นส่วนกลับความต้านทานแฝงรวมที่เกิดจากตัวเก็บประจุแฝงและความต้านทานแฝงรวมในกรณีทำงานที่ความถี่สูง หรือความนำวงจรในกรณีทำงานที่ความถี่สูงซึ่งเกิดขึ้นดังวงจรรูปที่ 3.12 มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาที่  $Y_1$

$$Y_1 = sC_{T1} + G_{T1} \quad (3.70)$$

โดยกำหนดให้  $G_{Z1} = \frac{1}{R_{Z1}}$  สามารถเขียนค่า  $Y_1$  ได้ตามสมการที่ (3.71)

$$C_{T1} = C_2 + C_{Z1} \text{ และ } G_{T1} = G_{Z1} \quad (3.71)$$

จากวงจรรูปที่ 3.12 พิจารณาที่  $Y_2$

$$Y_2 = sC_{T2} + G_{T2} \quad (3.72)$$

โดยกำหนดให้  $G_{V1+} = \frac{1}{R_{V1+}}, G_{p1} = \frac{1}{R_{p1}}, G_{Z2} = \frac{1}{R_{Z2}}$  สามารถเขียนค่า  $Y_2$  ได้ตามสมการที่ (3.73)

$$C_{T2} = C_1 + C_{V1+} + C_{p1} + C_{Z2} \text{ และ } G_{T2} = G_{V1+} + G_{p1} + G_{Z2} \quad (3.73)$$

จากวงจรรูปที่ 3.12 เมื่อวงจรทำงานจะเกิดความต้านทานและตัวประจุแฝงขึ้นที่ขั้ว อินพุตของ VDDA ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุจะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดต่อการทำงานของวงจรไม่เป็นที่ตามอุดมคติดังนี้

$$\text{เมื่อ } V_{HP} = \frac{I_{Z1}}{Y_1} - V_{in} + V_{BP} \text{ และ } I_{Z1} = g_{m1} V_{BP} \text{ จะได้}$$

$$V_{HP} = V_{BP} \left( \frac{g_{m1}}{Y_1} + 1 \right) - V_{in} \quad (3.74)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = \frac{I_{Z2}}{Y_2} = \frac{-g_{m2} V_{HP}}{Y_2} \quad (3.75)$$

ก. พิจารณาที่  $V_{HP}$  เพื่อหาสมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูงจะได้

$$V_{HP} = \frac{-V_{in} Y_1 Y_2}{Y_1 Y_2 + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} Y_1} \quad (3.76)$$

นำค่า  $Y_1 Y_2$  มาแทนในสมการที่ (3.76) จะได้

$$V_{HP} = V_{in} \left[ \frac{-(sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2})}{(sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2}) + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} (sC_{T1} + G_{T1})} \right] \quad (3.77)$$

จากสมการที่ (3.77) เมื่อ  $G_{T1}$  และ  $G_{T2}$  มีค่าสูงมากจึงไม่มีผลต่อวงจร สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V_{HP} = V_{in} \left[ \frac{-s^2 C_{T1} C_{T2}}{s^2 C_{T1} C_{T2} + sC_{T1} G_{T2} + sC_{T2} G_{T1} + G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} (sC_{T1} + G_{T1})} \right] \quad (3.78)$$

นำ  $C_{T1} C_{T2}$  เข้าไปหารในสมการที่ (3.78) ทั้งเศษและส่วนจะได้สมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูงกรณีทำงานที่ความถี่สูงดังนี้

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{-s^2}{s^2 + s \left( \frac{G_{T2}}{C_{T2}} + \frac{G_{T1}}{C_{T1}} + \frac{g_{m2}}{C_{T2}} \right) + \frac{G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1}}{C_{T1} C_{T2}}} \quad (3.79)$$

ข. พิจารณาที่  $V_{BP}$  เพื่อหาสมการถ่ายโอนฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = \frac{-g_{m2} V_{HP}}{Y_2} \quad (3.80)$$

นำสมการที่ (3.76) เข้ามาแทนในสมการที่ (3.80) จะได้

$$V_{BP} = \frac{-g_{m2}}{Y_2} \left( \frac{-V_{in} Y_1 Y_2}{Y_1 Y_2 + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} Y_1} \right) \quad (3.81)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (3.81) ใหม่จะได้

$$V_{BP} = \frac{g_{m2} V_{in} Y_1}{Y_1 Y_2 + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} Y_1} \quad (3.82)$$

แทนค่า  $Y_1, Y_2$  ในสมการที่ (3.82) จะได้

$$V_{BP} = V_{in} \left[ \frac{g_{m2} (sC_{T1} + G_{T1})}{(sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2}) + g_{m2} (sC_{T1} + G_{T1}) + g_{m1} g_{m2}} \right] \quad (3.83)$$

จากสมการที่ (3.83) เมื่อ  $G_{T1}$  มีค่าสูงมากจึงไม่มีผลต่อวงจรสามารถจัดสมการใหม่ได้

$$V_{BP} = V_{in} \left[ \frac{sg_{m2} C_{T1}}{s^2 C_{T1} C_{T2} + sC_{T1} G_{T2} + sC_{T2} G_{T1} + G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} (sC_{T1} + G_{T1})} \right] \quad (3.84)$$

นำ  $C_{T1}, C_{T2}$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนจะได้สมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ที่ทำงานที่ความถี่สูงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BP} = \frac{\frac{sg_{m2}}{C_{T2}}}{s^2 + s \left( \frac{G_{T2}}{C_{T2}} + \frac{G_{T1}}{C_{T1}} + \frac{g_{m2}}{C_{T2}} \right) + \frac{G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + G_{T1}g_{m2}}{C_{T1}C_{T2}}} \quad (3.85)$$

ค. พิจารณาที่  $V_{LP}$  เพื่อหาสมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำจะได้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1}V_{BP}}{Y_1} \quad (3.86)$$

นำสมการที่ (3.82) มาแทนค่าในสมการที่ (3.86) จะได้สมการดังนี้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1}}{Y_1} \left( \frac{g_{m2}V_{in}Y_1}{Y_1Y_2 + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}Y_1} \right) \quad (3.87)$$

จัดรูปสมการที่ (3.87) ใหม่จะได้

$$V_{LP} = \frac{g_{m1}g_{m2}V_{in}}{Y_1Y_2 + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}Y_1} \quad (3.88)$$

แทนค่า  $Y_1Y_2$  ในสมการจะได้

$$V_{LP} = V_{in} \left[ \frac{g_{m1}g_{m2}}{(sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2}) + g_{m2}(sC_{T1} + G_{T1}) + g_{m1}g_{m2}} \right] \quad (3.89)$$

จากสมการที่ (3.89) จัดรูปสมการใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{LP} = V_{in} \left( \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2 C_{T1}C_{T2} + sC_{T1}G_{T2} + sC_{T2}G_{T1} + G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}sC_{T1} + g_{m2}G_{T1}} \right) \quad (3.90)$$

นำ  $C_{T1}C_{T2}$  เข้าไปหารทั้งเศษและส่วนดังสมการที่ (3.89) จะได้สมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำกรณีทำงานที่ความถี่สูงดังนี้

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_{T1}C_{T2}}}{s^2 + s \left( \frac{G_{T2}}{C_{T2}} + \frac{G_{T1}}{C_{T1}} + \frac{g_{m2}}{C_{T2}} \right) + \frac{G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T1}}{C_{T1}C_{T2}}} \quad (3.91)$$

ง. พิจารณาที่  $V_{BR}$  เพื่อหาสมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่

$$V_{BR} = V_{BP} - V_{in} \quad (3.92)$$

แทนค่า  $V_{BR}$  ในสมการที่ (3.91) จะได้

$$V_{BR} = \frac{g_{m2}V_{in}Y_1}{Y_1Y_2 + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}Y_1} - V_{in} \quad (3.93)$$

จากสมการที่ (3.93) จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_{BR} = V_{in} \left( \frac{g_{m2}Y_1 - Y_1Y_2 - g_{m1}g_{m2} - g_{m2}Y_1}{Y_1Y_2 + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}Y_1} \right) \quad (3.94)$$

แทนค่า  $Y_1Y_2$  ในสมการที่ (3.94) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{BR} = V_{in} \left[ \frac{g_{m2}(sC_{T1} + G_{T1}) - (sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2}) - g_{m1}g_{m2}}{(sC_{T1} + G_{T1})(sC_{T2} + G_{T2}) + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}(sC_{T1} + G_{T1})} \right] \quad (3.95)$$

เมื่อ  $G_{T1}$  และ  $G_{T2}$  มีค่าสูงมากจึงไม่มีผลต่อวงจรสามารถจัดสมการใหม่จะได้

$$V_{BR} = V_{in} \left( \frac{-s^2 C_{T1} C_{T2} - g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_{T1} C_{T2} + s C_{T1} G_{T2} + s C_{T2} G_{T1} + G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2}} \right) \quad (3.96)$$

นำ  $C_{T1} C_{T2}$  เข้าไปหารในสมการที่ (3.96) จะได้สมการถ่ายโอนของฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ดังนี้

$$\frac{V_{BR}}{V_{in}} = \frac{s^2 + \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_{T1} C_{T2}}}{s^2 + s \left( \frac{G_{T2}}{C_{T2}} + \frac{G_{T1}}{C_{T1}} + \frac{g_{m2}}{C_{T2}} \right) + \frac{G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + G_{T1} g_{m2}}{C_{T1} C_{T2}}} \quad (3.97)$$

จากสมการที่ (3.79), (3.85), (3.91), (3.97) สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega = \sqrt{\frac{G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1}}{C_{T1} C_{T2}}} \quad (3.98)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{1}{G_{T2}C_{T1} + G_{T1}C_{T2} + C_{m2}C_{T1}} \sqrt{\frac{G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T2}}{C_{T1}C_{T2}}} (C_{T1}C_{T2})^2 \quad (3.99)$$

จากการวิเคราะห์สมการที่ (3.98) และ (3.99) เมื่อนำค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของ VDDDA มาพิจารณาร่วมด้วยตัวแปรค่าอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นภายใน VDDDA ที่เกี่ยวข้องในเทอมของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ทำงานในโหมดแรงดัน จะได้สมการความถี่ธรรมชาติและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์จะมีค่าตัวแปรร่วมด้วย ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานแฝงและค่าความจุแฝงในโครงสร้างภายในของ VDDDA และส่งผลต่อการทำงานของวงจรในทางปฏิบัติให้ได้ค่าที่เกิดความผิดพลาดไม่เป็นไปตามอุดมคติ ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและความจุแฝงที่เกิดขึ้น

### 3.4 การวิเคราะห์หาความไว (Sensitivity)

การวิเคราะห์หาค่าความไวของอุปกรณ์ คือ การหาค่าความไวของของอุปกรณ์ที่ตอบสนองการทำงานของวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ซึ่งสังเคราะห์จาก อุปกรณ์ VDDDA และตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร โดยค่าความไวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรซึ่งจะแยกเป็นกรณีดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาค่าความไวของวงจรในกรณีอุดมคติ

การวิเคราะห์ค่าความไวของวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่โดยใช้ VDDDA ที่นำเสนอจะเป็นการพิจารณาหาความไวของตัวแปรอุปกรณ์ที่ใช้ที่ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ จากสมการที่ (3.40) และสมการที่ (3.41) พิจารณาเมื่อวงจรทำงานในอุดมคติตัวแปรอุปกรณ์แอกทิฟและแพสซีฟ คือ  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$ ,  $C_1$ , และ  $C_2$  ส่งผลต่อความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ดังนี้

$$S_{g_{m1}}^{\omega_0} = S_{g_{m2}}^{\omega_0} = S_{C_1}^Q = S_{g_{m2}}^Q = \frac{1}{2} \quad (3.100)$$

$$S_{C_1}^{\omega_0} = S_{C_2}^{\omega_0} = S_{C_2}^Q = S_{g_{m1}}^Q = -\frac{1}{2} \quad (3.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าความไวของวงจรในกรณีผลกระทบจากความผิดพลาดในกรณีไม่เป็นไปตามอุดมคติของ VDDDA

เมื่อพิจารณากรณีที่วงจรทำงานไม่เป็นอุดมคติ จากสมการ (3.68) และ (3.69) มีตัวแปรอุปกรณ์แพสซีฟและแอคทีฟ คือ  $\beta_{z1}$ ,  $\beta_{p1}$ ,  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$ ,  $C_1$  และ  $C_2$  สามารถวิเคราะห์หาค่าความไวของวงจร ที่มีผลมาจากตัวแปรของอุปกรณ์แพสซีฟและแอคทีฟ ที่ส่งผลต่อการตอบสนอง  $\omega_0$  และ  $Q$  ได้ดังนี้

$$S_{\beta_{z1}}^{\omega_0} = S_{g_{m1}}^{\omega_0} = S_{g_{m2}}^{\omega_0} = S_{\beta_{z1}}^Q = S_{C_1}^Q = S_{g_{m1}}^Q = \frac{1}{2} \quad (3.102)$$

$$S_{C_1}^{\omega_0} = S_{C_2}^{\omega_0} = S_{\beta_{p1}}^Q = S_{C_2}^Q = S_{g_{m2}}^Q = -\frac{1}{2} \quad (3.103)$$

### 3.4.3 การวิเคราะห์หาค่าความไวของวงจรในกรณีที่มีผลกระทบจากความต้านทานและความจุแฝงของ VDDDA

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรกรองความถี่ ในกรณีที่มีผลกระทบอื่นเนื่องมาจากจากความต้านทานและความจุแฝงของวงจร จากสมการ (3.100) และ (3.101) ตัวแปรอุปกรณ์แพสซีฟและแอคทีฟ คือ  $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$ ,  $G_{T1}$  และ  $G_{T2}$  สามารถวิเคราะห์หาค่าความไวของวงจร ที่มีผลมาจากตัวแปรอุปกรณ์แอคทีฟและแพสซีฟรวมทั้งค่าอุปกรณ์แฝง ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนอง  $\omega_0$  และ  $Q$  ได้ดังนี้

$$S_{C_{T1}}^{\omega_0} = S_{C_{T2}}^{\omega_0} = -\frac{1}{2} \quad (3.104)$$

$$S_{g_{m1}}^{\omega_0} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{2(G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T1})} \quad (3.105)$$

$$S_{g_{m2}}^{\omega_0} = \frac{g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T1}}{2(G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T1})} \quad (3.106)$$

$$S_{G_{T1}}^{\omega_0} = \frac{G_{T1}G_{T2} + g_{m2}G_{T1}}{2(G_{T1}G_{T2} + g_{m1}g_{m2} + g_{m2}G_{T1})} \quad (3.107)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ให้ภายนอกหน่วยงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{G_{T2}}^{\omega_0} = \frac{G_{T1} G_{T2}}{2(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \quad (3.108)$$

$$S_{G_{T2}}^{\omega_0} = \frac{G_{T1} G_{T2}}{2(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \quad (3.109)$$

$$S_{C_{T1}}^Q = \frac{1}{2} \frac{G_{T2} C_{T1} + g_{m2} C_{T1}}{(G_{T2} C_{T1} + G_{T1} C_{T2} + g_{m2} C_{T1})} \quad (3.110)$$

$$S_{C_{T2}}^Q = \frac{1}{2} \frac{G_{T1} C_{T2}}{(G_{T2} C_{T1} + G_{T1} C_{T2} + g_{m2} C_{T1})} \quad (3.111)$$

$$S_{g_{m1}}^Q = \frac{g_{m1} g_{m2}}{(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \quad (3.112)$$

$$S_{g_{m2}}^Q = \frac{(g_{m1} + G_{T1}) g_{m2}}{(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \frac{g_{m2} C_{T1}}{(G_{T2} C_{T1} + G_{T1} C_{T2} + g_{m2} C_{T1})} \quad (3.113)$$

$$S_{G_{T1}}^Q = \frac{G_{T1} (G_{T2} + g_{m2})}{2(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \frac{G_{T1} C_{T2}}{(G_{T2} C_{T1} + G_{T1} C_{T2} + g_{m2} C_{T1})} \quad (3.114)$$

$$S_{G_{T2}}^Q = \frac{G_{T1} G_{T2}}{2(G_{T1} G_{T2} + g_{m1} g_{m2} + g_{m2} G_{T1})} \frac{G_{T2} C_{T1}}{(G_{T2} C_{T1} + G_{T1} C_{T2} + g_{m2} C_{T1})} \quad (3.115)$$

จากการวิเคราะห์ความไวของวงจรรองความถี่ ที่มีผลมาจากตัวแปรของอุปกรณ์ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของวงจรรองความถี่ เมื่อวิเคราะห์จากสมการที่ (3.68), (3.69), (3.98) และ (3.99) นอกจากตัวแปรอุปกรณ์ซึ่งใช้งานในวงจรปกติ ที่ส่งผลต่อการตอบสนองการทำงานของวงจร พบว่าค่าในสมการของ  $\omega_0$  และ  $Q$  จะมีตัวแปรความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดัน รวมทั้งความต้านทานและตัวเก็บประจุแฝงของ VDDDA ส่งผลต่อการตอบสนองการทำงานของวงจรด้วย ต่างจากสมการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3.41), (3.42), ซึ่งเป็นสมการ  $\omega_0$  และ  $Q$  ในกรณีเป็นอุดมคติ ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนอง  $\omega_0$  และ  $Q$  เช่น ถ้าค่าความไวสูง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนอง  $\omega_0$  และ  $Q$  สูงตามไปด้วย

### 3.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุต-สี่เอาต์พุต

เมื่อสังเคราะห์วงจรและได้วิเคราะห์สมรรถนะของวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสอง โหมดแรงดันหนึ่งอินพุต-สี่เอาต์พุต ที่สามารถควบคุมความธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์แล้ว สามารถนำสมการความถี่ธรรมชาติและควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจร ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในกรณีวงจรทำงานในอุดมคติ มาทำการออกแบบหาค่าอุปกรณ์ โดยจะแสดงตัวอย่างการออกแบบวงจรซึ่งจะแยกเป็นกรณีดังต่อไปนี้

#### 3.5.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอแบบโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์

ตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่สูง และวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำให้มีความถี่คัตออฟ ( $f_c$ ) เท่ากับ 3MHz ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ ( $Q$ ) เท่ากับ 0.707

ดังนั้นสามารถคำนวณออกแบบวงจรเพื่อหา  $f_c$  จากสมการที่ (3.43) และ  $Q$  ได้จากสมการที่ (3.44) กำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$  และ  $Q = 0.707$  เมื่อต้องการให้วงจรมี  $f_0 = 3\text{MHz}$  โดยกำหนดตัวเก็บประจุค่า  $C_1 = 15\text{pF}$  และคำนวณหาค่า  $C_2$  จากสมการที่ (3.44) จะได้  $C_2 = 30\text{pF}$  และ

กำหนดค่า  $I_B = 80\mu\text{s}$  โดยหาค่า  $g_m$  จากสูตร  $g_m = \sqrt{k \frac{W}{L} I_B}$  เมื่อ  $k = 245\mu$ ,  $W = 9\mu\text{m}$  และ  $L = 1.08\mu\text{m}$  จะได้  $g_m = 400\mu\text{s}$

จากสมการที่ (3.44) สามารถหา  $C_2$  จะได้

$$C_2 = \frac{(15\text{pF})}{(0.707)^2} = 30\text{pF} \quad (3.116)$$

หาค่า  $g_m$  ได้จาก

$$g_m = \sqrt{245 \times 10^{-6} \left( \frac{9 \times 10^{-6}}{1.08 \times 10^{-6}} \right) (80 \times 10^{-6})} = 400\mu\text{s} \quad (3.117)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองความถี่ต่ำผ่านมีอัตราขยายเท่ากับ 1

ตัวอย่างการออกแบบวงจรรองผ่านแถบความถี่ และวงจรรองหยุดแถบความถี่ ให้มีความถี่คัตออฟด้านต่ำ ( $f_{CL}$ ) เท่ากับ 2MHz ความถี่ด้านสูง ( $f_{CH}$ ) เท่ากับ 5MHz

โดยกำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$  จะได้  $Q = 1.05$  เมื่อต้องการให้วงจรมี  $f_{CL} = 2\text{MHz}$  และ  $f_{CH} = 5\text{MHz}$  โดยกำหนดค่า  $C_1 = 30\text{pF}$  คำนวณหาค่า  $C_2$  จากสมการที่ (3.44) ได้  $C_2 = 27\text{pF}$  และค่า  $g_m = 565\mu\text{s}$

โดยความกว้างของแบนด์วิดท์หาได้จากสมการ

$$BW = f_{CH} - f_{CL} \quad (3.118)$$

จะได้

$$BW = (5 - 2) \times 10^6 = 3\text{MHz} \quad (3.119)$$

เมื่อความถี่ธรรมชาติหาได้จาก  $f_0 = \sqrt{f_{CL} f_{CH}}$  จะได้

$$f_0 = \sqrt{5 \times 10^6 \times 2 \times 10^6} = 3.16\text{MHz} \quad (3.120)$$

เมื่อควอลิตี้แฟกเตอร์หาได้จาก  $Q = \frac{f_0}{BW}$  จะได้

$$Q = \frac{3.16 \times 10^6}{3 \times 10^6} = 1.05 \quad (3.121)$$

จากสมการที่ (3.44) สามารถหา  $C_2$  จะได้

$$C_2 = \frac{(30\text{pF})}{(1.05)^2} = 27\text{pF} \quad (3.122)$$

จากสมการที่ (3.41) สามารถหาค่า  $g_m$  ได้ดังนี้

$$g_m = \frac{2\pi(3.16\text{M})}{(3.51 \times 10^{10})} = 565\mu\text{A} \quad (3.123)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (3.51 × 10<sup>10</sup>) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อให้วงจรกรองความถี่ที่นำเสนองรณั่วงจรกรองผ่านความถี่สูง และวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ มีความถี่คัตออฟ เท่ากับ 3MHz กรณั่วงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ มีความถี่คัตออฟด้านต่ำเท่ากับ 2MHz ความถี่คัตออฟด้านสูงเท่ากับ 5MHz และมีค่าควอลิตี้แฟกเตอร์เท่ากับ 1.05 จะต้องปรับกระแส  $I_{B1} = I_{B2} = 156\mu A$  เมื่อ  $g_{m1} = g_{m2} = 565\mu S$  และ  $C_1 = 30pF$   $C_2 = 27pF$  จากการสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ได้ รวมทั้งการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรทั้งหมดที่ผ่านมา จะได้นำไปทดสอบในทางปฏิบัติของวงจรผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันผลในบทต่อไป

### 3.5.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอบนโครงสร้างไอซีด้วยการต่อจริง

จากรูปที่ 2.20 ใช้ไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดต่อรวมกันเป็นอุปกรณ์ VDDDA ประกอบด้วยไอซีเบอร์ LT1228 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) ต่อร่วมกับไอซีเบอร์ AD830 ทำหน้าที่เป็นวงจรสายพานกระแสชนิดมีแรงดันเอาต์พุต เมื่อพิจารณาไอซีเบอร์ LT1228 เพื่อหาค่าอัตราขยายกระแสของวงจรความนำถ่ายโอนหรือ  $g_m$  เมื่อค่า  $g_m = 10I_B$  และ  $I_B$  คือค่ากระแสไบอัสจากภายนอก

ตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่สูง และวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำให้มีความถี่คัตออฟ เท่ากับ 160kHz ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.707

ดังนั้นสามารถคำนวณออกแบบวงจรเพื่อหาความถี่คัตออฟ ได้จากสมการที่ (3.43) และควอลิตี้แฟกเตอร์ได้จากสมการที่ (3.44) เมื่อต้องการให้วงจรมี  $f_c = 160kHz$  และ  $Q = 0.707$  โดยกำหนดให้  $C_1 = 1nF$  สามจากนั้นหาค่า  $I_B$  เมื่อค่า  $g_m = 10I_B$  เมื่อ  $g_m = 1.42mS$

จากสมการที่ (3.44) หาค่า  $C_2$  จะได้

$$C_2 = \frac{(1nF)}{(0.707)^2} = 2\eta F \quad (3.124)$$

หาค่า  $I_B$  ได้จาก  $g_m = 10I_B$

$$I_B = \frac{1.42 \times 10^{-3}}{10} = 142nA \quad (3.125)$$

ตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ ให้มีความถี่คัตออฟด้านต่ำ เท่ากับ 90kHz ความถี่คัตออฟด้านสูง เท่ากับ 230kHz ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.707 โดยวงจรกรองผ่านแถบความถี่และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ไม่มีอัตราขยายแรงดันเอาต์พุต

กำหนดให้  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$  และ  $C_1 = 1\text{nF}$  เมื่อต้องการให้วงจรมี  $f_{CL} = 90\text{kHz}$  และ  $f_{CH} = 230\text{kHz}$ ,  $Q = 0.89$  โดยใช้ตัวเก็บประจุค่า  $1\text{nF}$  และค่า  $g_m = 1.42\text{mS}$  โดยที่หาความกว้างของแบนด์วิดท์ได้จากสมการ

$$BW = f_{CH} - f_{CL} \quad (3.122)$$

จะได้

$$BW = (230 - 90) \times 10^3 = 160\text{kHz} \quad (3.123)$$

เมื่อความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก  $f_0 = \sqrt{f_{CL} f_{CH}}$  จะได้

$$f_0 = \sqrt{90 \times 10^3 \times 230 \times 10^3} = 143.87\text{kHz} \quad (3.124)$$

เมื่อควอลิตี้แฟกเตอร์หาได้จาก  $Q = \frac{f_0}{BW}$  จะได้

$$Q = \frac{143.87 \times 10^3}{160 \times 10^3} = 0.89 \quad (3.125)$$

จากสมการที่ (3.44) หาค่า  $C_2$  จะได้

$$C_2 = \frac{(1\text{nF})}{(0.89)^2} = 1.2\text{nF} \approx 1\text{nF} \quad (3.126)$$

จากสมการที่ (3.41) สามารถหาค่า  $g_m$  ได้ดังนี้

$$g_m = \frac{2\pi(160\text{k})}{(707\text{M})} = 1.42\text{mA} \quad (3.127)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อให้วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ กรณีวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ และวงจรกรองผ่านความถี่สูงมีความถี่คัตออฟ เท่ากับ 143.87 วงจรกรองผ่านแถบความถี่และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ มีความถี่คัตออฟด้านต่ำ เท่ากับ 90kHz ความถี่คัตออฟด้านสูง เท่ากับ 230kHz และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์เท่ากับ 0.89 จะต้องปรับกระแส  $I_{B1}=I_{B2} = 142\mu A$ ,  $g_{m1} = g_{m2} = 1.42mS$  และ  $C_1 = C_2 = 1nF$ จากการสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ได้ รวมทั้งการวิเคราะห์สมรรถนะของวงจรทั้งหมดที่ผ่านมา จะได้นำไปทดสอบผลในทางปฏิบัติของวงจรผ่านการต่อวงจรจริง เพื่อยืนยันผลในบทที่ 4 และสรุปอภิปรายผลวิทยานิพนธ์ในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรรองความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดันว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 และเป็นไปตามหลักการเหตุผลทางทฤษฎีที่ได้สังเคราะห์วิเคราะห์และออกแบบไว้ในบทที่ 3 ในบทนี้จะทดสอบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรจริง พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้วิเคราะห์ไว้ในทางทฤษฎีในบทที่ผ่านมา ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

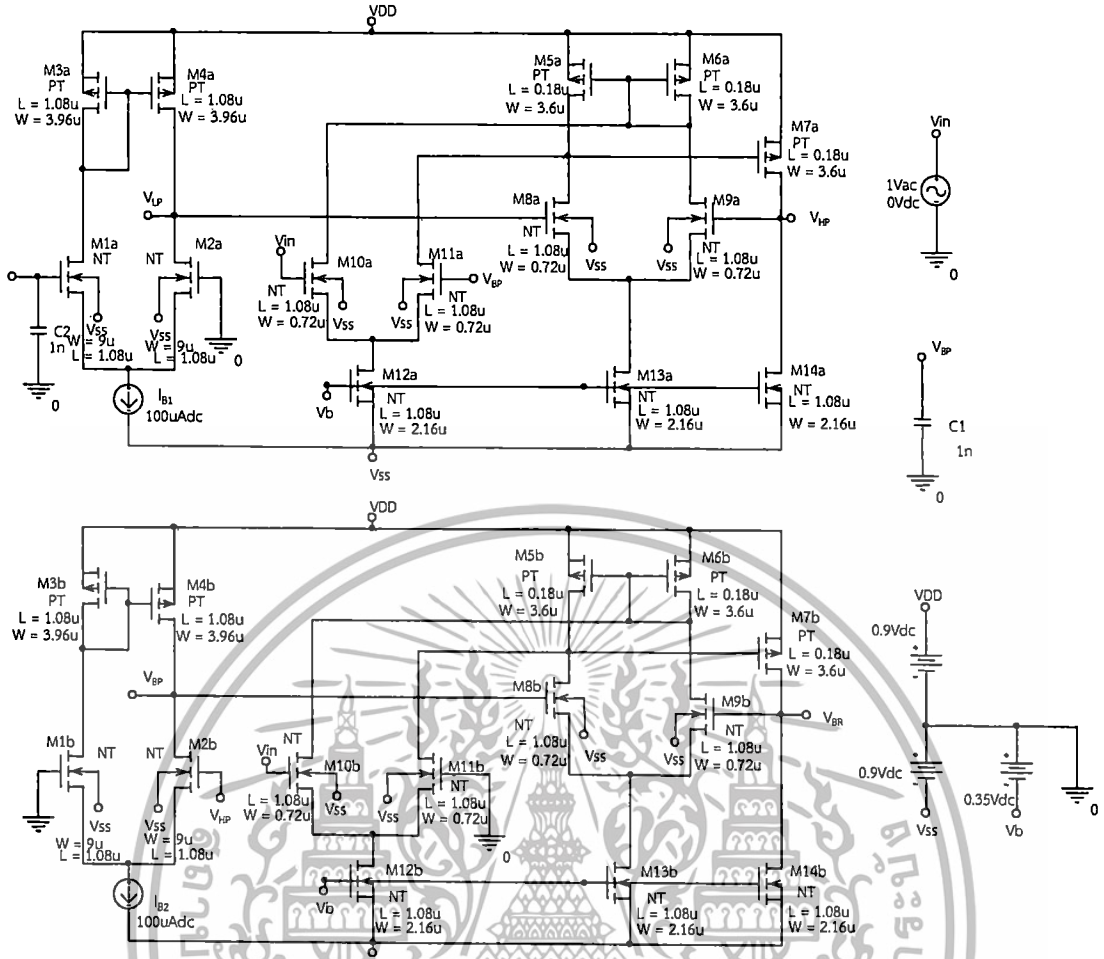
#### 4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรรองความถี่ด้วยโปรแกรม PSPICE

วงจรรองความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ใช้อุปกรณ์แอสซิมบลี VDDDA จำนวนสองตัวมาต่อร่วมกับตัวเก็บประจุสองตัวต่อลงกราวด์ ซึ่งเมื่อนำรูปที่ 3.11 มาทำการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้เทคโนโลยีมอสทรานซิสเตอร์ 0.18 $\mu\text{m}$  TSMC ค่าพารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์แสดงในภาคผนวก ข และขนาดของมอสทรานซิสเตอร์แสดงในตารางที่ 4.2 โดยใช้โปรแกรม PSPICE จำลองการทำงาน และกำหนดแรงดันอินพุตเพื่อให้วงจรตอบสนองฟังก์ชันกรองความถี่รูปที่ 4.1 เพื่อเป็นการทดสอบและยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอ

ตารางที่ 4.1 ขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ Herencsar, et. al. (2013 : 17-20)

MOS Transistor	MOS Transistor	W ( $\mu\text{m}$ )	L ( $\mu\text{m}$ )
M1a-M2a	M1b-M2b	3.6	1.8
M3a-M4a	M3b-M4b	9	1.08
M5a-M7a	M5b-M7b	3.96	1.08
M8a-M11a	M8b-M11b	0.72	1.08
M12a-M14a	M12b-M14b	2.16	1.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตโดยใช้โครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์

การทดสอบผลการตอบสนองของสัญญาณความถี่ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟ 0.9V วงจรมีอัตราดึงกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.216mW ตัวอย่างการออกแบบกำหนดให้  $C_1 = C_2 = 15\text{pF}$  กระแสไบอัส  $I_{b1} = I_{b2} = 50\mu\text{A}$ ,  $Q = 1$  ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติ 3MHz และเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.37) ค่าจากการคำนวณจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติประมาณ 3.16MHz มีค่าเบี่ยงเบน 5.06% ซึ่งค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE และค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันอินพุตไปยังเอาต์พุต ซึ่งในอุดมคติค่าเหล่านี้มีค่าเท่ากับ 1 แต่ในทางไม่อุดมคติค่า  $\beta_z$  มีค่าเท่ากับ 0.998 เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง 0.002%  $\beta_n$  มีค่าเท่ากับ 0.997 เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง 0.002% และ  $\beta_p$  มีค่าเท่ากับ 0.999 เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง 0.0001% และค่าความจุแฝง (C) และค่าความต้านทาน (R) แฝงภายในตัวอุปกรณ์ VDDDA ตามโครงสร้างภายในรูปที่ 3.12 โดยใช้โปรแกรม PSPICE ปรับค่า  $I_{b1} = I_{b2} = 50\mu\text{A}$  ได้ค่าต่างๆตาม

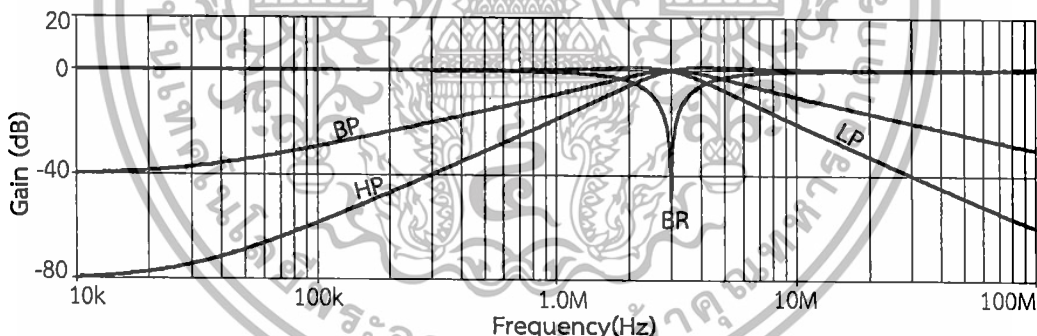
เอกสารฉบับนี้ยกย่องให้พิมพ์เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่คิดค่าลิขสิทธิ์หรือค่าอื่นใดแต่ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดไว้เป็นของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 จึงส่งผลให้ผลตอบสนองความถี่จากการทดสอบด้วยโปรแกรม PSPICE ไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติที่แทนในสมการที่ (3.37) ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2 โดยแสดงผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชัน กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำ กรองหยุดแถบความถี่

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุและค่าความต้านทานแฝงแต่ละขั้วของอุปกรณ์ VDDDA

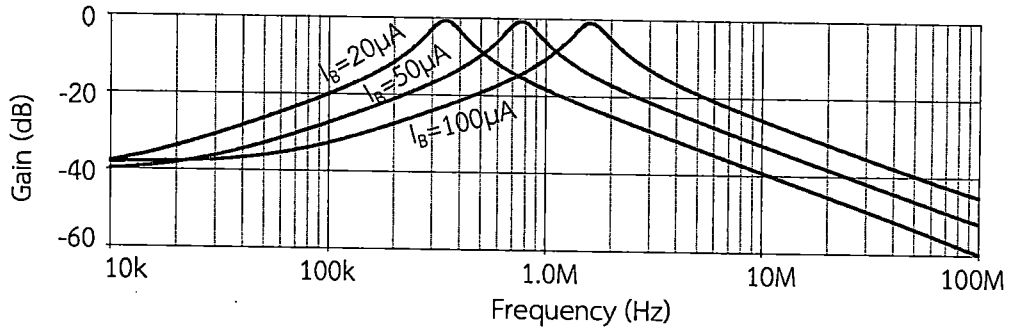
ขั้วอุปกรณ์	ความต้านทานแฝง	ความจุแฝง
ขั้ว V+	$\infty$	0.055pF
ขั้ว V-	$\infty$	0.052pF
ขั้ว V <sub>n</sub>	$\infty$	0.005pF
ขั้ว V <sub>p</sub>	$\infty$	0.066pF
ขั้ว V <sub>z</sub>	322k $\Omega$	0.014pF
ขั้ว V <sub>w</sub>	487 $\Omega$	-



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองการทำงานของ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ และฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่

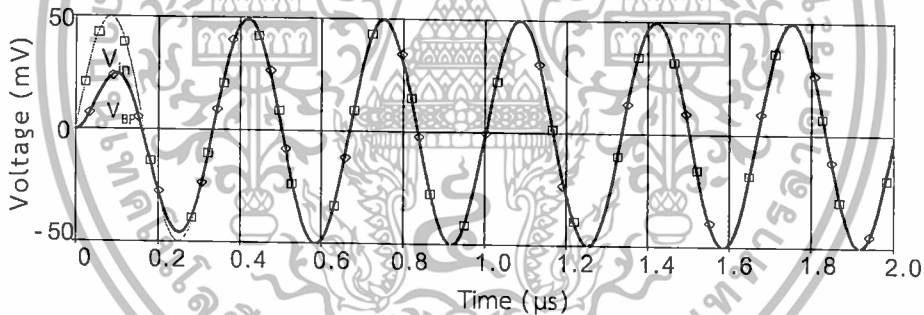
ผลการทดสอบการทำงานของ การควบคุมค่าควอลิตี้แฟกเตอร์โดยปรับค่า  $I_B = 20\mu A$ ,  $50\mu A$  และ  $100\mu A$ , ให้ค่า  $C_1 = 150\text{pF}$ ,  $C_2 = 15\text{pF}$  ได้ความถี่  $f_0 = 344.35\text{kHz}$ ,  $772.68\text{kHz}$  และ  $1.61\text{MHz}$  ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าเป็นไปตามสมการที่ (3.43) คือสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับที่กระแสไบอัส  $I_B$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ เมื่อเปลี่ยนค่า  $I_B$

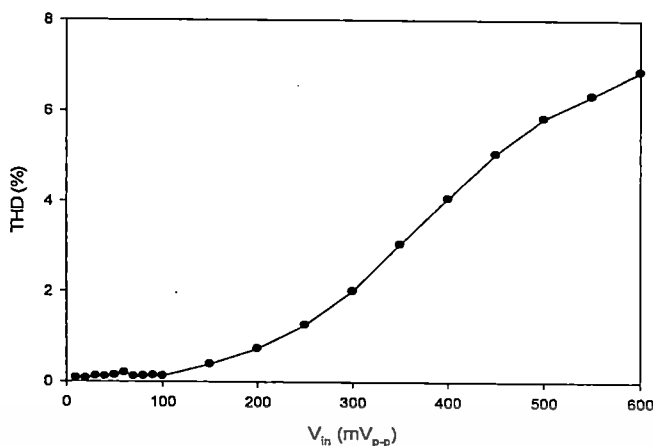
ผลการตอบสนองแบบทรานเซียนของวงจร เป็นการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ สัญญาณแรงดันดังกล่าวมีลักษณะเปลี่ยนแปลงทางขนาดและความถี่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแกนเวลา เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต โดยป้อนความถี่อินพุตที่ 3.23MHz ขนาด 50mV ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดใกล้เคียงสัญญาณอินพุตดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ ของวงจร เมื่อสัญญาณอินพุตความถี่ 3MHz ขนาด 50mV<sub>p</sub>

การทดสอบย่านการรับระดับสัญญาณอินพุต (Input Dynamic Range) ของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ โดยป้อนสัญญาณไซน์ให้อินพุตของวงจรที่ความถี่ 3MHz และปรับแรงดันอินพุตตั้งแต่ 0mV – 600mV ป้อนกระแสไบอัสให้คงที่  $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$  โดยทดสอบที่ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ วัดที่แรงดันเอาต์พุต เพื่อวัดหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion : THD) พบว่าย่านการรับแรงดันอินพุตที่ให้ความผิดเพี้ยนไม่เกิน 1% อยู่ที่ 10mV ถึง 200mV เปอร์เซ็นความผิดเพี้ยนอยู่ที่ 0.06% ถึง 0.73% เมื่อค่าแรงดันที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก สูงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5

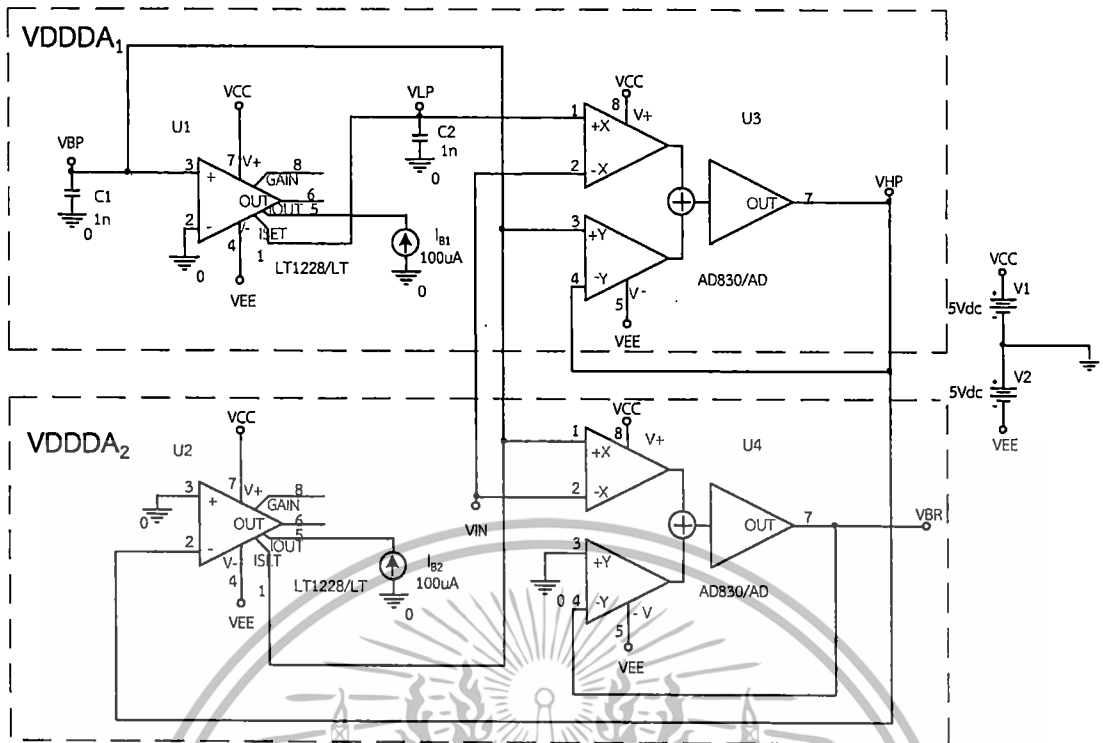
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกรวมของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่เทียบกับขนาดของแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนไปตั้งแต่ 0mV – 600mV

#### 4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอด้วยการต่อวงจรจริง

เพื่อเป็นการแสดงถึงความสามารถในการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ได้สังเคราะห์วิเคราะห์และออกแบบไว้ จึงได้ทำการสร้างวงจรจริงขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำวงจรมอสทรานซิสเตอร์ไปพัฒนาขึ้นไปสร้างเป็นวงจรได้ ดังนั้นจึงทดสอบวงจรโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความนำถ่ายโอน  $g_m$  และไอซีเบอร์ AD830 ทำหน้าที่เป็นวงจรผลต่างแรงดันแสดงในรูปที่ 2.20 ในบทที่ 2 ซึ่งในการต่อวงจรจริงได้ทดสอบวงจรรองความถี่แบบหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต แสดงในรูปที่ 4.6 ในการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 5$  V ตัวเก็บประจุ  $C_1 = C_2 = 1$  nF และ  $I_{B1} = I_{B2} = 100$   $\mu$ A ป้อนอินพุตวงจรเป็นสัญญาณไซน์ 80 mV และปรับความถี่ของสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้อินพุตของวงจร ที่ 1kHz ไปจนถึง 3MHz จากนั้นวัดค่าแรงดันสัญญาณด้านเอาต์พุตเปรียบเทียบกับแรงดันสัญญาณอินพุตของวงจร หาค่าการตอบสนองความถี่ของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตวงจรในแต่ละช่วงความถี่ และบันทึกไว้ในรูปแบบอัตราส่วนเอาต์พุตต่ออินพุตแต่ละช่วงความถี่ได้ผลตอบสนองแต่ละฟังก์ชันแสดงดังรูปที่ 4.7

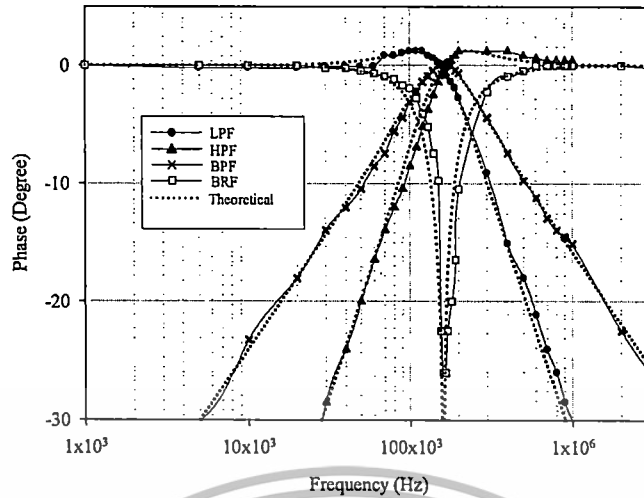


รูปที่ 4.6 วงจรกรองความถี่ที่สอดคล้องกันหลายหน้าอินพุตสี่เอาต์พุตที่ใช้ในการทดลองจริง

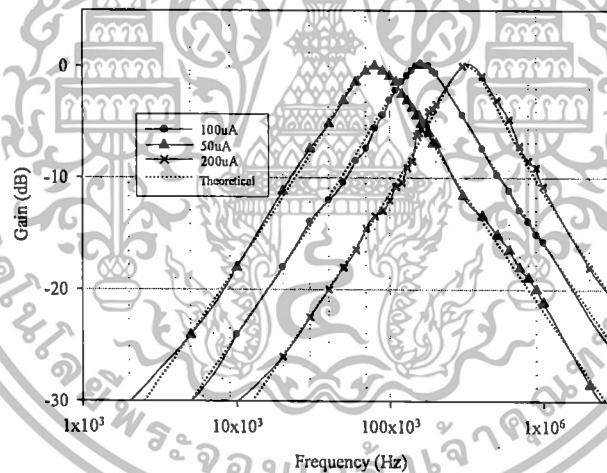
ในการทดสอบใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 5\text{VDC}$ , กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1\text{nF}$  และปรับค่ากระแส  $I_{b1} = I_{b2} = 100\mu\text{A}$  ป้อนอินพุตวงจรสัญญาณไซน์  $80\text{mV}$  และปรับสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้อินพุตของวงจรตั้งแต่  $1\text{kHz}$  ถึง  $3\text{MHz}$  ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  $157\text{kHz}$  ค่าที่ได้จากการคำนวณ  $143.87\text{kHz}$  เบี่ยงเบนไปจากผลการคำนวณในทางทฤษฎี 9% จากนั้นวัดค่าแรงดันสัญญาณด้านเอาต์พุตเปรียบเทียบกับแรงดันสัญญาณอินพุตของวงจร หาค่าการตอบสนองความถี่ของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตต่ออินพุตแต่ละช่วงความถี่ สามารถคำนวณได้จาก  $20\log(V_{out}/V_{in})$  มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) แล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อแสดงการตอบสนองของวงจร พบว่าตอบสนองได้ครบทั้งสี่ฟังก์ชันคือ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำ และกรองหยุดแถบความถี่ ให้ผลตอบสนองสอดคล้องกับสมการที่ (3.29), (3.32), (3.39) และ (3.39) แสดงในรูปที่ 4.7

เพื่อยืนยันว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ จึงทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันสัญญาณไซน์ให้อินพุตของวงจรขนาด  $80\text{mV}$  แล้วเปลี่ยนกระแสไบอัสที่จ่ายให้  $I_{b1} = I_{b2} = 50\mu\text{A}, 100\mu\text{A}, 200\mu\text{A}$  ทดสอบผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ พบว่าวงจรให้ผลตอบสนองที่  $f_0 = 79.57\text{kHz}, 160\text{kHz}, 318.28\text{kHz}$  ตามลำดับ จึงยืนยันได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถปรับเปลี่ยนความถี่  $f_0$  ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ตรงตามวัตถุประสงค์ แสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



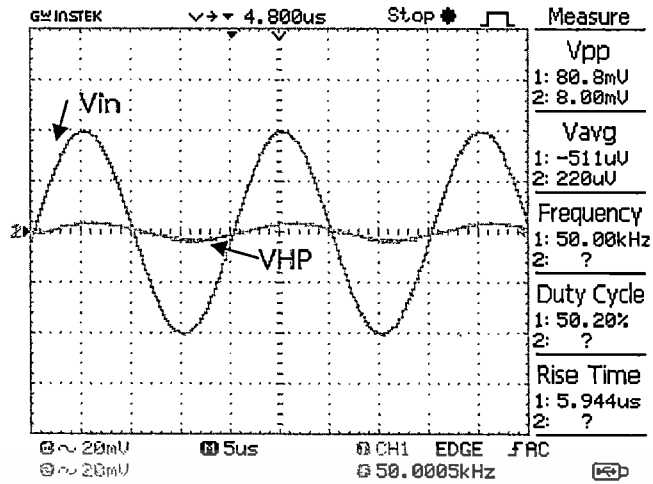
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองความถี่ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำและกรองหยุดแถบความถี่ที่  $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$



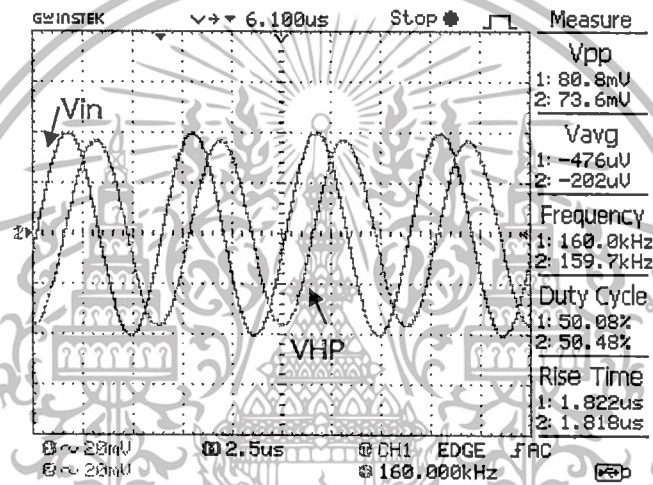
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองความถี่ฟังก์ชันผ่านกรองผ่านแถบความถี่เมื่อปรับ  $I_{B1} = I_{B2} = 50\mu A, 100\mu A, 200\mu A$

ผลทดสอบการทำงานของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง พบว่าให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีในสมการที่ (3.30) ดังนี้ เมื่อช่วงความถี่ต่ำกว่า 50 kHz ซึ่งต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติ สัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะต่ำกว่าขนาดของสัญญาณอินพุต และเมื่อความถี่อยู่ในช่วงความธรรมชาติคือ 160 kHz ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะมีขนาดเกือบเท่ากับขนาดของสัญญาณอินพุต และที่ความถี่มากกว่าความธรรมชาติจนถึง 400 kHz สัญญาณจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับขนาดของสัญญาณอินพุต แสดงดังรูปที่ 4.9

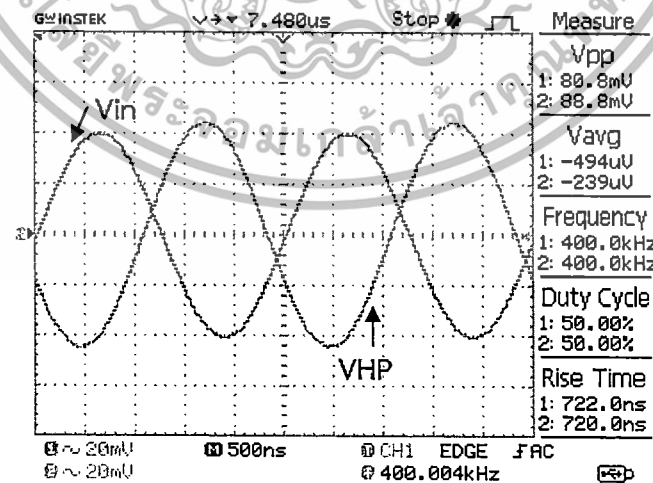
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



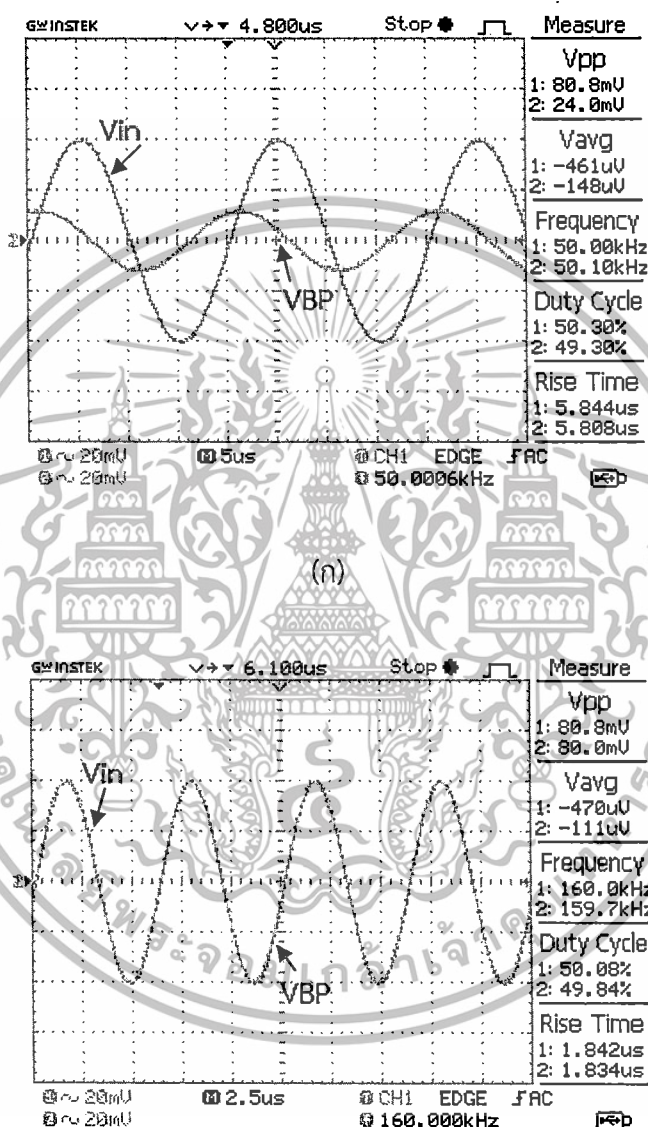
(ค)

รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง (ก)  $f_0 =$

50kHz, (ข)  $f_0 = 160kHz$  และ (ค)  $f_0 = 400kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการทำงานฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีในสมการที่ (3.33) ดังนี้ เมื่อช่วงความถี่ 50kHz ซึ่งต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติ ขนาดของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะต่ำกว่าอินพุต และเมื่อความถี่อยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติ 160kHz จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณแรงดันอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดที่เท่ากัน และที่ความถี่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติ จนถึง 400kHz สัญญาณจะถูกลดทอนจนทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.10

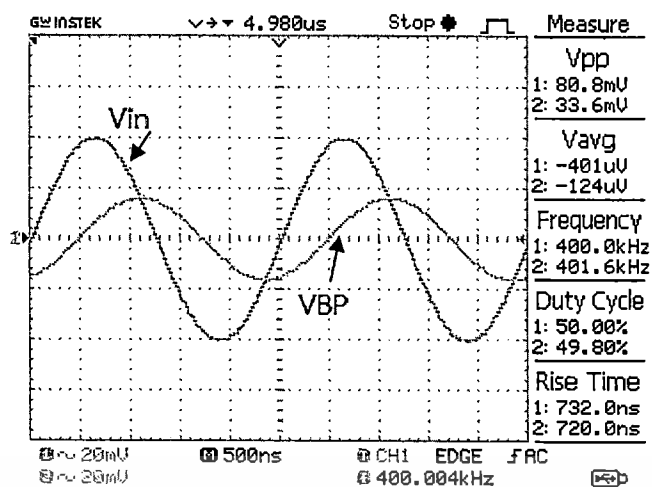


(ข)

รูปที่ 4.10 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ (ก)

$f_0 = 50\text{kHz}$ , (ข)  $f_0 = 160\text{kHz}$  และ (ค)  $f_0 = 400\text{kHz}$

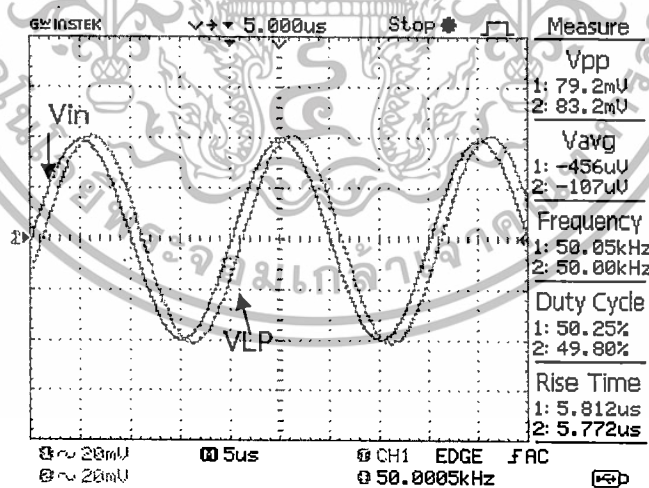
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

รูปที่ 4.10 (ต่อ)

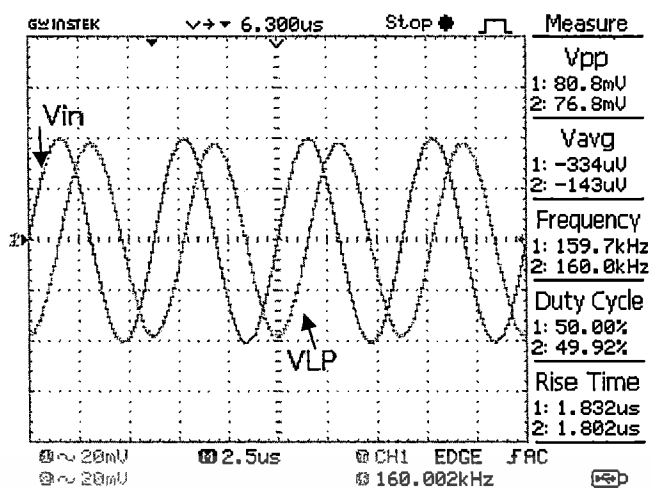
ผลการทดสอบการทำงานฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีจากสมการที่ (3.36) ดังนี้ ช่วงความถี่ 50kHz ซึ่งต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะสูงจนเกือบเท่ากับขนาดของสัญญาณอินพุต และเมื่อความถี่อยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติ 160kHz จนถึง 400kHz ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะถูกลดทอนลง แสดงดังรูปที่ 4.11



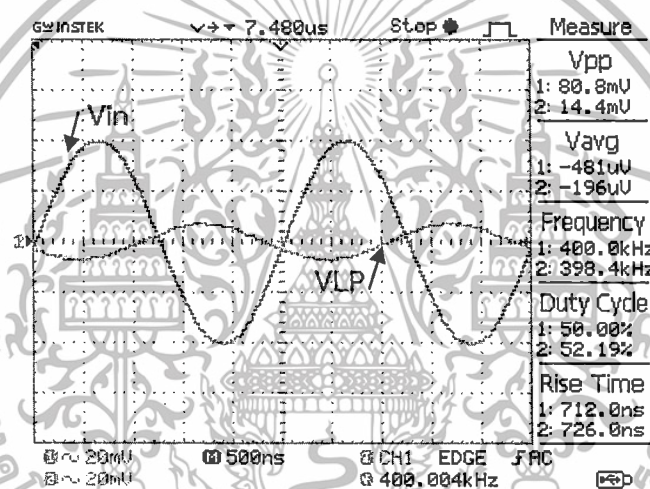
(ข)

รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ (ก)  $f_0 = 50\text{kHz}$ , (ข)  $f_0 = 160\text{kHz}$  และ (ค)  $f_0 = 400\text{kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

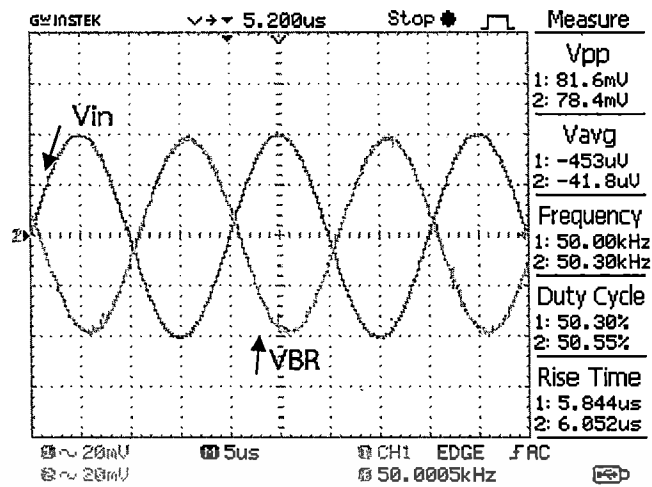


(ค)

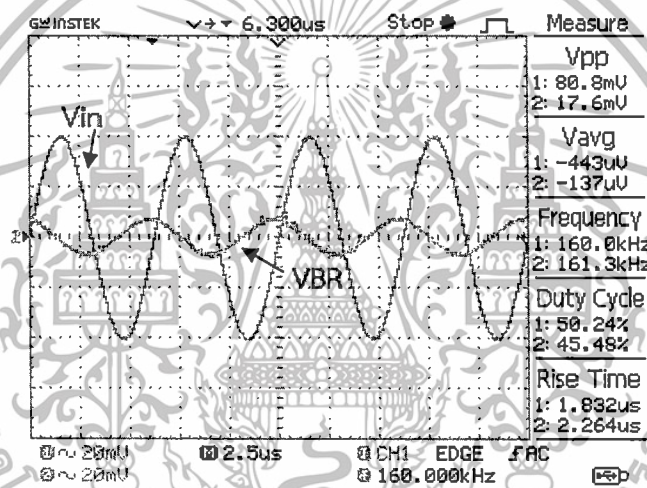
รูปที่ 4.11 (ต่อ)

ผลการทดสอบการทำงานของฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีในสมการที่ (3.39) ดังนี้ เมื่อช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ความถี่ 50kHz สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีขนาดเกือบเท่าสัญญาณอินพุต ในช่วงความถี่ธรรมชาติ 160kHz ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะมีขนาดที่ต่ำกว่าสัญญาณอินพุตและที่ความถี่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติที่ความถี่ 400kHz ขนาดของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นจนทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเกือบเท่ากับสัญญาณอินพุต แสดงดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



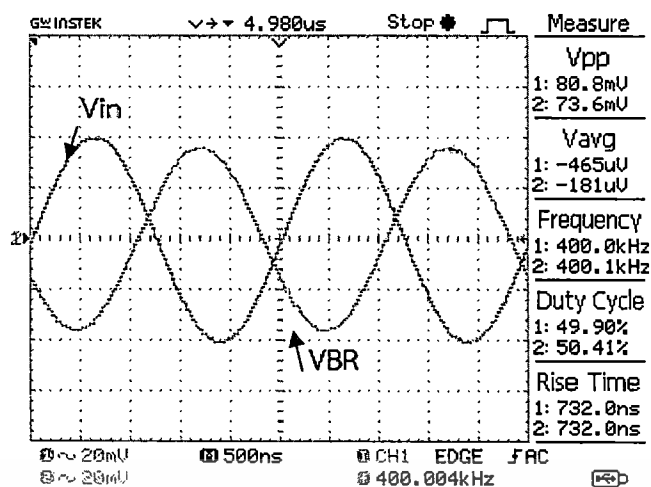
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของฟังก์ชันกรองหูดแถบความถี่ (ก)  $f_0 = 50\text{kHz}$ , (ข)  $f_0 = 160\text{kHz}$  และ (ค)  $f_0 = 400\text{kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.12 (ต่อ)

### 4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างวงจรรองความถี่หลายหน้าที่โดยใช้วงจรรวมสำเร็จรูปแบบต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบกับวงจรรองความถี่ที่ได้มีผู้นำเสนอไว้ แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ที่เลือกนำมาออกแบบแตกต่างกัน การใช้จำนวนอุปกรณ์แอ็กทิฟต่อการต่ออุปกรณ์แพสซีฟเพิ่มโดยไม่ต่อลงกราวด์ ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่นำเสนอกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอไว้

ชื่อผู้วิจัยและปีที่น่าเสนอ	ชื่ออุปกรณ์แอ็กทิฟ	จำนวนอุปกรณ์แอ็กทิฟ	C+R C+R	C+R ต่อลงกราวด์ ทุกตัว	ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์	ให้ฟังก์ชันกรองความถี่ทั้ง 4 ฟังก์ชัน
Maneewan, Sreewirote and Jaikla 2011	DDCC+CCCII	1+1	2+1	ใช่	ได้	ไม่ได้
Hornng 2012	DVCC	1	3+2	ไม่	ไม่ได้	ได้
Chiu and Hornng 2011	DDCC	2	2+3	ใช่	ไม่ได้	ได้
Channumsin, Pukkalanun and Tangsrirat. 2012	DDCCTA	2	2+2	ใช่	ได้	ได้
Channumsin, and Tangsrirat 2013	DDCCTA	3	2+2	ใช่	ได้	ได้
Ismail and Arif. 2014	DVCC	5	2+5	ใช่	ได้	ไม่ได้
Channumsin and Tangsrirat 2013	DDCCTA	1	2+2	ไม่ใช่	ได้	ได้
Chiu and Hornng, 2011	DDCCs	3	2+3	ไม่ใช่	ไม่ได้	ได้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ชื่อผู้วิจัยและปีที่นำเสนอ	ชื่ออุปกรณ์ แอ็กทิฟ	จำนวน อุปกรณ์ แอ็กทิฟ	C+R	C+R ตอลง กราวนด์ ทุกตัว	ควบคุมได้ด้วย วิธีทาง อิเล็กทรอนิกส์	ให้ฟังก์ชันกรอง ความถี่ทั้ง 4 ฟังก์ชัน
Chiu Horng and Wei. 2007	DDCCs	2	2+2	ใช่	ไม่ได้	ไม่ได้
งานวิจัยที่นำเสนอ, 2016	VDDDA	2	2+0	ใช่	ได้	ได้

ซึ่งผลการเปรียบเทียบวงจรรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่หนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตโดยใช้อุปกรณ์ VDDDA ที่ออกแบบไว้นั้นสามารถสรุปข้อดีได้คือ

- สามารถให้ฟังก์ชันกรองความถี่พร้อมกันทั้ง 4 ฟังก์ชันซึ่งจะมีคุณสมบัติที่เด่นกว่า DDCCs, DVCC, DDCC+CCCCII
- สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นกว่า DVCC, DDCC, DDCCs
- วงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอ็กทิฟ 2 ตัวและอุปกรณ์แพสซีฟ 2 ตัว ซึ่งใช้อุปกรณ์น้อยกว่า DVCC, DDCCs, DDCCA
- ใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวนด์เพื่อสะดวกในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมซึ่งจะมีคุณสมบัติที่เด่นกว่า DDCCTA, DDCCs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเล่มนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุต โดยใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟสำเร็จรูป VDDDA ซึ่งอาศัยหลักการของวงจรอินทิเกรเตอร์สองวงจรรวมและวงจรรวมสัญญาณสองวงจรต่อร่วมกัน จากนั้นได้ทำการสังเคราะห์วิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่โดยวงจรสามารถให้ผลตอบสนองฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ และฟังก์ชันกรองหยุดแถบความถี่ สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไบอัสจากภายนอก โดยการปรับที่กระแสไบอัส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  ผู้วิจัยได้นำวงจรที่ออกแบบไปทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE และต่อวงจรจริง เมื่อได้ผลการทดสอบแล้วว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ออกแบบไว้จึงได้นำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยขอสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะของงานวิจัยดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่โดยใช้อุปกรณ์ VDDDA ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างของวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ VDDDA จำนวนสองตัว ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอ็กทิฟ ใช้ตัวเก็บประจุจำนวนสองตัวแบบต่อลงกราวด์ จึงเหมาะสำหรับนำไปต่อเป็นวงจรรวม นำไปใช้งานในระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือนำไปทดลองทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และระบบสื่อสารวงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแสไบอัสจากภายนอก โดยการปรับกระแสไบอัสที่  $I_{B1}$  และ  $I_{B2}$  ทำให้วงจรสามารถประยุกต์เข้ากับระบบควบคุมอัตโนมัติผ่านทางคอมพิวเตอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

ผลการทดสอบสมรรถนะและผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ อุปกรณ์ VDDDA โดยใช้เทคโนโลยีมอสทรานซิสเตอร์ 0.18 um TSMC วงจรใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm 0.9V$  วงจรมีอัตราการใช้พลังงานที่ 0.206mW ใช้ตัวเก็บประจุ  $C_1 = C_2 = 15pF$  กำหนดกระแสไบอัส  $I_{B1}$  และ  $I_{B2} = 50\mu A$  จากการทดสอบพบว่าวงจรสามารถตอบสนองการทำงานได้สี่ฟังก์ชัน คือ กรองผ่านความถี่สูง กรองผ่านแถบความถี่ กรองผ่านความถี่ต่ำ และกรองหยุดแถบความถี่ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 จากนั้นทดสอบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต โดยป้อนความถี่อินพุตที่ 3.23MHz ขนาด 50mV เพื่อทดสอบผลตอบสนองทางเวลา (Transient) ทดสอบย่านการรับระดับสัญญาณอินพุต (Input Dynamic Range) ของวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่นำเสนอ โดยป้อนสัญญาณไซน์ให้อินพุตของวงจรถ่ายที่ความถี่ 3MHz และปรับแรงดันอินพุต ตั้งแต่ 0mV – 600mV ป้อนกระแสไบอัสให้คงที่  $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$  โดยทดสอบที่ฟังก์ชันกรองผ่าน แลบบความถี่ วัดที่แรงดันเอาต์พุต เพื่อวัดหาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion : THD) พบว่าย่านการรับแรงดันอินพุตที่ให้ความผิดเพี้ยนไม่เกิน 1% อยู่ที่ 10mV ถึง 200mV เปอร์เซ็นความผิดเพี้ยนอยู่ที่ 0.06% ถึง 0.73% จากนั้นทดสอบค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ด้วยวิธีปรับอิล็กทรอนิกส์โดยปรับค่า  $I_B = 20\mu A, 50\mu A$  และ  $100\mu A$  ให้ค่า  $C_1 = 150pF, C_2 = 15pF$  ได้ความถี่  $f_0 = 344.35kHz, 772.68kHz$  และ  $1.61MHz$  พบว่าเป็นไปตามสมการที่ (3.43) คือสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิล็กทรอนิกส์ โดยการปรับที่กระแสไบอัส  $I_B$

การทดสอบวงจรถ่ายจริงโดยใช้ไอซีเบอร์ LT1228 และ AD830 ต่อร่วมกันเป็นโครงสร้าง VDDDA ใช้แหล่งจ่ายไฟไฟฟ้ากระแสตรง  $\pm 5V$  ใช้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2 = 1nF$  และ  $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$  ในทางทฤษฎี สามารถคำนวณผลค่าความถี่ธรรมชาติ  $143.87kHz$  ผลการทดสอบวงจรถ่ายให้ผลตอบสนองการทำงานได้สี่ฟังก์ชันได้แก่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่สูง ฟังก์ชันกรองผ่านแลบบความถี่ ฟังก์ชันกรองผ่านความถี่ต่ำ และฟังก์ชันกรองหยุดแลบบความถี่ วัดผลตอบสนองความถี่ได้  $157kHz$  เบี่ยงเบนไปจากผลการคำนวณในทางทฤษฎี 9% สาเหตุจากความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุตของวงจรถ่ายต่างแรงดันและค่าอุปกรณ์แฝงของ VDDDA โดยสอดคล้องกับที่ได้วิเคราะห์ไว้ในกรณีความไวของวงจรถ่ายความถี่ที่มีผลกระทบจากตัวแปรอุปกรณ์ เมื่อทดสอบการปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์โดยการปรับค่ากระแส  $I_{B1} = I_{B2} = 50\mu A, 100\mu A, 200\mu A$  ได้ความถี่  $f_0 = 79.57kHz, 160kHz, 318.28kHz$  ตามลำดับ ความถี่เปลี่ยนแต่ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยืนยันผลได้ว่าสามารถปรับ ควอลิตี้แฟกเตอร์ได้อิสระจากความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีทางอิล็กทรอนิกส์ได้เมื่อต่อวงจรถ่ายจริง

ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าวงจรถ่ายความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุต-สี่เอาต์พุตที่ได้นำเสนอ นั้น มีสมรรถนะสอดคล้องกับการวิเคราะห์วงจรถ่ายความถี่อันดับสองโหมดแรงดันหนึ่งอินพุตสี่เอาต์พุตทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติจริง สามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบผ่านโปรแกรม PSPICE และการต่อวงจรถ่ายจริง

## 5.2 อภิปรายผลงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่มีผู้วิจัยนำเสนอไว้ ได้กล่าวถึงจุดเด่นและข้อจำกัดต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาในบทที่ 1-2 แสดงคุณสมบัติไว้ในตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่าสามารถพัฒนาแก้ไขข้อจำกัดของงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ศึกษาในบทที่ 1-2 ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยสรุปมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่น ดังนี้

5.2.1 สามารถให้ฟังก์ชันกรองความถี่พร้อมกันทั้ง 4 ฟังก์ชัน

5.2.2 สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 วงจรประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอ็กทิฟ 2 ตัวและอุปกรณ์พาสซีฟ 2 ตัว

5.2.4 ใช้ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์เพื่อสะดวกในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

ดังนั้นจากคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นที่กล่าวมาข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่างานวิจัยนี้ได้พัฒนาแก้ไขข้อจำกัดต่างๆของงานวิจัยก่อนหน้า ทำให้สะดวกต่อการนำไปพัฒนาใช้งานในภาคอุตสาหกรรม การผลิตวงจร ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนประกอบของวงจรรองความถี่หลายหน้าที่ ตลอดจนเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพัฒนางจรรองความถี่หลายหน้าที่ในขั้นสูงต่อไป

### 5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

สำหรับการวิจัยในครั้งต่อไปในอนาคต ผู้วิจัยมีความเห็นสมควรออกแบบและพัฒนางจรรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่ VDDDA ให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้นและสามารถปรับความถี่ธรรมชาติและค่าควอสิตีแฟกเตอร์ให้สามารถปรับอิสระจากกันได้ หรือพัฒนาโครงสร้างของวงจรให้สามารถตอบสนองความถี่สูงขึ้น ทั้งนี้ผลงานที่ได้จากการวิจัยควรมีการนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม และการศึกษาในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับวงจรรองความถี่ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- จิรสุดา โกษิยาภรณ์. 2554. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิลาศ นิลสระคู 2557. “การสังเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่อันดับสองโหมดแรงดันหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุตที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศุภชัย คลังทอง. 2554. “วงจกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดแรงดัน โดยใช้วงจรถยายความนำถ่ายโอนและยูนิฟอร์มดิสทริบิวต์อาร์ซี” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
- อัจฉราวรรณ เนื่องนิต. 2546. “วงจกรองความถี่หลายหน้าที่โหมดกระแส ที่มีสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้ CCII” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Abuelma'atti, M.T. Tasadduq, N.A. 1999. “A novel three inputs and one output universal current-mode filter using plus-type CCII.” *Microelectronics Journal*. 30(3) : 287-292.
- Budbooncho, J. Pukkallanun T. and Tangsrirat, W. 2015. “Resistor voltage-mode first-order allpass section using single current-controlled conveyor transconductance amplifier.” *Indian Journal of Pure & Applied Physics*. 53. : 335-340.
- Channumsin, O. and Tangsrirat, W. 2013. “SIFO Voltage-Mode Biquadratic Filter Using DDCCTAs and Grounded Passive Element.” *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*. :ISSN : 2078-0958.
- Channumsin, O., Pukkalanun, T. and Tangsrirat, W. 2012. “Voltage-mode universal filter with one input and five output using DDCCTAs and all-grounded passive components.” *Microelectronics Journal*. : 1-6.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Chiu, W.Y. and Horng, J.W. 2011. "voltage-mode Biquadratic filters with one input and five outputs using two DDCCs." **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.** 18 : 97-101.
- Chiu, W.Y. and Horng, J.W. 2012. "voltage-mode Highpass, Bandpass, Lowpass and Notch Biquadratic filter using Sing DDCC." **Radioengineering.** 21 : 297-303.
- Herenncsar, N., Sotner, R., Metin, B., Koton, J., and Vrba, K. 2013. "VDDDA-New 'Voltage Differencing' Device for Analog Signal Processing." **Electrical and Electronics Engineering – ELECO.** : 17-20.
- Horng, J.W. 2011. "High output impedance current-mode universal biquadratic filters with five inputs using multi-output CCIs." **Microelectronics Journal.** 42(5) : 693-700.
- Horng, J.W. 2012. "Voltage-mode multifunction biquadratic filter employing single DVCC." **International Journal of Electronics.** 99(2) : 153-162.
- Ibrahim, M.A. and Kuntman, H. 2004. "A Novel High CMRR High Input Impdance Differential Voltage-Mode KHN-Biquad Employing DO-DDCCs." **International Journal of Electronics and Communication.** (AEU) 5 : 429-433.
- Ibrahim, M.A., Minaei, S., and Kuntman, H. 2005. "A 22.5 MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and grounded passive elements." **International Journal of Electronics and Communication.** (AEU) 59 : 311-318.
- Ismail, M.U. and Arif, B. 2014. "Single Input Multi Output Digitally Reconfigurable Biquadratic Analog Filter." **International Conference on systems Information, Modelling and Simulation.** : 201-206.
- Jaikla, W., Biolek, D., Siripongdee, S., and Bajer, J. 2014. "High Input Impedance Voltage-Mode Biquad Filter Using VD-DIBAs." **Radioengineering.** 23(3) : 914-921.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Kumngern, M., Knobob B., and Dejhan, K. 2010. "Electroniccally tunable high-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter based on simple CMOS OTAs." *International Journal of Electronics and Communication*. (AEU) 64 : 934-939.
- Maneewan, S. Sreewirote, B. and Jaikla, W. 2011. "Electronically Tunable Voltage-Mode Universal Filter Using DDCC and CCCII." *International Conference on Circuits, System and Simulation*. : 322-326.
- Pandey, N., Pandey, R., and Paul, S.K. 2012. "Novel single input five output voltage mode universal filter based on DDCCTA." *Third International Conference on Computer and Communication Technology*. : 46-51.
- Sedra, A.S. and Smith, K.C. 1991. *Microelectronic circuits*, 3rd ed., Florida: Holt, Rinehart and Winston.
- Tangsrirat, W. and Channumsin, O. 2011. "High-input Impedance Voltage-Mode Multifunction Filter Using a Single DDCCTA and Grounded Passive Element." *Radioengineering*. 20(4) : 905-910.
- Tangsrirat, W. Channumsin, O. and Pukkalanun, T. 2013. "Resistorless realization of electronically tunable voltage-mode SIFO-type universal filter." *Microelectronics Journal*. 44(3) : 210-215.
- AD830 "High Speed, Video Difference Amplifier" Analog Device Incorporated, [Online]. Available : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheet/AD830.pdf>
- LT1228 "100MHz Current Feedback Amplifier with DC Gain Control" Linear Technology Corporation,[Online]. Available : <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1228fd.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PT-PMOS	NT-NMOS
<p>T_Measured=27, T_Current=27,  LEVEL=7, L=100.000000E-06,  W=100.000000E-06, IS=1.000000E-15,  JS=100.000000E-06, PBSW=.825119,  UCRIT=10.000000E+03, DIOMOD=2,  K1=.580412, K2=.024457, XPART=.5,  VTH0=-.374006, K3=0, W0=1.000000E-06,  NLX=128.099200E-09,  DVT0=.668721, DVT1=.263877,  UA=1.163515E-09, UB=1.140054E-21,  UC=-100.000000E-12,  VSAT=159.425100E+03,  RDSW=336.5941, VOFF=-.087798,  NFACTOR=2, PCLM=2.56324,  PDIBL1=521.034600E-06,  PDIBL1=.028407, DROUT=932.376300E-06,  PSCBE1=10.020050E+09,  PSCBE2=2.894025E-09, A0=1.652561,  A1=.245183, A2=.723822,  NPEAK=415.890000E+15, LDD0=0,  LITL=34.641020E-09, UC1=-56.000000E-12,  PVAG=14.69882, KETA=.028017,  ETA0=.156051, ETAB=-.107562,  K3B=16.02416, DVT2=.1, DSUB=1.22217,  AGS=.333677, DVT1W0=0, DVT2W0=0,  PRWG=.5, PRWB=.5, PDIBLCB=-1.000000E-03,  DWG=-47.112140E-09,  DWB=9.082247E-09, B0=548.968200E-09,  B1=1.586569E-06, LINT=28.935480E-09,  DLC=28.935480E-09, DWC=0, CF=0,  NOIA=9.900001E+18,</p>	<p>T_Measured=27, T_Current=27,  LEVEL=7, L=100.000000E-06,  W=100.000000E-06, IS=1.000000E-15,  JS=100.000000E-06, PBSW=.8,  UCRIT=10.000000E+03, DIOMOD=2,  K1=.582498, K2=1.124609E-03,  XPART=.5, VTH0=.353392,  K3=1.000000E-03, W0=100.000000E-09,  NLX=184.072500E-09, DVT0=1.262857,  DVT1=.376196, UA=-1.561780E-09,  UB=2.480205E-18, UC=44.816730E-12,  VSAT=100.768100E+03,  RDSW=121.9514, VOFF=-.083114,  NFACTOR=2.366991, PCLM=.715962,  PDIBL1=.109199, PDIBL1=2.169770E-03,  DROUT=.616315,  PSCBE1=80.000000E+09,  PSCBE2=916.765900E-12, A0=1.931052,  A1=.603.445900E-06, A2=.925372,  NPEAK=235.490000E+15,  LITL=34.641020E-09, UC1=-56.000000E-12,  PVAG=9.542172E-03, KETA=-9.940263E-03,  ETA0=3.174418E-03,  ETAB=8.177868E-06, K3B=4.943196,  DVT2=.025758, DSUB=.023411,  AGS=.418964, PRWG=.5, PRWB=-.2,  PDIBLCB=-.1, DWG=-13.755960E-09,  DWB=11.945710E-09, B0=-14.927050E-09,  B1=-100.000000E-09,  LINT=15.596090E-09, DLC=15.596090E-09,  NOIA=100.000000E+18,</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PT-PMOS	NT-NMOS
NOIB=2.400000E+03, NOIC=1.400000E-12, LKETA=-2.267552E-03, WKETA=.037975, PVSAT=-50, PKETA=-5.680607E-03, PVTH0=2.109087E-03, PUA=-38.681400E-12, PUB=1.000000E-21, PU0=-1.108983, PRDSW=-2.294228, PETA0=100.000000E-06, PK2=1.860337E-03, VTM=.025864, PBSWG=.825119	NOIB=50.000000E+03, NOIC=-1.400000E-12, LKETA=-6.575911E-03, WKETA=7.669023E-03, PVSAT=1.268612E+03, PKETA=-471.931200E-06, PVTH0=337.801700E-06, PUA=91.750130E-12, PU0=22.07985, PRDSW=-4.733463, PETA0=100.277000E-06, PK2=-538.716700E-06, VTM=.025864, PBSWG=.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุวิมล ชัยมงคล
วัน-เดือน-ปีเกิด	24 กุมภาพันธ์ 2529
สถานที่เกิด	จังหวัด ลำปาง
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 499/188 หมู่ 6 ตำบลแพรงษา อำเภอเมืองฯ จังหวัด สมุทรปราการ 10280
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย สาขา วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนสมุทรปราการ ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรม บัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	ครูอัตราจ้าง แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ พ.ศ. 2554 - ปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้